

Kırıkkale University International Journal of Engineering Research and Development

International Peer Reviewed Journal
e-ISSN: 1308-5514



Volume: 14
Issue: 2
JULY 2022

Kırıkkale Üniversitesi
Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
Uluslararası Hakemli Dergi

Cilt: 14 Sayı:2 Temmuz 2022



KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ / KIRIKKALE UNIVERSITY

**Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development**

Sahibi / Owner

Ersan ASLAN
Rektör / Rector

Baş Editör/Editor in Chief

Ali Payıdar AKGÜNGÖR

Yardımcı Editörler / Associate Editors

Murat LÜY
Özer SEVİM
Hüseyin AYDİLEK

Alan Editörleri / Area Editors

Atilla ERGÜZEN- Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering
Enes AYAN- Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering
Murat İNAL- Biyomühendislik / Bioengineering
Burak BİRGÖREN- Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering
Hacı Mehmet ALAĞAŞ- Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering
Tolga EREN- Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering
Mustafa Yasin ERTEN- Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering
Ersin KORKMAZ- İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering
Saruhan KARTAL- İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering
Hakan ARSLAN- Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering
Tolga DEMİRCAN- Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering
Tuna AYDIN – Metalurji ve Malzeme Mühendisliği / Metallurgical and Materials Engineering
Aziz Barış BAŞYİĞİT – Metalurji ve Malzeme Mühendisliği / Metallurgical and Materials Engineering

Dergi Sekreteryası / Journal Secretariat

Buğra HATİPOĞLU

ISSN- Online: 1308-5514

Yazışma Adresi /Address

Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi
71450-Kampüs- Kırıkkale- TÜRKİYE

<http://ijerad.kku.edu.tr>

ijerad@kku.edu.tr

Tel : +90-318-357-42 42 (1001)

Fax: +90-318-357-24 59

Temmuz 2022 / July 2022

Kapak Tasarım / Graphics Design: Hüseyin AYDİLEK

Danışma Kurulu / Editorial Board
(*Alfabetik Sıralama / Alphabetical*)

- A. Serdar YILMAZ Sütçü İmam Üniversitesi
Ahmet Kürşat TÜRKER Kırıkkale Üniversitesi
Ayten ÇELEBİ KESKİN Kırıkkale Üniversitesi
Ertuğrul ÇAM Samsun Üniversitesi
Hasan Şakir BİLGE Gazi Üniversitesi
Hüseyin CANBOLAT Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
İbrahim UZUN Kırıkkale Üniversitesi
İlhami DEMİR Kırıkkale Üniversitesi
İlhan KOCAARSLAN İstanbul Üniversitesi
İsa NAVRUZ Ankara Üniversitesi
M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU Gazi Üniversitesi
M. Tunay GENÇOĞLU Fırat Üniversitesi
Mehmet Ali AKÇAYOL Gazi Üniversitesi
Metin DAĞDEVİREN Gazi Üniversitesi
Mustafa YİĞİTOĞLU Kırıkkale Üniversitesi
Mustafa TÜRK Kırıkkale Üniversitesi
Nihat İNANÇ Kırıkkale Üniversitesi
Osman YILDIZ Kırıkkale Üniversitesi
Ömer Muhammet SOYSAL Louisiana State University
Recep ÇALIN Kırıkkale Üniversitesi
Süleyman ERSÖZ Kırıkkale Üniversitesi
Tamer EREN Kırıkkale Üniversitesi



KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ / KIRIKKALE UNIVERSITY

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development

Amaç

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi mühendisliğin tüm disiplinlerinde çalışılmış olan orijinal ve yüksek kalitedeki araştırma sonuçlarını basan ve teşvik eden bir araştırma dergisidir. Akademisyenler, bilim adamları, üniversitelerdeki araştırmacılar ve ilgi duyan herkesin çalışmaları basım için düşünülebilir.

Aim

International Journal of Engineering Research and Development is a peer-reviewed international research journal aiming at promoting and publishing original high-quality research in all disciplines of engineering sciences and technology. Manuscripts are invited from academicians, scientists, researchers of universities and industry and for all interested people for publication consideration.

Araştırma Alanı

Mühendislik Teorisi ve Uygulamaları

Research Highlights

Engineering Theory and Applications

Kapsam

Derginin ilgi alanlarında, sınırlama olmaksızın, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Makina Mühendisliği, İnşaat Mühendisliği, Bilgisayar Mühendisliği ve Endüstri Mühendisliği bulunmaktadır.

Scope

Areas includes (but not limited to) all issues in Electrical&Electronics Engineering, Mechanical Engineering, Civil Engineering, Computer Engineering and Industrial Engineering.

Yazarlara Bilgi

Ayrıntılı bilgi için lütfen <http://ijerad.kku.edu.tr/> adresini ziyaret ediniz.

Authors Information

For detailed information please visit <http://ijerad.kku.edu.tr>

Yayın Etiği

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi (UMAGD) temel olarak, ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors) tavsiyeleri ile COPE (Committee on Publication Ethics)'un Editör ve Yazarlar için Uluslararası Standartları'na uymayı taahhüt etmektedir.

UMAGD, bilime hizmet etmek amacıyla tüm yayın süreçlerini tarafsız, saygın, hesap verebilir bir şekilde yürütmeyi taahhüt eder. Bu doğrultuda, yazarların din, dil, ırk gibi farklılıklarını gözetmeksizin çalışmalarını etik kurallara uygun ve adil olarak değerlendirmektedir.

UMAGD, yayınlanmak üzere başvuru alan çalışmayı en az iki hakem tarafından kör hakem değerlendirilmesi usullerine uygun olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır. Yazar ve hakemlerin kimlik bilgileri ve çalışmanın gizli kalacağı UMAGD'nin garantisindedir.

UMAGD, çalışmayı değerlendirmek üzere alanında uzman kişileri hakem olarak seçmektedir.

UMAGD tarafından yayınlanan makaleler, bilime katkı sağlayan, özgün ve başka bir yerde ve/veya başka bir dilde yayınlanmamış makalelerdir.

UMAGD, tüm paydaşları arasında çıkar çatışmasının oluşmasına müsaade etmez. Çalışmanın muhattapı olan kişi ve kurumların zarar görmesini engelleyecek şekilde değerlendirme süreçlerini yönetir.

UMAGD, etik kuralların ihlal edildiğini belirlediği tüm makaleler için düzeltme yayını yayınlamayı ve paydaşlarını bilgilendirmeyi taahhüt eder.

UMAGD'de yayınlanan tüm eserlerin telif hakkı UMAGD'ye aittir. Bu eserlerin izinsiz olarak veya referans verilmeden kullanılmasına izin vermez.

Yazar, çalışmanın orijinal, başka yerde ve başka dilde yayınlanmamış / yayınlanmak üzere değerlendirilmeye alınmamış, etik kaygılar içermediği konusunda taahhütte bulunmalıdır. Çalışmalarda kullanılan görsel, şekil, tablolar ve alıntılar için gerekli izinler alınmalı, referans ve teşekkürle belirtilerek kullanılmalıdır. Telif ile ilgili kanunlara riayet edilmelidir.

Çalışmada yer alan tüm yazarların çalışmaya bilimsel olarak katkısı olmalı, yazar sıralaması en çok katkı sağlayan yazardan daha az katkı sağlayan yazara doğru olmalıdır. Yazar sıralamasında tüm yazarların rızası alınmalıdır. Çalışmaya yazar olacak kadar yeterli katkısı olmayan kişiler ile kurumlar teşekkür kısmında belirtilmelidir.

Çalışmayı değerlendirmek üzere gönderilen daveti kabul eden hakemler, değerlendirme sürecinde etik kurallara uymayı, çalışmanın içeriğinin gizli tutulmasını ve tarafsız bir yargıya varacağını kabul etmiş sayılır.

Çalışma değerlendirme sürecinde hakemler, çalışma hakkında bilgi danışmak / tartışmak üzere 3. kişiler ile yayın hakkında görüşmemeyi, çalışmanın içeriğini korumayı taahhüt ederler.

Araştırma Etiği

Araştırma konusunun seçiminde insalığın ve bilimin yararı gözetilmelidir. Yapılan çalışmalar şeffaf ve hesap verilebilir olmalıdır.

Araştırma konusuna uygun olarak etik kurul izinleri ve gerekli yasal/özel izin belgeleri alınmalıdır. İzinsiz veya etik bulunmayan araştırmalar yapılmamalıdır.

Araştırma insan ve / veya hayvan deneklerinin kullanımını gerektiriyor ise çalışmanın uluslararası deklarasyon, kılavuz vb. uygun gerçekleştirildiği beyan edilmelidir.

Araştırmacılar araştırmaya katılan kişileri, kurum ve kuruluşları araştırmanın konusu, yöntemi, beklenen çıktı ve olası kullanımları ile içerdiği riskler hakkında şeffaf bir şekilde bilgilendirmelidirler.

Araştırmaya katılan kişiler tamamen gönüllü olarak katılmalı, zorlama altında olmamalıdır. Katılımcılardan, araştırmaya başlamadan önce rıza belgesi alınmalı, istenildiği takdirde ibraz edilebilmelidir. 18 yaşından küçükler ile vesayet altında olan kişilerin yasal vasisinden rıza onayı alınmalıdır.

Araştırmacılar, katılımcıları riske sokmayacak şekilde çalışmalarını gerçekleştirmelidirler.

Araştırmacılar, katılımcıların kişisel bilgileri ile sağladıkları diğer bilgilerin gizliliğini sağlamalıdır. Katılımcıların, maddi veya manevi zarar görmelerine neden olacak paylaşımlara izin vermemelidirler.

Araştırmacılar, çalışma sonuçlarının herhangi bir ülke veya bölgede yaşayan kişileri, farklı dil, din, ırk gibi özelliklere sahip olan insanların maddi veya manevi olarak zarar görmelerine izin vermemelidirler.

Etik Kurulu ve Yasal / Özel İzin Belgesi Alınması

Aşağıdaki hususlarda araştırma yapmak için “Etik Kurul İzni” gerekmektedir.

- Anket, mülakat, odak grup çalışması, gözlem, deney, görüşme teknikleri kullanılarak katılımcılardan veri toplanmasını gerektiren nitel ya da nicel yaklaşımlarla yürütülen her türlü araştırmalar
- İnsan ve hayvanların (materyal/veriler dahil) deneysel ya da diğer bilimsel amaçlarla kullanılması,
- İnsanlar üzerinde yapılan klinik araştırmalar,
- Hayvanlar üzerinde yapılan araştırmalar,
- Kişisel verilerin korunması kanunu gereğince retrospektif çalışmalar.

Ayrıca;

- Olgu sunumlarında “Aydınlatılmış onam formu”nun alındığının belirtilmesi,
- Başkalarına ait ölçek, anket, fotoğrafların kullanımı için sahiplerinden izin alınması ve belirtilmesi,
- Kullanılan fikir ve sanat eserleri için telif hakları düzenlemelerine uyulduğunun belirtilmesi gereklidir.
- Araştırmacılar, etik kurulu onayı gerektiren tüm çalışmalar için bölgelerinde bulunan etik kurullarına başvurarak gerekli izinleri almalıdırlar.
- Etik kurul iznine ait kurul adı, değerlendirme tarihi ve etik izin belgesi sayı numarası belirtilecek şekilde çalışmanın yöntem kısmında yer almalıdır.
- Çalışmanın değerlendirilmek üzere sisteme yüklenmesi esnasında, etik kurul izni belgesinin kopyasında sisteme yüklenmesi gerekmektedir.
- Çalışmanın bir kuruma ait verileri içermesi durumunda ilgili kurumdan verilerin kullanılmasına rıza gösterdiğine dair özel izin alınmalıdır. İzin veren kurum bilgisi ile hangi verilerin kullanılmasına izin verdiği teşekkür bölümünde belirtilmelidir.
- Çalışmanın özel mülkiyete ait bir alanda geçmesi durumunda ilgili kişi ve kurumdan elde edilen verilerin kullanılmasına rıza gösterdiğine dair özel izin alınmalıdır. İzin veren kişi ve kurum bilgisi ile hangi verilerin kullanılmasına izin verdiği teşekkür bölümünde belirtilmelidir.
- Çalışmanın girişi veya tahribatı özel izin gerektiren bir alanda gerçekleşmesi durumunda ilgili kurumlardan araştırmanın gerçekleştirilmesi için özel izin alınmalıdır. İzin veren kuruluşların bilgisi ile izin türü hakkında teşekkür bölümünde bilgi verilmelidir.
- Çalışmanın değerlendirilmek üzere sisteme yüklenmesi esnasında, alınan özel izin belgelerinin bir kopyasında sisteme yüklenmesi gerekmektedir.
- Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi herhangi bir itilaf çıkması durumunda hukuki haklarını saklı tutmaktadır.

Publication Ethics

International Journal of Engineering Research and Development (IJERAD) basically undertakes to comply with the recommendations of ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors) and the International Standards for Editors and Authors of COPE (Committee on Publication Ethics).

IJERAD undertakes to carry out all publishing processes in an impartial, respectable and accountable manner in order to serve science. In this respect, it evaluates the works of the authors as ethical and fair, regardless of differences such as religion, language, race.

IJERAD ensures that the study applied for publication is evaluated by at least two referees in accordance with the blind referee evaluation procedures. The identity information of the authors and referees and that the work will be kept confidential are under the guarantee of IJERAD.

IJERAD selects experts in their fields as referees to evaluate the study.

Articles published by IJERAD are original articles that contribute to science and have not been published elsewhere and / or in any other language.

IJERAD does not allow any conflict of interest between all of its stakeholders. Manages the evaluation processes in a way that prevents the persons and institutions that are the addressee of the study from being harmed.

IJERAD undertakes to publish correction publication and inform its stakeholders for all articles that it determines that the ethical rules are violated.

The copyright of all works published in IJERAD belongs to IJERAD. It does not allow these works to be used without permission or reference.

The author must make a commitment that the study is original, not published elsewhere or in another language / evaluated for publication, and does not contain ethical concerns. Necessary permissions should be obtained for the visuals, figures, tables and quotations used in the studies, and they should be used with reference and acknowledgment. Copyright laws must be respected.

All authors involved in the study should have a scientific contribution to the study, and the author order should be correct from the most contributing author to the less contributing author. Consent of all authors must be obtained in the author ranking. Individuals and institutions that do not contribute enough to be authors to the study should be stated in the acknowledgment section.

The referees who accept the invitation sent to evaluate the study are deemed to have accepted to comply with ethical rules during the evaluation process, to keep the content of the study confidential and to reach an impartial judgment.

In the study evaluation process, the referees undertake not to meet with third parties about the publication to consult / discuss information about the study, and to protect the content of the study.

Research Ethics

The benefits of humanity and science should be considered in the selection of the research topic. Studies should be transparent and accountable.

Ethical board permissions and necessary legal / special permissions should be obtained in accordance with the research subject. Unauthorized or unethical research should not be done.

If the research requires the use of human and / or animal subjects, international declaration, guideline etc. it must be declared appropriate.

Researchers should transparently inform research participants, institutions and organizations about the subject, method, expected output, possible uses and risks involved.

People participating in the research should participate completely voluntarily and not be under coercion. Before starting the research, a consent document must be obtained from the participants and can be presented if requested. The consent of those under the age of 18 and under guardianship must be obtained from their legal guardian.

Researchers should conduct their work in a way that does not put participants at risk.

Researchers should ensure the confidentiality of participants' personal information and other information they provide. Participants should not allow sharing that may cause material or moral damage.

Researchers should not allow people living in any country or region, or people with different language, religion, race, etc., to suffer material or moral harm.

Ethics Committee and Obtaining Legal / Special Permit Certificate

Ethics Committee Permission is required to conduct research on the following issues.

- All kinds of research conducted with qualitative or quantitative approaches that require data collection from participants using questionnaires, interviews, focus group work, observation, experimentation, interview techniques,
- Using humans and animals (including material / data) for experimental or other scientific purposes,
- Clinical researches on humans,
- Researches on animals,
- Retrospective studies in accordance with the law on protection of personal data.

Also;

- Stating that "Informed Consent Form" was obtained in case presentations,
- Obtaining permission from the owners for the use of scales, questionnaires and photographs belonging to others,
- It should be stated that the copyright regulations are complied with for the intellectual and artistic works used.
- Researchers must obtain the necessary permissions by applying to the ethics committees in their region for all studies that require ethics committee approval.
- The name of the ethics committee for permission, the date of evaluation and the number of the ethical permission document should be included in the method part of the study.
- While the study is uploaded to the system for evaluation, a copy of the ethics committee permission document must be uploaded to the system.
- In case the study includes data belonging to an institution, special permission must be obtained from the relevant institution that the data is used. The information of the permitting institution and what data it allows to use should be specified in the acknowledgment section.
- If the study takes place in a privately owned area, special permission must be obtained indicating that he consents to the use of the data obtained from the relevant person and institution.
- The information about the person and institution that gave permission and which data they allow to be used should be specified in the acknowledgment section.
- In case the entry or destruction of the study takes place in an area that requires special permission, special permission must be obtained from the relevant institutions to carry out the research. Information about the permitting organizations and the type of permit should be given in the acknowledgment section.
- While the study is uploaded to the system for evaluation, a copy of the special permits received must be uploaded to the system.
- International Journal of Engineering Research and Development reserves its legal rights in case of any dispute.

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

- Orta Anadolu-Orta Karadeniz Kimya Kümelenmesinin Önemi**
Importance of Chemical Clustering in the Central Anatolia-Central Black Sea Region
1 *Abdullah Mete Özgüner* **368-384**
DOI: 10.29137/umagd.874529
- Yoğunlaştırılmış Bütünleşik Işınım Ayrıştırılmalı PV/T Sistemlerinin Enerji ve Ekserji Analizi**
2 *Energy and Exergy Analysis of Concentrated PV/T Systems with Beam Splitting* **385-393**
Ömer Resuloğulları, Ali Erişen
DOI: 10.29137/umagd.1149536
- Use of Deep Learning Algorithms to Prevent Pantograph-Catenary Malfunctions**
3 *Şakir Parlakyıldız, Muhsin Tunay Gençoğlu, Mehmet Sait Cengiz* **394-405**
DOI: 10.29137/umagd.957018
- Sıcaklık ve Deformasyon Hızının Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi**
4 *Investigation of the Effect of Temperature and Strain Rate on Mechanical Properties* **406-419**
Süleyman Kılıç, Mehmet Fatih Demirdöğen
DOI: 10.29137/umagd.987547
- Direk Tipi Trafo Tesislerinde Parafudr Arızalarının Azaltılması**
5 *Reduction of Surge Arrester Faults in Pole Type Transformer Facilities* **420-426**
İbrahim Küçükşümbül, Mehmet Şen, Muciz Özcan
DOI: 10.29137/umagd.1003217
- Kauçuk Modifiye Bitüm ve Kompozit Agregata ile Üretilen Asfalt Aşınma Tabakasının Şartname Limitleri Yönüyle Değerlendirilmesi**
6 *Evaluation of the Asphalt Wearing Course Produced with Rubber Modified Bitumen and Composite Aggregate in Terms of Specification Limits* **427-438**
Abdulgazi Gedik
DOI: 10.29137/umagd.1011561
- Investigation of Nevşehir Perlite Aggregate in Terms of Alkali Silica Reaction**
7 *Osman Şimşek, İlhami Demir, Özer Sevim* **439-446**
DOI: 10.29137/umagd.1012508
- Farklı Soğuk Derz Birleşim Detaylarına Sahip Betonarme Kirişlerin Eğilme Davranışları**
8 *Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams with Different Cold Joint Details* **447-456**
Süleyman Kamil Akın, Saruhan Kartal, Abdullah Müsevitoğlu, Ahmad Javid Zia, Sadrettin Sancioğlu
DOI: 10.29137/umagd.1015985
- Farklı Dolgu Duvar Malzemelerinin ve Planda Yerleşimlerinin Betonarme Bir Yapının Davranışına Etkisi**
9 *The Effect of Different Infill Wall Materials and Their Location in Plan on the Behaviour of a Reinforced Concrete Building* **457-474**
Sadrettin Sancioğlu, Hasan Furkan Soydoğan, Hüsnü Can
DOI: 10.29137/umagd.1028494
- Yenilenebilir Enerji Çalışmalarında Bölge Seçimi Problemlerini Etkileyen Kriterlerin Önem Sıralarının Belirlenmesi**
10 *Determining the Importance Order of The Criteria Affecting the Problems of Regional Selection in Renewable Energy Studies* **475-491**
Emel Yontar
DOI: 10.29137/umagd.1034298

- Türkiye İnşaat Sektörü İş Kazalarının İstatistiksel Analizi, 2011-2020**
Statistical Analysis of Occupational Accidents in the Turkish Construction Industry, 2011-2020
11 Mehmet Ali Zengin 492-501
DOI: 10.29137/umagd.1035473
- PI, PID ve GA-PID Kontrolör ile Rüzgâr Türbinin Kanat Hatve Açısı Kontrolü**
Pitch Angle Control of Wind Turbine with PI, PID and GA-PID controller
12 İsmail Mohamed Sougueh, Göksu Görel 502-513
DOI: 10.29137/umagd.1036461
- Depolarda Ürün Atama Problemlerinde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Kullanımı: Bir İşletme Uygulaması**
Using Multi-Criteria Decision-Making Methods In Product Assignment Problems In Warehouses: A Case Study
13 Fatma Sümeyye Erarslan, Mustafa Deste 514-530
DOI: 10.29137/umagd.1039353
- F Sınıfı Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu İkamesinin Çimento Harç Özelliklerine Etkisi**
Effect of Substitution of Class F Fly Ash and Blast Furnace Slag on Cement Mortar Properties
14 İlhami Demir 531-543
DOI: 10.29137/umagd.1040338
- The Effect of Cu Doping On The Structural Properties and Electrical Resistivity Of MAPbI₃ Perovskite Thin Films**
Satiye Korkmaz
15 Satiye Korkmaz 544-551
DOI: 10.29137/umagd.1050430
- Sıra Bağımlı Hazırlık Süreli Özdeş Olmayan Paralel Makine Çizelgeleme Problemi: Oluklu Mukavva Fabrikasında Bir Uygulama**
Non-Identical Parallel Machine Scheduling Problem with Sequence-Dependent Setup Time: An Application in a Corrugated Cardboard Factory
16 Sümeyye Ünlü, Hacı Mehmet Alakaş 552-560
DOI: 10.29137/umagd.1059071
- TBL-MAC: Doğrusal Kablosuz Algılayıcı Ağlar için Yeni Bir Ortam Erişim Kontrol Protokolü**
A New Media Access Control Protocol Design for Linear Wireless Sensor Networks
17 Musa Çıbuk, Davut Ari, Fikri Ağgün, Ümit Budak 561-580
DOI: 10.29137/umagd.1062421
- Chlorella vulgaris Biyokütle Üretiminde Kültür Şartlarının Optimizasyonu**
Optimization of Culture Conditions in Production of Chlorella vulgaris Biomass
18 Mehmet Kalender, Sümeyye Bürkev 581-589
DOI: 10.29137/umagd.1054221
- Daldırma Metodu ile Üretilen TiO İnce Filmlerin Derişime Bağlı Elektriksel, Optik ve Yapısal Analizi**
Electrical, Optical and Structural Analysis Depending on Concentration of TiO Thin Films Produced via Dip-Coating Method
19 Necmi Serkan Tezel, Fatma Meydaneri Tezel, İ. Afşin Kariper 590-603
DOI: 10.29137/umagd.1070390

- 20 **Boraks Pentahidrat İkamemesinin Çimento Harcının Ses Geçirme ve Mekanik Özelliklerine Etkisi** **604-610**
Effect of Borax Pentahydrate Substitution on Soundproofing and Mechanical Properties of Cement Mortar
Ahmet Filazi, Muharrem Pul
DOI: 10.29137/umagd.1074214
- 21 **İç Ortam Bitkilerinin Takibi için IoT Tabanlı Akıllı Gömülü Sistem Tasarımı** **611-618**
IoT Based Smart Embedded System Design for Indoor Plants Tracking
Hayati Mamur, Zeynep Dicle, Süleyman Erdener
DOI: 10.29137/umagd.1078968
- 22 **Kollajen/Jelatin/Bal Esaslı Çift Katmanlı Doku İskelesi Üretimi ve Karakterizasyonu** **619-631**
Fabrication of Double-layered Tissue Scaffolds with Collagen/Gelatin/Honey Blends and Its Characterization
Yaren Erdem, Sahra Ezgi Süngü, Ömer Aktürk
DOI: 10.29137/umagd.1079714
- 23 **Klozet Kapakları Üretiminde Yeni Nesil Kapak Teknolojilerinin Geliştirilmesi** **632-637**
Development of New Generation Cover Technologies in The Production of Toilet Seats
Elif Gürel Özyurt, Erden Soner Erkılıç, Özgül Kocabaş, Can Alp Terzioğlu, Abdullah Tuğrul Seyhan, Arif Kayapınar
DOI: 10.29137/umagd.1080229
- 24 **Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen Tasarımı, İncelenmesi ve Prototip Üretimi** **638-652**
Atabey Multifunctional Flash Hider Design, Investigation and Prototype Production
Halil Özaslan, Mustafa Bozdemir
DOI: 10.29137/umagd.1085567
- 25 **Stent' in Vitro Degradation Rate and Toxic Degradation Products** **653-662**
Mustafa Doğan, Yaşar Aluç
DOI: 10.29137/umagd.1089249
- 26 **Taşkınların Ekonomik Zararlarının Değerlendirilmesi (Samsun-Mert Irmağı Havzası)** **663-678**
Evaluation of Economic Damages of Floods (Samsun-Mert River Basin)
Vahdettin Demir, Aslı Ülke Keskin
DOI: 10.29137/umagd.1090447
- 27 **Düşey Yüzlü Duvar Önünde Pervane Jetinin Neden Olduğu Oyulma** **679-690**
Scour Induced by Propeller Water Jet in front of a Vertical Wall
Ali Doğu, Kubilay Cihan, Ayşe Yüksel Ozan, Osman Yıldız, Hayri Ateş
DOI: 10.29137/umagd.1090579
- 28 **Normal ve %4NaCl Çözünürlüklü Kür Edilmiş Düz ve Nervürlü Donatılı Farklı Dayanımlı Betonlar İçin Donatı Aderans Kaybının Hızlandırılmış Korozyon Deneyi ile Belirlenmesi** **691-704**
Determination of Reinforcement Adherence Loss by Accelerated Corrosion Test for Normal and 4%NaCl Solubility Cured Flat and Ribbed Reinforced Concretes with Different Strengths
Melek Akgül, Orhan Doğan
DOI: 10.29137/umagd.1092523
- 29 **Orta Gerilim Yer Altı Elektrik Şebekesi İçin Kablo Arıza Tespit Cihazı Tasarımı ve Gerçek Zamanlı Uygulaması** **705-711**
Design and Real-time Implementation of Cable Fault Detector for Medium Voltage Underground Electricity Networks
Ali Rıza Kaleli, Andaç Kılıç, Mehmet Muğan, Mehmet Akif Ak, Ertuğrul Çam
DOI: 10.29137/umagd.1137861

- 30 **Rijit Bodrum Perdelerinin TBDY 2018 ile Tasarlanan Az Kath Yapılardaki Etkisi Üzerine Bir İnceleme** 712-720
An Investigation on the Effect of Rigid Basement Shear-walls on Low-Rise Buildings Designed with TBDY 2018
Serkan Etli
DOI: 10.29137/umagd.1092841
- 31 **An Improved Deep CNN For an Early and Accurate Skin Cancer Detection and Diagnosis System** 721-734
Zafer Civelek, Mohammed Hani Shakir Kfashi
DOI: 10.29137/umagd.1116295
- 32 **A New Warning Sphere Design with Side Emitting Optical Fiber Technology on Transmission Lines** 735-742
Mehmet Güçyetmez, Şekip Esat Hayber
DOI: 10.29137/umagd.1116554
- 33 **Su Altı Araçlarında Servo Motor Kontrolünün PSO ile Optimizasyonu** *Effect of Borax Optimization of Servo Motor Control in Underwater Vehicles with PSO* 743-751
Zahide Nur Yılmaz, Nuri Alper Metin, Murat Lüy
DOI: 10.29137/umagd.1124999
- 34 **Trafik Mikro-Simülasyon Model Kalibrasyonu için Özellik Seçim Algoritmalarının Karşılaştırılması** 752-761
Comparison of Feature Selection Algorithms for Traffic Micro-Simulation Model Calibration
Erdem Doğan
DOI: 10.29137/umagd.1096157
- 35 **SPI ve SPEI Yöntemleri ile Kuraklık Araştırması: Kırıkkale Örneği** 762-776
Drought Investigation Using SPI and SPEI Methods: A Case Study in Kırıkkale
Gaye Aktürk, Utku Zeybekoğlu, Osman Yıldız
DOI: 10.29137/umagd.1100886
- 36 **İnşaat Mühendisliği Eğitiminde Mühendislik Etiği Uygulamaları ve Etkileri** 777-783
Applications and Effects of Engineering Ethics in Civil Engineering Education
Zahide Bayer Öztürk, Özgen Tavşancı, Şule Nur İster
DOI: 10.29137/umagd.1104015
- 37 **Farklı Tane Boyutlarındaki Kuvarsın Elektroporselen Bünyeye Etkisinin İncelenmesi** 784-793
Investigation of Different Particle Size Quartz on Electroporcelain Body
Aliosman Tiryaki, Ceyda Ayça Avcı, Ceren Karakaya, Baran Tarhan
DOI: 10.29137/umagd.1117634
- 38 **Darknet Web Traffic Classification via Gradient Boosting Algorithm** 794-798
Fahrettin Horasan, Ahmet Haşim Yurttaka
DOI: 10.29137/umagd.1089249
- 39 **Waypoint-Based Path Tracking Approach For Self-Organized Swarm Robots** 799-815
Oğuz Mısır, Muhammed Çelik, Levent Gökrem
DOI: 10.29137/umagd.1118039

- Al 6061/B4C/GNP Hibrit Kompozitin İşlenmesinde Takım Aşınma Davranışlarının İncelenmesi**
40 *Investigation of Tool Wear Behaviors in The Machining of Al 6061/B4C/GNP Hybrid Composite* 816-828
Selçuk Yağmur, Muharrem Pul
DOI: 10.29137/umagd.1096103
- Kırıkkale İli Özelindeki Betonarme Konutların DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 Yönetmeliklerine Göre Depremisel Açından Mukayesesi**
41 *Seismic Comparison of Reinforced Concrete Houses in Kırıkkale Province According to DBYBHY-2007 and TBDY-2018 Codes* 829-843
Orhan Doğan, Yunus Genç, Filiz Doğan, Necati Mert
DOI: 10.29137/umagd.1112001
- A Survey on Lip-Reading with Deep Learning**
42 *Ali Erbey, Necaattin Barışçı* 844-860
DOI: 10.29137/umagd.1038899
- Yeni Nesil Alümina Esaslı Seramik Köpük Filtre Üretimi**
43 *The Production of New Generation Alumina Based Ceramic Foam Filter* 861-866
Tuna Aydın, Nazım Kunduracı
DOI: 10.29137/umagd.1120429
- SiC, MgCO₃ ve Li₂CO₃ İlavelerinin Seramik Köpükler Üzerine Etkisinin İncelenmesi**
44 *Investigation of The Effects of SiC, MgCO₃ and Li₂CO₃ Additions on Ceramic Foams* 867-871
Burak Doğan, Tuna Aydın
DOI: 10.29137/umagd.1120162
- DC-DC Dönüştürücünün Xilinx Zedboard Zynq-7000 FPGA Tabanlı Değişir&Gözle Algoritması ile Co-Simülasyonu**
45 *Co-Simulation of DC-DC Converter with Xilinx Zedboard Zynq-7000 FPGA Based Perturb&Observe Algorithm* 872-883
Ebru Doğan, Göksu Görel
DOI: 10.29137/umagd.1037811
- A Real-Time Invoice Based Smart Meter Design with Mobile Application**
46 *Mehmet Güçyetmez, Husham Sakeen Farhan* 884-894
DOI: 10.29137/umagd.1036454
- Özel Kısıtlı Hemşire Çizelgeleme Probleminin Çözümü için Hedef Programlama Model Önerisi**
47 *Goal Programming Model Proposal for Solution of Special Constraint Nurse Scheduling Problem* 895-906
Serkan Kaya
DOI: 10.29137/umagd.1095873
- rGO/SnSbS Nanokompozitlerin Farklı Depolama Sıcaklığına Bağlı Elektriksel, Yapısal ve Yüzeysel Değerlendirmesi**
48 *Electrical, Structural, Surface Evaluation Depends on the Different Deposition Temperature of rGO/SnSbS Nanocomposites* 907-916
Necmi Serkan Tezel, İ. Afşin Kariper
DOI: 10.29137/umagd.1062439
- An Overview to Unmanned Aerial Vehicles from Perspectives of Quality and Safety Management in Aviation**
49 *Ozlem Senvar, Seckin Unver* 917-940
DOI: 10.29137/umagd.1064242

- 50** **Betonarme Çerçevesi Binaların Tasarımında Kullanılan Sonlu Eleman Programlarının TBDY-2019’da Yer Alan Periyot, Taban Kesme Kuvveti ve Görelî Kat Ötelemesi Bağlamında Değerlendirilmesi** **941-957**
Evaluation of Finite Element Programs Used in the Design of Reinforced Concrete Frame Buildings in the Context of Period, Base Shear Force and Relative story drift in TBEC-2019
Yusuf Uysal, Ceyhan Aksoylu, Musa Hakan Arslan
DOI: 10.29137/umagd.1102613
- 51** **Farklı Katkı Malzemeler Kullanılarak Üretilen Yüksek Performanslı Betonların Elektrik Direnç Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi** **958-966**
Experimental Investigation of Electrical Resistance Properties of High Performance Concretes Produced With Different Types of Additives
Çağatay Mehmet Belgin
DOI: 10.29137/umagd.1099064
- 52** **Görüntü İşleme İle Çikolata Konumlarının Tespit Edilip Endüstriyel Robot İle Toplanması** **967-974**
Detecting Chocolate Positions by Image Processing and Collecting with Industrial Robot
Ali Osman Biler, Bahar Akbal
DOI: 10.29137/umagd.1133285
- 53** **Kablosuz Endüktif ve Kapasitif Güç Transferi Sistemleri Üzerine Nümerik Araştırma** **975-980**
Numerical Research on Wireless Inductive and Capacitive Power Transfer Systems
Mehmet Zahid Erel
DOI: 10.29137/umagd.1111436



Orta Anadolu-Orta Karadeniz Kimya Kümelenmesinin Önemi

Importance of Chemical Clustering in the Central Anatolia-Central Black Sea Region

Abdullah Mete Özgüner¹

¹Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 04/02/2021

Kabul / Accepted: 08/10/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Kimya endüstrisi ürünleri, diğer endüstri sektörleri üretimlerine önemli ölçüde katkıda bulunmakta ve adeta kimya endüstrisi bulunmayan endüstri kümelenmeleri eksik kalmaktadır. Kimya sektörünün dış ticaret açığı, toplam cari açığın %31'ni oluşturmakta ve plastik hammaddenin %85'i ithal edilmektedir. Karadeniz'de bulduğumuz büyük doğal gaz rezervi ve Zonguldak Filyos limanı gaz rafinerisi, Kırıkkale petrol rafinerisi, planlanan mavi akım Samsun ham petrol rafinerisi, Türkiye'nin gittikçe artan petrokimyasal ürün taleplerini ve ithalatını önemli ölçüde karşılayabilir. Savunma ve demir-çelik sanayinin geliştiği bu bölgede kimya sanayinin de gelişmesine ihtiyaç vardır. Karadeniz'de planlanan doğal gaz ve nükleer enerji tesisleri, bölgenin enerji güvenliğini sağlayacaktır. Son birkaç yılda bulunan Ankara Polatlı tenardit-globerit, Kazan trona, Kırıkkale, Çankırı, Çorum kaya tuzu yatakları ve daha önce bulunmuş olan Eskişehir boraks, Ankara Beypazarı trona yatakları, Orta Anadolu tuz yatakları rezervlerini ve çeşitliliğini iki kat artırmış ve naftadan sonra petrokimya endüstrisinin ikinci önemli hammadde ihtiyacı olan kimyasal tuzların varlığı güvence altına alınmıştır. Türkiye'nin kimyasal dış ticaretinde asıl önemli kaybı, kimyasal tuz yataklarından üretilen birincil ve ikincil kimyasal maddelerin büyük oranda ithalatıdır. Bu kümelenme; mevcut endüstriyel tesislerin eksikliklerini tamamlayan, inovasyonu destekleyen, sektöriyel ağ yapılarını oluşturan ve rekabet üstünlüğünü sağlayan, geliştirilmiş yeni bir bölgesel kalkınma modeli olabilir

Anahtar Kelimeler

"Kimya kümelenmesi, Kırıkkale petrol rafinerisi, Kloralkali tesisi, Kimyasal tuz rezervleri, Demir-çelik-kömür tesisleri"

Abstract

Chemical industry products, greatly support production of other industrial sectors. Industrial clusters without chemical industry become as if incomplete. The foreign trade deficit of the chemical sector comprises 31% of total current deficit. While 85% of the plastic raw material is imported. The great natural gas reserve discovered in Black Sea with its Zonguldak Filyos port gas refinery, Kırıkkale petroleum refinery, planned Blue Current crude oil Samsun refinery can greatly meet Türkiye's increasing petrochemical demand and imports. Developed chemical industry is also needed within this defence and iron-steel industrial district. The planned Filyos natural gas and Sinop nuclear energy installations will provide energy safety of the region. Ankara Polatlı tenardite-glauberite, Kazan trona deposits and Kırıkkale, Çankırı, Çorum rock salt deposits which have been discovered within the last few years and previously found Eskişehir borate and Ankara Beypazarı trona deposits have increased twice the reserves and varieties of Central Anatolian salt resources. This will ensure the second important raw material of chemical industry after nafta. The real loss in petrochemical foreign trade of Türkiye, is big imports of primary and secondary chemicals produced from salt raw materials.. The proposed clustering can be a new regional development model which ensures completion of the present industrial deficiencies, innovational support, development of sectorial infrastructure and competitive achievement.

Key Words

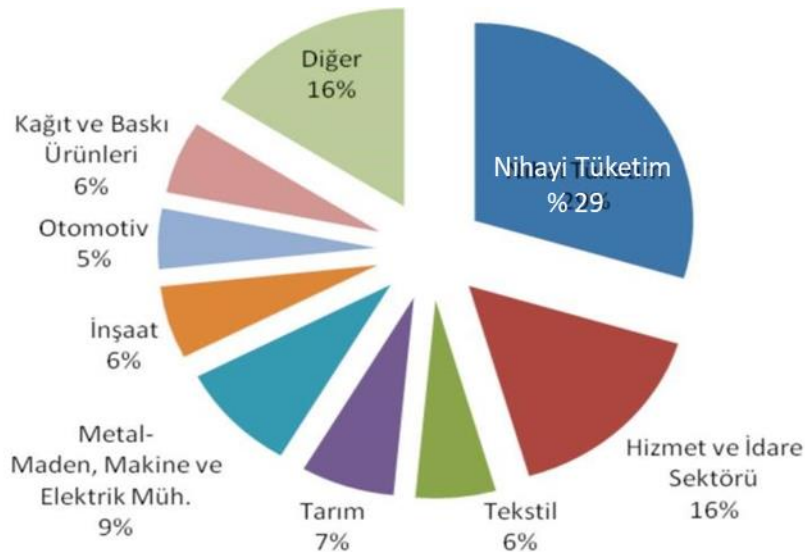
"Chemical clustering, Kırıkkale petroleum refinery, Chloralkali facility, Chemical salt reserves, Iron-steel-coke industry"

1. Giriş

Modern endüstriyel kümelenme teorisinin kurucusu Porter (1998) göre; bir bölgedeki endüstriyel tesislerin sadece “yığılması” kümelenme olmayıp, aynı faaliyet alanında hem rekabet içinde olan hem de birbiriyle iş birliği yapan şirketlerin, belli bir alanda uzmanlaşmış tedarikçilerin, hizmet sağlayıcıların, ilgili sektörlerdeki firmaların ve ilgili kurumların coğrafi yoğunlaşmalarıdır. Kümeler; verimliliği, yenilikçiliği, rekabet edebilirliği ve küme içerisindeki işletmelerde istihdamı artıracığı görüşü üzerine kurulmuştur. Kümelenmeler çoğunlukla; nihai ve ara ürün veya hizmet şirketleri, uzmanlaşmış girdi, ara parça makine tedarikçileri ile hizmet ve finansal kurumları ve ilgili endüstrilerdeki firmaları kapsamaktadır. Bununla birlikte uzmanlaşmış eğitim sunan, bilgi üreten ve araştırma yapan, teknik destek sağlayan (üniversiteler, düşünce gurupları, mesleki eğitim sağlayıcıları gibi) ve standartları belirleyen birimleri de kapsamaktadır. Bir kümelenmeyi etkileyen hükümet birimleri, kümelenmelerin üyelerini destekleyen ticaret birlikleri ve diğer toplu özel sektör de kümelenmenin bir parçası olarak görülebilmektedir. Kümelenme politikaları rekabette üstün alanlar doğurarak verimli bölgelerin oluşmasına imkân sağlamıştır. Bilginin oluşturulması, yayılması, kullanılması ekonomik büyümenin itici gücünü oluşturmaktadır. Bilgi toplumunda rekabet avantajı sağlamak için kümelerin rolü ve önemi artmıştır. İnovasyon ile birlikte ele alınan kümelenme yaklaşımı, bölgesel ekonomilerin gelişiminde önemli bir alternatif oluşturmuştur. Uzmanlaşmanın, doğal kaynakların ve alt yapının coğrafi boyutunun sağladığı avantajlar öne çıkmıştır. Mekân faktörünü analizin merkezine yerleştiren endüstriyel küme politikaları, hem kaynak dağılımındaki etkinlik ve teknolojik yenilikler açısından hem de yerel kalkınma sonuçları açısından olumlu etkiler doğurmaktadır. Sonuç olarak küresel rekabet şartları, ülkelerin etkileşimli ve çok yönlü bir ulusal kümelenme politikası geliştirmesini ülke gerçekleri ve uzmanlaşma becerileri doğrultusunda zorunlu kılmaktadır. Kümelenmenin teknopark veya teknoloji bölgeleri doğrultusunda evrim göstermesi dikkate alınmalıdır (Hobikoğlu ve Deniz, 2011; Öcal ve Uçar, 2011; Küçükler, 2012; Has, 2013).

Söz konusu açıklamaların rehberliğinde Orta Anadolu-Orta Karadeniz kimya kümelenmesi; bölgenin doğal kaynakları ve coğrafi yapısının sahip olduğu imkanları kullanan, gelişmekte olan enerji güvenliği ve alt yapı ağına sahip, özel sektör, üniversite ve devlet işbirliği ile nitelikli iş gücü ve Ar-Ge kapasitesine ulaşmış, yatırımcı güveninin kazanıldığı, önem verilen organik, inorganik kimya endüstrisi tesislerinin yeniden yapılandırılıp üretimleri ile savunma ve demir-çelik endüstri tesisleri üretimleri arasında karşılıklı hammadde, yarı mamul madde ihtiyaçlarının karşılandığı ve katma değeri yüksek imalatların yurt içi-yurt dışı pazar rekabetini kazandığı, bölgesel ticari, sosyal birliklilik olacaktır. Bu kümelenme; mevcut endüstriyel tesislerin eksikliklerini tamamlayan, inovasyonu destekleyen, sektöriyel ağ yapılarını geliştiren ve rekabet üstünlüğünü sağlayan, yeni bir bölgesel kalkınma modeli olabilir. Kimya sanayi, diğer birçok sanayi kolunun tedarikçisidir. Kimya sanayi nihai ürünleri %29’u bulur ve diğer sanayi dallarına %71 oranında hammadde ve ara mal sağlar, ülke endüstrisinin tüm alanlarını destekler (Şekil 1). Kimya kümelenmesi, nihai ürün tüketim sektörünün yanında, Orta Anadolu- Orta Karadeniz Bölgesinde var olan petrol rafinerisi, savunma sanayi, demir çelik sanayi, kok kömürü ve diğer birçok sanayi kollarının da ara mal tedarikçisidir. Bölge; kimya endüstrisi kümelenmesi için gerekli kimyasal tuz yataklarına, doğal kaynak, liman ve ulaşım alt yapısına, diğer endüstri sektörleri ve iç-dış pazar yakınlığına sahiptir.

Erceber (2020)’e göre; Çin’in kimya sanayiindeki hızlı ilerlemesini, limanlarda tesis ettiği 25 adet çok büyük kapasiteli ve her biri (4.000-10.000 hektar) alanı kaplayan kimya kümelerine borçludur. Türk Kimya Sektörünün 2017 yılı kimyasal ithalatı 38,364 milyar dolar ve ihracatı ise 14,716 milyar dolardır. Kimya sektörünün dış ticaret açığı 23,648 milyar dolar olup toplam cari açığın %31’ni oluşturur. Türkiye’nin kimyasal ithalatı, enerji ithalatından sonra gelir ve 2012 yılı ithalat oranı %25 iken 2017 yılı oranı %31’e çıkmıştır. Plastik hammaddesinin %85’i ithal edilmektedir.



Şekil 1. Kimya sektörünün diğer sektörlerle ilişkisi (Türkiye Kimya Sektörü Strateji Belgesi ve eylem planı, 2012).

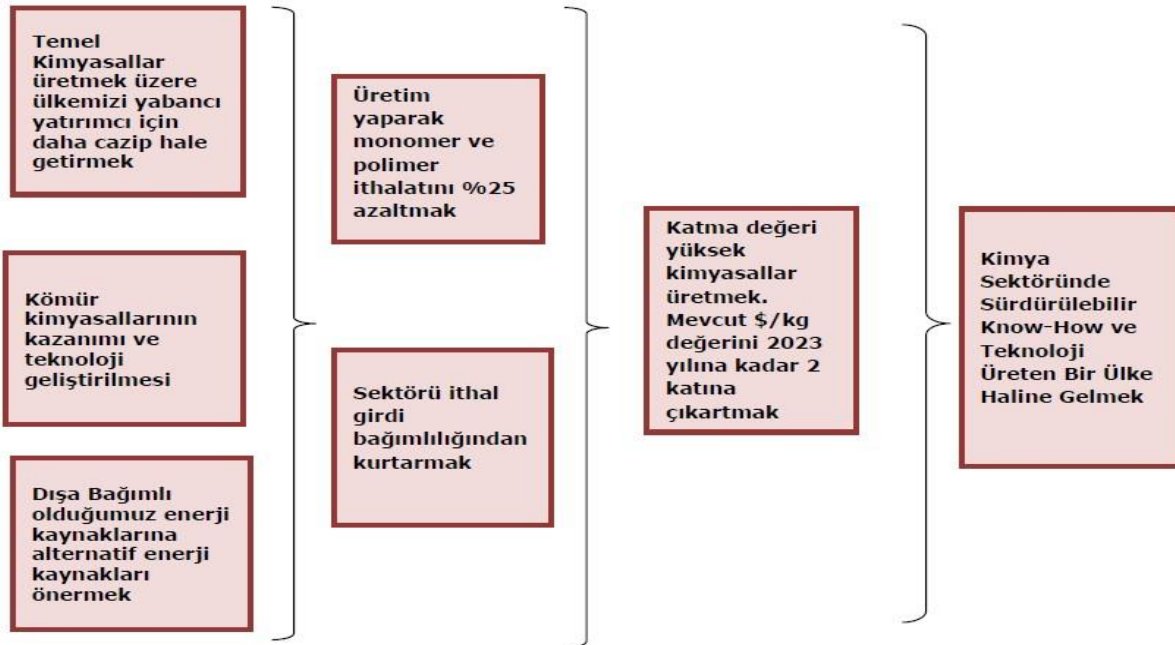
Ertek (2014)'e göre Türkiye'de kimyasal üretim sektörünün gelişebilmesi için şu dört konuya önem verilmelidir:

- 1) Hammaddede dışa bağımlılığın azaltılması, sürdürülebilirliğin sağlanması ve iyi dengelenmiş hammadde temini
- 2) Katma değeri yüksek kimyasallar üretimine önem verilmesi
- 3) Petrokimya kümelenme bölgeleri oluşturularak cazip yatırım merkezleri kurulması
- 4) Uygulamalı, özgün, yaygın kimya eğitimi, sanayi-üniversite işbirliği ve güçlendirilmiş ARGE çalışmaları

Ham petrol ve ham doğal gaz; benzin, mazot ve rafine doğal gaz şeklinde yakıt olarak arz edilmeden önce, rafinerilerde kimya endüstrisinin önemli organik hammaddeleri olan naftası, etanı, propanı, bütanı ve pentanı, kükürdü, CO₂ alınır. Kimya sektöründe bu Natural Gas Liquids (NGL) yan ürün sıvıları farklı yan sanayilere satılır, farklı kullanımları vardır ve petrokimya fabrikalarına ana hammadde sağlar. Rafine kömür katranı; kresot yağı, naftalin, fenol, metanol ve benzen gibi kimyasalların üretiminde kullanılabilir (Zukunft, 2020).

Mavi Akım ham petrol nakil hattı ve Samsun petrol rafinerisinin kurulumuyla, artan oranlarda ithal edilen nafta hammaddesi ve kimyasal ürünler yurt içinden temin edebilir. Önerilen Samsun limanı petrol rafineri projesi; Orta Karadeniz-Orta Anadolu petrokimya kümelenmesinin gelişiminde yabancı yatırım ve teknolojiler için sağlam bir alt yapıya sahip olup katma değeri yüksek ürünler üretmek yönünden ve gerekirse ham petrolün tankerlerle taşınması imkanına sahip olması açısından da caziptir (Şekil 1, Şekil 2, Şekil 3).

Erceber (2020) göre, petrokimya üretiminde üç ayrı yeni yöntemin kullanımı araştırılmaktadır: 1) Nafta ve polimer gibi atıklar tekrar değerlendirilip hammaddeye dönüştürülmeli. Böylelikle kimyasal çevre kirliliği de önlenmiş olacaktır. 2) Metanolün kömürden de üretilmesi yöntemiyle petrokimyasal üretimine geçilmesi ve petrole, naftaya, doğal gaza duyulan ihtiyacın azaltılması, 3) Rafinasyon prosesi atlanarak etilen ve propilen eldesine de geçilebilmektedir. Ham petrolün direkt hammadde olarak kullanılmasıyla çeşitli petrokimyasallar üretilebilmektedir.



Şekil 2. Temel Kimyasallar Sektörü Gelecek Araştırması 2015 – 2023 (İKMİB sonuç raporu, 2013).

Orta Anadolu ve Orta Karadeniz kimya kümelenmesinin sahip olduğu özellikleri şu başlıklar altında inceleyebiliriz::

2. Kimya Kümelenmesi İçin Aranan Özellikler

2.1 Kimya kümelenmesinde bir veya daha fazla petrol rafinerisi ve sürdürülebilir ham petrol nakil hatları bulunur

Türkiye'nin petrokimyasal hammaddesi olan naftaya ihtiyacının büyük bir bölümü PETKİM Aliğa Tesislerinden karşılanır durumdadır. Petkim dışında temel petrokimya sanayinde polistiren üreten Aschem (Başer Kimya), geliştirilebilir polistiren üreten Eastchem, dimetil tereftalat (DMT) üreten Advansa Sasa Türkiye'nin diğer petrokimyasal hammadde üreten tesisleridir. Ülkemizde polietilen tereftalat (PET) üretimi, Artenius, Meltem ve Korteks Kimya Firmaları tarafından gerçekleştirilmektedir (Kimya Sanayi 11. Kalkınma Planı, 2018).

Kimya kümelenmesi bölgesi, Kırıkkale'de petrol rafinerisine sahip olup Ceyhan-Kırıkkale boru hattından yılda 7,2 milyon ton ham petrol temin etme kapasitelidir (Şekil 3). Kırıkkale TÜPRAŞ Petrol Rafinerisi; İzomerizasyon, Hydrocracker, CCR Reformer ve Dizel Kükürt Giderme Ünitelerini de içerir ve Akdeniz standartlarına göre orta düzeyde kompleksiteye sahiptir. Rafineri, yılda 5 milyon ton ham petrol işleyebilmektedir. Türkiye'nin en büyük kara tankeri dolun kapasitesine de sahiptir. Nelson kompleksitesi 6,32 olan ve yüksek nitelikli ürün üretebilen Kırıkkale Rafinerisi, 2012 yılı itibarıyla 1,22 milyon m³ depolama kapasitesine ulaşmıştır (Kırıkkale Endüstrisi Fizibilite Raporu, 2018).

Zonguldak Filyos limanında kurulması planlanan doğal gaz rafinerisinden basınçla sıvılaştırılmış gaz ve hatta nafta türevleri üretmek mümkün olabilecektir. Var olan Mavi Akım rafine doğal gaz boru hattına ek olarak ham petrol boru hattının döşenmesi planlanmış olup bu ham petrolü işleyen ve temel organik kimyasal hammaddeler üreten bir rafinerinin Samsun limanında kurulması büyük önem taşır. Modern petrokimya rafinerileri, nafta ile beraber basınçla sıvılaştırılmış gazları ve kaya gazından üretilen petrolü de işleyebilecek nitelikte planlanmaktadır. Ögütçü, (2002)'ye göre Samsun'a ham petrol boru hattının döşenmesi ve petrol rafinerisi kurulumu gibi doğrudan yabancı yatırımı çekmek, bölgesel kalkınma stratejisinde önemli bir unsur olabilir ve yerli yatırımları önemli ölçüde tamamlayabilir.

Kimya endüstrisinin organik kimyasal tüketimi; %75 ham petrol türevi naftaya, %13 biyomasa ve %11 ham doğalgaza dayanır (Zukunft, 2020). Plastik ve kauçuk hammaddeleri, nafta temel kimyasal maddesi, Türk dış ticaret açığının en yüksek olduğu sektörlerdendir. Kırıkkale petrol rafinerisi ve önerilen Samsun Mavi Akım ham petrol hattı rafinerisi, bölge petrokimya kümelenmesinin ve ülke kimya sektörünün önemli organik hammaddeleri olan nafta, etilen, propilen ve plastik hammaddeleri sağlayacaktır. Özellikle son zamanlarda biyolojik kaynaklardan organik hammadde üretimleri hem kaynak çeşitliliği hem de çevresel etkilerden dolayı önem kazanmaktadır. Orta Anadolu ve Karadeniz bölgesi tarım sektöründe oldukça kuvvetlidir. Bu bölgelerdeki tarımsal faaliyetlerden biyogaz üretim potansiyeli de vardır. Örneğin patatesten etil alkol eldesi ve mısır nişastasından polilaktik asit üretimi, pancar küspesinden, bitki ve hayvan atıklarından biyodizel üretimi gibi. Organik bileşiklere oksijensiz ortamlarda mikrobiyolojik işlemlerin uygulanmasıyla %50-70 metan (CH₄), %30-40 karbon dioksit (CO₂) ve az miktarlarda hidrojen sülfid (H₂S), amonyak (NH₃), hidrojen (H₂), karbon monoksit (CO)'den oluşan biyogaz üretilip petrokimya hammaddesi olarak kullanılabilir (Enerji Tarımı ve Biyoyakıtlar 4. Ulusal Çalıştayı, 2014).

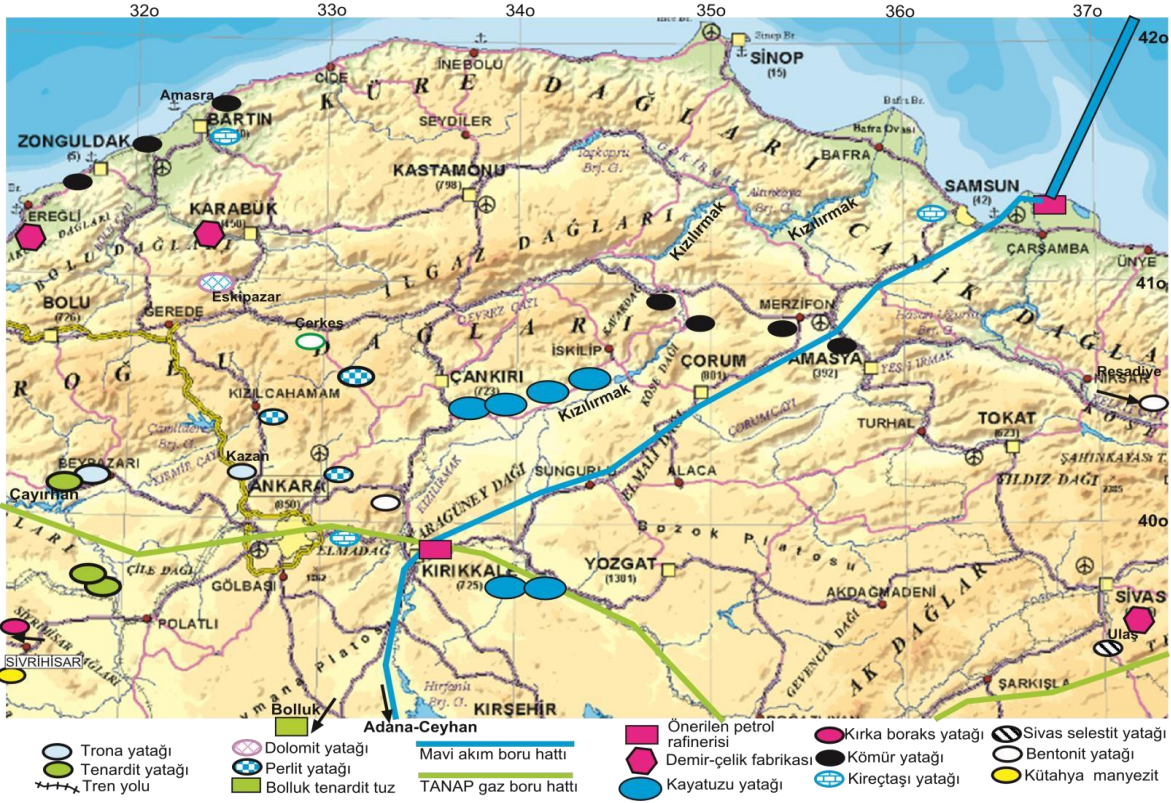
2.2 Kimya kümelenmesi; sürdürülebilir kimyasal tuz, endüstriyel hammadde ve doğal su kaynakları kullanır

Organik ve inorganik hammaddeleri kullanan kimya tesislerinin birbiriyle irtibatlı kurulması ve birlikte, entegre olarak çalışmasıyla kimyasal ürün çeşitliliğinin, randımanlı üretimin, katma değer verimliliğinin artması sağlanır. Bu nedenle kimya kümelenmelerine ihtiyaç vardır. Süreklilik ve hammadde yeterliliği kimya endüstrisi için büyük önem taşır. Boraksa dayalı sentetik elyaf üretimi yüksek katma değerli olup kolaylıkla artırılabilir. Ülkemizde bor ürünlerinin çok kullanılacağı, dayanıklı cam elyafı bazlı malzemelerin tüketiminde ve üretiminde artış olacaktır. Katma değeri yüksek üretimi yönlendirmek için Bor Enstitüsü kurulmuştur. Yenilenebilir enerji alanında izlenen hızlı gelişmeyle birlikte rüzgar enerjisi santrallerinin üretiminde ve rüzgar türbinleri gövde ve kanatlarının yapımında kullanılan boraksa dayalı cam elyafı ile güçlendirilmiş malzemelerin üretim ve tüketiminde olumlu gelişmeler beklenmektedir (Erceber, 2020).

Petrol rafinerisinin kükürt yan ürünü, %78 azot ve %21 oksijen bileşimli havadan üretilen azot, plastiklerin dolgu ve alaşım maddesi olarak kullanılan civar kireçtaşı, dolomit, bentonit, perlit, diyatomit, feldspat gibi yataklar, Karadenizin bakırlı piritleri, titanyum ve kromu, civar akarsu kaynakları inorganik kimya endüstrisinin hammaddesini oluşturur. Hammadde arzında sürdürülebilirlik, yenilenebilirlik ve yeterlilik, kimya endüstrisinin başarısında en önemli etkidir. Boraks, trona, tenardit, globerit, kaya tuzu, jips, kalsit, dolomit, manezit, selendit gibi kimyasal tuz yatakları (Tablo 1) ile kükürt, fosfat mineralleri; HCl, H₂SO₄, H₃BO₃, H₃PO₄, H₂CO₃ gibi asitlerin ve Ca(OH)₂, KOH, NaOH, Mg(OH)₂ gibi bazların temel hammaddesidir. Hava ise, nitrik asitin (HNO₃) ve amonyak bazın (NH₄OH) kaynağı teşkil eder. Tuz ve endüstriyel minerallerin ton değerleri nispeten düşük ve nakliyatları pahalı olduğu için ihracatlarından önce yurt içi sanayilerde kullanılması tercih edilir.

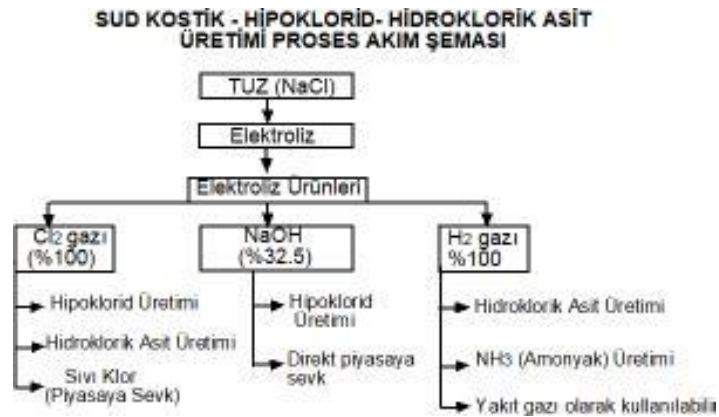
Orta Anadolu'da Kırıkkale, Çankırı, Çorum Neojen evaporit havzalarında tükenmez kaya tuzu (NaCl), alçıtaşı (CaSO₄) yatakları (Sönmez vd., 2011; Özgüner ve Kızıldağ, 2014; Sönmez ve Aydınadağ, 2017), Ankara Beypazarı-Kazan yöresinde trona (Tenekeci vd., 1983, Toprak ve Rojay, 2001), Polatlı'nın KB'da tenardit, globerit tuzu (Kırtıl vd., 2019, Kırtıl vd., 2019, Murat vd., 2020), güney, batı ve orta Anadolu'da yaygın kireçtaşı yatakları, Eskişehir yöresindeki boraks tuzu, Kütahya'da manezit yatakları, Sivas yöresinde selendit, Tokat Reşadiye ve Ordu ilinde bentonit, Kırşehir Masifinde feldspat yatakları ve Samsun, doğu Karadeniz yöresinde bakırlı pirit yatakları inorganik kimyasalların hammaddelerini oluşturur (Tablo 1).

Orta Anadolu'nun çeşitli tuz mineral rezervlerini hammadde olarak kullanabilecek bir kloralkali endüstrisine ihtiyaç vardır (Şekil 4). Hidroklorik asit (HCl), kostik soda (NaOH) ve soda külü (Na_2CO_3) klor-alkali pazarını oluşturur (Şekil 4). Bu pazarın 2016-2021 yılları arasındaki ortalama yıllık artış oranı %5.4 hesaplanmıştır. Hindistan ve Afrika'da 2018 – 2023 yılları arasında Vinil Klorür Monomeri (VCM) ve Polivinil Klorür (PVC) tüketim artışı en hızlı oranda olup sırasıyla yıllık ortalama %13 ve %10 oranlarına ulaşacaktır. Organik kimyasal, inorganik kimyasal, kağıt hamuru ve su arıtım endüstrilerinde klor-alkaliler için yüksek talepler vardır. Küresel olarak, parasal değer ve hacim itibarıyla klor-alkali pazarı, kimya endüstrisinin en büyük pazarlarından biridir (Erceber, 2020).



Şekil 3. Orta Anadolu-Orta Karadeniz petrokimya küme bölgesi tesislerini, kimya sektörünün diğer sektörlerle mekânsal ilişkilerini, petrol-doğal gaz boru hatlarını ve endüstriyel hammadde yataklarını gösteren harita (Fiziki coğrafya haritası).

2015 yılında hidroklorik asitin (HCl), Etilen Diklorür (EDC) ve Polivinil Klorür (PVC) üretimindeki kullanımı en büyük paya sahip olup küresel HCl pazar payı %35'den fazladır. Bu süreçte izo-siyanat üretiminde HCl kullanımı en hızlı gelişen uygulama olmuştur. İnşaat sektöründen ve kimyasal üretimlerden artan talepler, HCl pazarının önemini artırmıştır. Sodyum hidroksitinin (NaOH) kullanım alanları arasında, gıda ve kağıt hamurları üretimindeki talepler en büyüktür. Asya-Pasifik ve Güney Amerika ülkelerinde 2016 – 2021 yılları arasında tekstil endüstrisinde gittikçe artan değerlere sahiptir. Cam endüstrisinde ve konteynır ve cam ambalaj endüstrilerinde Na_2CO_3 için talep Asya-Pasifik ve Güneydoğu Asya ülkelerinde artmaktadır (Zukunft, 2020).



Şekil 4. Kayatuzu elektrolizi ile elde edilen temel klor-alkali kimyasalları (Kiaş Etimaden Kloralkali, 2014).

Tablo 1. Kimya Sanayinde Kullanılan Orta Anadolu Kimyasal Tuz ve Endüstriyel Hammadde Yatak Özellikleri

Tuz minerali	Lokasyon	Rezerv/ tüketim	Tenör	Kimyasal Formül	Toplam Kalınlık	Kaynak	Bulucu veya İşletici Şirket
Kaya Tuzu	Kırıkkale Sekili arası	Yüzlerce yıl yeter	%99 NaCl	NaCl	600m - 1000m	Özgüner; Kızıldağ,2014	KİAŞ Genel Müdürlüğü
Kaya Tuzu	Çankırı, Balıbağ Yenidoğan	Yüzlerce yıl yeter	%99 NaCl	NaCl	≥ 500m	Sönmez; Altındağ,2017	MTA Bülteni 2017. 23:13-26.
Kaya Tuzu	Çorum,Cicekli Emirhalil	Yüzlerce yıl yeter	%99 NaCl	NaCl	≥ 500m	Sönmez; Altındağ,2017	MTA Bülteni 2017. 23/13
Kaya Tuzu	Kırşehir Tuzköy	Büyük rezerv	%99 NaCl	NaCl	≥100m	Barutoğlu, 1950	MTA Bülteni
Trona Üretim 1 milyon ton/yıl	Ankara Beypazarı	233x10 ⁶ ton	%87	Na ₂ CO ₃ NaHCO ₃	123-450m ortalama 40,4m	DPT 8. beş yıl-rap 2001	Park Holding. Eti Soda AŞ.
Trona	Ankara, Kazan	601x10 ⁶ ton	%41,8 %33,1	Na ₂ CO ₃ NaHCO ₃	Kalın	Toprak ve Rojay, 2001	Rio-Tinto Comp. Park Holding.
Tenardit Globerit 460.000 ton/yıl	Acıgöl, Bolluk Tersakan gölü	100x10 ⁶ ton	%99	Na ₂ SO ₄ Na ₂ Ca(SO ₄) ₂	Göl tabanı 1m kalın	DPT 8. beş yıl 2001 rap	Alkim, Sodaş Otuzbirkimya
Tenardit Globerit Polihalit	Ankara Polatlı A. Ömerler	1.86x10 ⁶ 300x10 ⁶ ton	%37 %25	Na ₂ SO ₄ Na ₂ Ca(SO ₄) ₂ K ₂ Ca ₂ Mg(SO ₄) ₄	60-120m arası	Kırtıl vd., 2019	MTA Rap..No. 13780 ve 13771
Tenardit	Ankara Polatlı Yeni Köşeler	360x10 ⁶ ton	% 73 Na ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄ Na ₂ Ca(SO ₄) ₂	126-405m arası kalın	Murat vd., 2020	GASTERM Madencilik AŞ
Globerit % 95 Tenardit % 5	Ankara Çayırgan	Toplam 192x10 ⁶ tn	% 33	Na ₂ Ca(SO ₄) ₂ Na ₂ SO ₄	3m ve 30m	DPT 8. beş yıl-rap 2001	Alkim MTA Gen.Md. Eti-holding
Boraks-Üleksit 8x10 ⁵ ton/yıl	Eskişehir, Kırka Sarıkaya	30x10 ⁶ ton	%37 B ₂ O ₃	Na ₂ B ₄ O ₇ NaCaB ₅ O ₉	Kalın	DPT 8. beş yıl-rap 2001	MTA Gen.Md
Kireçtaşı	Kırşehir Ankara, Samsun Kayseri, Bartın	Yüzlerce yıl yeter	%95 ≤	CaCO ₃ CaO	Çok kalın	DPT 8. beş yıl rap. 2001	Erdemir, Nuh İsdemir Erciyes Kardemir
Manyezit	Eskişehir Kütahya,Konya	11x10 ⁷ ve 2.5x10 ⁶ ton/yıl	% 100	MgO (sinter)	Filon Çapraz damar	DPT 8. beş yıl rap. 2001	Kütahya Manyezit A.Ş. ve KÜMAŞ
Selestit; 80.000 ton/yıl	Sivas, Ulaş, Hafik, Kabalı	3x10 ⁶ ton	%96.4 %56.4 % 100	SrSO ₄ SrO	Alçıtaşı içinde	DPT 8. Beş yıl rap.2001	Barit Maden TÜRK AŞ.
Perlit	Ankara, Çubuk, Kızılcahamam, Çankırı, Orta	32x10 ⁶ 34x10 ⁶ 30x1 ton		%71-75 SiO ₂ % 12-18 Al ₂ O ₃ % 3-4 Na ₂ O %0.5-5 K ₂ O %0.5-2 CaO		DPT 8. Beş yıl rap. 2001	Eti-Holding Perlisan Ege endüstri, Saba Maden Persa
Alçı taşı- Anhidrit	Çankırı Çorum Kırıkkale Ankara	Yüzlerce yıl yeter	% 100	%32CaO % 47SO ₃	Çok kalın	DPT 8. beş yıl rap 2001	ABS, Lafarge Doğanalçı

Tablo 1 (devam). Kimya Sanayinde Kullanılan Orta Anadolu Kimyasal Tuz ve Endüstriyel Hammadde Yatak Özellikleri

Tuz minerali	Lokasyon	Rezerv/ tüketim	Tenör	Kimyasal Formül	Toplam Kalınlık	Kaynak	Bulucu veya İşletici Şirket
Dolomit	Çankırı-Sofular Eskipazar	236x10 ⁶ ton	%18-21 MgO	CaMg (CO ₃) ₂	Çok kalın	DPT 8. beş yıl rap. 2001	MTA Gen.Md
Olivin	Konya Beyşehir Çamlık	Yüzlerce yıl yeter	%100	% 49 MgO % 39 SiO ₂ % 9 Fe ₂ O ₃	Çok kalın	DPT 8. beş yıl rap. 2001	BEYKROM AŞ
Diyatomit	Ankara Kızılcahamam Çankırı Çerkeş Kayseri Hırka	25x10 ⁶ ton 50x10 ⁶ ton	%100	% 87 SiO ₂ % 3,23 Al ₂ O ₃ %1,9 Fe ₂ O ₃ %1,1 CaO %0,44 K ₂ O %0,47 Na ₂ O %0,45 MgO	Değişken	DPT 8. beş yıl rap. 2001	MTA Gen. Md.
Feldspat	Kırşehir granit, siyenit masifi	Toplam büyük rezerv	Yıkama Eleme Flotasyon	(K ₂ O+Na ₂ O) % 10-15	Değişken	DPT 8. beş yıl rap. 2001	Deniz; Kadioğlu, 2019
Plazer ağır mineral yatakları Manyetit, Titan	Samsun Çarşamba ve Ünye batısı, Ordu, Divam, Perşembe, Efirli	150x10 ⁶ ton %10 manyetit	Yıkama Eleme Flotasyon	Konsantre % 66 TiO ₂ ve % 58 Fe manyetit içerir.	Değişken kalınlıkta Plazer yatakları	Köksoy; Uncugil, 1971 MTA Derleme no.4702	MTA. Gen. Md.

Dünyada ve Türkiye’de halür (NaCl) kaya tuzunun ve kimyasal tuzların en çok tüketildiği alan kimya sanayidir. (Etimaden KİAŞ Kloralkali, 2014) raporuna göre; Türkiye’nin tuz üretim ve ticaretinde asıl önemli kaybı, halür (NaCl) tuzundan elde edilen birincil ve ikincil kimyasal maddelerin yüksek miktar ve değerlere ulaşan ithalatıdır. Halbuki Türkiye’nin halür tuzu rezervleri son derece büyüktür. Kimyasallar olarak ithal edilen NaCl türevlerinin arasında başlıca, klorik asit, sodyum hidroksit, sodyum klorat, sodyum hidrosülfid, sodyum nitrat, sodyum fosfat, sodyum bikarbonat, sodyum perborat, sodyum bikromat, sodyum asetat ve benzerleri ürünler yer almaktadır. Klor-alkali endüstrisi, temel olarak tuzlu suyun elektrolizine dayanır (Şekil 4). Sıvı klor, kostik (%32’lik, %48’lik ve pelet olarak), hidroklorik asit ve sodyum hipoklorit (%12-15’lik) üretilebilir. Ayrıca klor kullanılarak birçok kimyasal maddenin de üretilmesi mümkündür (PVC, demir (III) klorür, CaCl₂, poli alüminyum klorür vs.). Bu durum ülkemizde tuza dayalı birincil ve ikincil kimyasal maddeleri üreten rafinerilerin kapasite olarak yetersiz kalmasından kaynaklanıyor olabilir. Türkiye’de 3 adet kloralkali üreticisi olup bunlar Petkim, Akkim ve Koruma Klor’dur. Her üç üretici de Türkiye’nin batısında yer almakta olup; Petkim Aliağa/İzmir’de, Akkim Yalova’da, Koruma Klor ise Körfez/Kocaeli’dedir. Koruma Klor’un Kırıkhan/Hatay’da da 10.000 ton/yıl kapasiteli bir tesisi bulunmaktadır.

Kırıkale, Çankırı ve Çorum’da son birkaç senedir yapılan karotlu sondajlarla bulunan ve bulunacak olan (600-1000m) kalın yeraltı kaya tuzu yataklarında çözelti madenciliğiyle kavernalar (suni mağaralar) açılması ve bölgeden geçen TANAP ve Mavi Akım boru hatlarından bu kavernalara doğal gaz depolanması kolay ve mümkün olabilir. Çok uzun süreçleri kapsayan kaverna çözelti madenciliği sırasında çıkan tuzlu suyun boru hatlarıyla taşınıp klor-alkali endüstrisinin ana hammaddesi olarak kullanılması, çevre kirliliğini de önlemiş olabilecektir. Tuz Gölü altındaki kalın kaya tuzu yataklarında halen doğalgaz depolamak amacıyla kavernalar açılmaktadır.

Ülkemizde Tuz Gölü havzasında yeraltı kayatuzu yatakları özellikle diyapir (dom) yapılarında çok büyük kalınlıklara (2000m) ulaşmaktadır. Bu yapıların yerleri ve kalınlıkları Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı (TPAO) ve Maden Tetkik ve Arama (MTA) devlet şirketlerinin jeofizik sismik ve gravite ölçüleriyle tespit edilmiştir. Boru Hatları İle Petrol Taşıma Anonim Şirketi (BOTAŞ), Azerbaycan Devlet Petrol Şirketi (SOCAR) ile yaptığı sözleşme gereği Tuz Gölü Havza tabanında çözelti madenciliği ile yeraltı kaya tuzunda doğal gaz depolama kavernaları açtırmaktadır. Kullanılan tatlı çözelti suyu Kızılırmak üzerindeki Hirfanlı barajından borularla alınmaktadır. Orta Anadolu’da kloralkali türevleri üreten bir tesis henüz olmadığı için ve çevre kirliliğini önlemek amacıyla kavernadan çıkan tuzlu çözelti suyu Tuz Gölüne salıverilmektedir. Başta Kırıkale petrol rafinerisinin kloralkali türevleri ihtiyaçlarını ithal etmeden karşılaması amacıyla Orta Anadolu’da en az bir kloralkali tesisi kurulmasının zorunlu olduğu düşünülmektedir ve bu tip tesislerin kaya tuzu hammadde yeterliliği ve sürekliliği açısından bir sorunu yoktur.

SOCAR, Tuz Gölü Doğal Gaz Yer Altı Depolama Tesisinin ilk kısmında 12 yeraltı gaz depolama kevarnası (suni mağara) açmıştır. Tam kapasitenin devreye girmesiyle 1,2 milyar metre küp doğal gazın depolanması hedefleniyor. Projenin ikinci bölümünde inşa edilecek 40 kavernada 4,2 milyar metreküp doğal gaz depolanabilecek. Böylece söz konusu iki tesiste, 2023 yılına kadar Türkiye'nin toplam gaz tüketiminin yaklaşık %10'na karşılık gelen 5,4 milyar metreküplük gaz depolanmış olacak. Karadeniz'de keşfedilen 405 milyar metreküplük doğal gazın 2023'ten itibaren Tuz Gölünde depolanacağı Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanı tarafından açıklanmıştır (Ticaret Bakanlığı, Ticaret Araştırmaları Genel Müdürlüğü, 2020).

Kırıkkale Eskikişla köyü civarında Kömür İşletmeleri Anonim Şirketi (KİAŞ)'nin yaptığı her iki karotlu sondajda da yaklaşık 1000m kalın Neojen yaşlı, yatay tabakalı kaya tuzu yatağı kesilmiştir. Burada kaya tuzu yatakları diyapir (dom) yapıları oluşturmaz yastık yapıları oluşturur ve kaverna açılımına uygundur. Türkiye'de Tuz Gölünden sonra kesilen en kalın kaya tuzu yatağıdır. Bu kaya tuzu sahasında açılacak doğal gaz kavernasının atık tuzlu çözelti suyu, kuş uçuşu 45km. mesafede ve daha düşük topografik kotta bulunan Kırıkkale rafinerisine sifon yapılarak borularla gönderilebilir (Şekil 3, Şekil 5 ve Şekil 6) ve nakliyat masrafını ortadan kaldıracığı için Türkiye'nin diğer tuz üreticileriyle rekabet edebilecektir (Özgüner & Kızıldağ, 2014).

Benzer şekilde, Çankırı ve Çorum'da MTA'nın yaptığı karotlu sondajlar 760-362m arası kalınlıklarda yeraltı kaya tuzu yatakları kesmiştir (Sönmez vd., 2011; Sönmez & Aydınadağ, 2017). Özellikle Çankırı'nın güneyinde yapılacak yeni karotlu sondajlarda daha kalın kaya tuzu yatağının kesilmesi beklenir. Bu yörede de çözelti madenciliğiyle açılacak doğal gaz kavernalarından çıkan atık tuzlu sular, deniz seviyesinde kurulacak Samsun petrol rafinerisine boru hattıyla sifon yapıp gönderilebilir ve çevre kirliliği de önlenir (Şekil 3). Nakliyat masrafı olmadığı için diğer tuz üretimleriyle rekabet edilebilir. Zengin ve çok kalın yeraltı kaya tuzu yataklarına sahip Orta Anadolu'da birkaç klor-alkali üretim tesisinin kurulmasına ihtiyaç vardır.

Kimya endüstrisinin su tüketimine yoğun bağımlılığı ve soğutma işlemleri, atık su boşaltma ihtiyacı nedeniyle, tesislerin konumları genellikle denize ve su kaynaklarına yakın olarak gerçekleşmektedir. Önerilen Samsun petrol rafinerisi, soğutma tesisleri ve gerekirse tankerlerle petrol nakliyatı açısından denizden yararlanabilecektir. Yeraltı kaya tuzu yatağında doğal gaz depolama kavernalarının çözelti madenciliği ile açılması için debisi yüksek Kızılırmak nehri ve üzerindeki baraj göllerinden yararlanılabilir. Ayrıca, Orta Anadolu'da Kızılırmak, Sakarya ve Yeşilirmak kolları üzerinde yapılması muhtemel olan baraj gölleri önemli fırsatlar sağlar (Şekil 3). Çok büyük rezervlere sahip ve yeni keşfedilen Orta Anadolu kaya tuzu, trona, tenardit yataklarının (Tablo 1) çözelti madenciliği ve boru hatlarıyla kimya komplekslerine taşınabilme imkanı vardır ve hammadde temin sürekliliği açısından önemlidir.

Ankara Beypazarında 200 milyon ton rezervli %87 tenörlü trona veya soda (Na_2CO_3) yatağı 123m-450m derinlikleri arasında yer almakta olup Eti Soda-Park holding ortaklığında işletilmektedir. Ankara Kazan ilçe sınırlarında çok zengin yeni trona yatakları bulunmuş olup (Tablo 1) her birinin birincil ve ikincil kimyasal madde üretiminde yaygın kullanımı söz konusudur. Soda; ayrıca cam, petrokimya, sabun ve deterjan, kağıt hamuru, metalürji, su arıtımı, tekstil, seramik, gübre, endüstriyel atıkların temizlenmesi, deri tabaklanması ve fotoğraf sanayilerinde kullanılabilir. Ankara Beypazarı'ndaki zengin ve kalın soda yatağı, Eti Soda-Park Holding tarafından çözelti madenciliğiyle işletilmekte olup boru hattıyla Kırıkkale rafinerisine taşınabilir (Şekil7).

Ülkemiz, yaklaşık 40 çeşit sodyum türevli kimyasal maddeyi ithal etmektedir. Orta Anadolu kimyasal tuz yataklarının çözelti madenciliği ile işletilmesi ve boru hatlarıyla taşınması için yatırımlar artırılıp kimya sektörümüzde sodyum türevli tuzların yurt içinden karşılanması sağlanmalıdır. Kimya sektöründe sodyum sülfat tuzu büyük miktarlarda tüketilir. Bu zamana kadar Orta Anadolu Bolluk, Tersakan ve Acı göllerinde sodyum sülfat üretimi mevsimsel yapılmaktadır ve göllerde doğal dengenin bozulması halinde üretimler olumsuz yönde etkilenebilir. Ülkemizin deterjan, cam, tekstil, kağıt üreten kuruluşları sodyum sülfat tüketimlerinin %80'ni maalesef ithal yoluyla karşılamakta ve yıllık ithalat artış oranının %20 civarında olduğu tahmin edilmektedir. Diğer taraftan SODAŞ, ALKİM, KROMSAN ve OTUZBİR KİMYA şirketleri, ürettikleri susuz rafine sodyum sülfatı ihraç ederler. Ham sodyum sülfat cevheri veya tüvanan üretimlerin ithalat ve ihracatı yoktur. Nötr tuz olan sodyum sülfat higroskopik özellikte olmamalı, pH değeri 8 olmalıdır. Bunun dışında doğal sodyum sülfatlarda pH 8 iken, sentetiklerde pH 5.6 civarındadır. Bu nedenlerle sentetik sodyum sülfat, cam ve deterjan sanayilerinde kullanılamaz KROMSAN'ın sentetik sodyum sülfat yan ürünü, doğal kaynaklardan üretilenlerden daha ekonomik olmakla beraber asidik olmasından ötürü dezavantajlar taşır (DPT. 8. Ö.İ.K. Raporu, 2001).



Kırıkkale Tatlıcak köyü kaya tuzu mostrası,
Pafta no.İ32-a4, Y: 585750, X: 4408200, Z: 715



Kırıkkale Eskiğişla Köyü Pafta no. İ31-b3,
KİAŞ Tuz Ocağı Y: 585150, X:4402850, Z:720.



Kırıkkale Eskiğişla Köyü Pafta no. İ31-b3,
EFTA Tuz Ocağı Y: 585259, X:4404640, Z:707.



Kırşehir, Çiçekdağ, Çiçekli Köyü Kaya tuzu mostrası,
Pafta no.İ32-a4, Y:592625, X:4402675,Z:720



Yozgat Yerköy Sekili kaya tuzu ocağı
Pafta no. İ32-d2, Y:606500, X:4396700, Z: 730



Kırşehir Çiçekdağ Tepecik Safir Şirketi tuzlası.
Pafta no.İ32-c1, Y:609851, X:4395032, Z:736.



Yozgat Yerköy Sekili kaya tuzlası.
Pafta no. İ32-d2, Y:606500, X:4396700, Z: 730

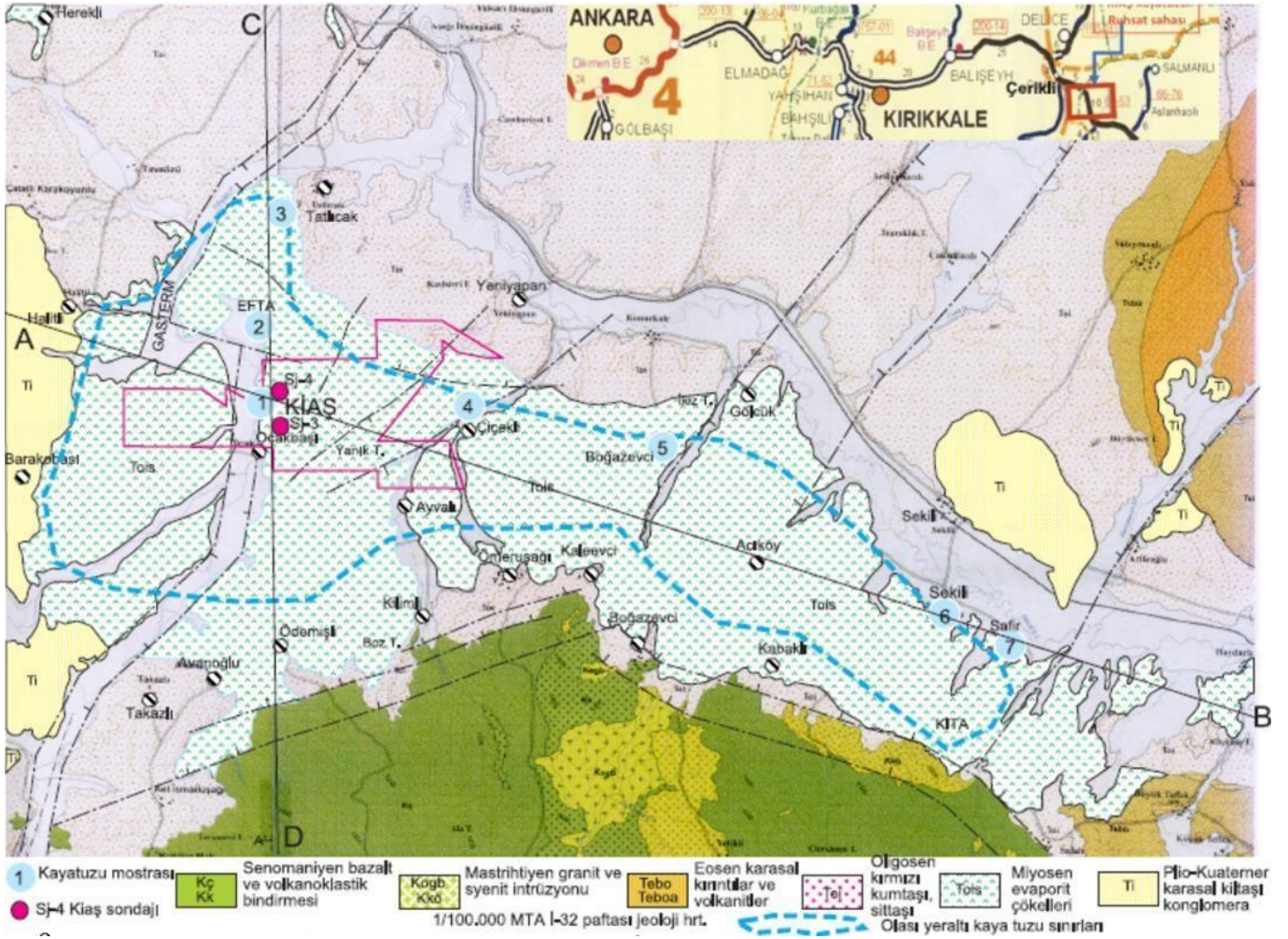


Kırşehir Boğazevci köyü kaya tuzu mostrası.
Pafta no. İ32-d2, Y:597300, X:4395950, Z:930

Şekil 5. Kırıkkale Tatlıcak ve Yozgat Sekili arası Neojen tortul havzası yeraltı kaya tuzu mostraları, fay zonlarında açığa çıkmış olup lokasyonları Şekil 6'daki haritada mavi noktalarla gösterilmiştir (Özgüner vd., 2019).

MTA Genel Müdürlüğü, son 6 sene içinde yaptığı sondajlarla Ankara Polatlı'nın KB'da toplam 1,867 milyar ton %37 tenörlü ve ortalama 80m kalın yeraltı tenardit (Na_2SO_4) yatağı rezervi bulmuştur. Ülkemizde çözelti madenciliği ile yeraltı sodyum sülfat tuzu üretim imkânı doğmuştur (Kırtıl vd., 2019; Kırtıl vd., 2019) (Şekil 7). Son yıllarda yurt içi (Na_2SO_4) tüketimini ve ulusal kimya sanayiinin ihtiyaçlarını karşılayacak, ithalatı durduracak imkanlar oluşmuştur. Ankara Beypazarı Çayırhan'da MTA tarafından bulunan yeraltı globerit tenardit yatağını randımanlı işletebilmek için çalışmalar sürdürülmektedir.

Gastem Madencilik şirketi de son bir yıl içerisinde MTA sahasının kuzeydoğu ve doğu bitişiğinde sondajlar yapmış ve Polatlı Yeniköşeler ruhsatında açılan karotlu sondajlara ait verilerin analiz sonuçları bilgisayar destekli üç boyutlu kaynak modelleme (SURPAC) çalışmalarında değerlendirilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda ortalama **%73,32 Na_2SO_4 tenörüne sahip 360,21 milyon ton kaynak/rezerv** varlığı belirlenmiştir. Çözelti madenciliği yöntemi ile üretimi uygun olan tenardit yatağından toplamda 234,13 milyon ton sodyum sülfat kaynağı/rezervi kullanılabilir (Tablo 2). Polatlı-Yeniköşeler sahasında yeraltının 126-405 m derinlik aralığında bulunan bu zengin tenardit yatağı, 32°C sıcaklıkta su kullanılarak çözelti madenciliğiyle eritilip, artıldıktan sonra Kırıkkale ve önerilen Samsun petrol rafinerilerine veya diğer kimya tesislerine boru hatlarıyla taşınması mümkündür (Şekil 7). Ayrıca söz konusu rezervlerin bir kısmı polisülfat ($\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) yatağı olup yapay gübre olarak doğrudan toprakta kullanılabilir (Murat vd., 2020).



Şekil 6. Kırıkkale Çerikli – Yozgat Sekili arası jeolojik harita. Bu Neojen evaporit havzasında KİAŞ'ın yaptığı sondajlar 1000m kalın yeraltı kaya tuzu yatağı kesmiştir. Mavi noktalar, Şekil 5'deki kayatuzu mostra fotoğraf lokasyonlarıdır. Sağ üst köşede kırmızı dikkörtgenle belirtilen saha lokasyonuna karayolu ulaşımı gösterilmiştir (Özgüner & Kızıldağ, 2014).

Tablo 2. Gasterm AŞ Polatlı Yeni Köşeler sahası tenardit yatağı cevherinin ortalama kimyasal analizi (Murat vd., 2020).

Litoloji	A.Z. %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	K ₂ O %	Cl %	Li (ppm)	SO ₃ %	Na ₂ O %	NaSO ₄ %	Kaynak / Rezerv (m.ton)
Yüksek Tenardit Zonu	3.72	3.49	0.87	0.30	5.92	5.29	0.53	0.32	26.75	47.83	30.38	78.21	273.63
Düşük Tenardit Zonu	7.64	7.42	1.73	0.64	11.20	9.22	1.59	0.47	51.35	40.22	17.60	57.82	86.67
Orta değer	4.66	4.44	1.08	0.38	7.19	6.24	0.79	0.35	32.66	46.00	27.32	73.32	360.21

Etimaden'e ait Kütahya'daki borik asit tesisinin mevcut kapasitesi 2011 yılında önemli ölçüde gelişmiştir ve şu anda yeni tesisler inşa edilmektedir. Bor mineral alaşımları; cam elyaf, silikat camları, metal ve plastiklerin mukavemetini önemli ölçüde artırır ve rüzgar pervaneleri, uzun köprüler ve yüksek inşaat malzemeleri yapımında kullanım oranları artmaktadır. Bor, güneş enerjisi ve nükleer enerji üretiminde de kullanılmaktadır (Erceber, 2020). Orta Anadolu-Orta Karadeniz kimya kümeleneğinde borik asit ve türevlerinden katma değeri yüksek petrokimyasal ürünlerin elde edilmesi mümkündür. Bölgede petrokimya için sürdürülebilir kimyasal tuz rezervleri bulunmuş olup tuz yataklarının madencilik, üretim, zenginleştirme ve boru hatlarıyla nakliyat projeleri ve teknolojileri geliştirilebilir.



Şekil 7. Önemli trona (Na_2CO_3) ve tenardit (Na_2SO_4) yatakları rezervlerinin lokasyonları Kırıkkale ve önerilen Samsun petrol rafinerilerine yakındır. Bu kimyasal tuzlar, çözeltili madencilik ve boru hatlarıyla kimya tesislerine taşınabilir (T.C. karayolları haritası).

2.3 Kümelenme; tesisler arası işbirliği, maliyetlerin düşürülmesi ve piyasa rekabetinin sağlanması ile oluşur

Mavi Akım ham petrol hattının Samsun limanına bağlanması ve burada öngörülen petrol rafinerisinin kurulması ve bölge kimyasal tuz yataklarının çözeltili madencilik ile işletilip kurulacak kloralkali tesislerine hammadde sağlaması; kimya kümelenmesinin gelişmesi için çok büyük önem taşır. İnovasyon projelerinin birbirine yakın diğer endüstri sektörleriyle işbirliği gerçekleştirmesi sonucu, bölgede kimya sektörü maliyetlerinin düşürülmesi, ürün çeşitliliği ve katma değer artırılması sağlanabilir.

Bölgede yer alan Zonguldak kok kömürü, çelik üretiminde demiri kükürt gibi zararlı maddelerden temizler (Şekil 8) ve fırınlarından elde edilen amonyak gazı yan ürünü; nitrik asit, amonyak tuzları ve amonyum sülfat gübresi üretiminde kullanılır. Kömür; alümina rafinerilerinde, kağıt üretiminde, kimyasal ve ilaç endüstrilerinde ve rafine kömür katranı ise; kresot yağı, naftalin, fenol ve benzen gibi kimyasalların üretiminde kullanılır. Sabun, aspirin, çözeltiliciler, boyalar, plastikler, rayon ve naylon gibi iplikler kömür ürünü bileşenlerdir. Kozmetik ve ilaç etken maddeler kömürden türetililecek olan kimyasallardır (Taşkömürü sektör raporu, 2015).

Kırıkkale ilinde savunma sanayi, petrol ve petrol ürünleri, metal işleme ve üretim, mobilya sektörleri öne çıkmaktadır. Kırıkkale metal sektöründe 54 adet firma faaliyet gösterir. Kırıkkale’de Makine Kimya Endüstrisi Kurumunun (MKE) 5 adet fabrikası bulunmaktadır. Mühimmat fabrikası kimyasal üretimi yapan bir sektördür (Kırıkkale Tic. ve Sanayi Odası, Sektör Analizleri Rap., 2017) (Şekil 8).

Karabük demir-çelik fabrikası; Kırıkkale-Çankırı-Zonguldak kara yolu üzerinde yer alır. Karabük demir çelik fabrikası ile Kırıkkale ve Çankırı silah fabrikalarının kimyasal ara mamullere duyduğu ihtiyaçlar Kırıkkale petrol rafinerisi tarafından karşılanmaktadır (Şekil 8). Kırıkkale - Samsun karayolu üzerinde yer alan Çorum’un (Şekil 3) sanayisi özel sektör ağırlıklı olup petrokimya yan üretimleri için önemli bir potansiyele sahiptir. Zonguldak Ereğli ve Karabük Demir Çelik Fabrikalarına yakın olması, savunma yan sanayisi üretimleri için potansiyel oluşturur (Şekil 8).

Samsun’da lastik ve plastik eşya sanayinde üretim faaliyetlerini sürdüren toplam 40 fabrika vardır. Doğu Karadeniz’in çeşitli yataklarından çıkartılan bakırlı pirit cevherinden Samsun’da sülfürik asit ve bakır üretilmektedir. Fabrika sülfürik asitten ortalama 250-300 bin ton/yıl suni gübre üretir. Samsun’da ilaç üreten Adeka İlaç Sanayi bulunur (Samsun İli Mevcut Durum Raporu, 2019). Bakır, bentonit ve perlit gibi madenleri işleyen ve kimyasal madde üreten Kastamonu ve Çankırı bölgesi, kimya sektöründe gelişme gösteren illerden olmaya namzettir ve Samsun’a yakındır.

Kimya ekosisteminin kurulması amacıyla her tesis sonraki süreçlerde yeni yatırımlara yönelik olarak genişleme alanları ayırır. Kümelenmeyi oluşturan şirketlerin; yardımcı işletmeler, boru hatları, onarım ve bakım hizmetleri, toplumsal alanlar gibi ortak bir bölgede çalışmasıyla maliyetler düşürülmüş ve rekabette başarı sağlanmış olur. Kimya kümelerinde üretici firmalar aynı bölgede olması sebebiyle nakliye, itfaiye ve restoran, ortak atık su arıtma, buhar, de-iyonize su tesisi gibi ortak kullanımlardan %10-15 arasında maliyet tasarrufu sağlanabilir (Erceber, 2020).

Kümelenme işbirliği ile maliyet düşürülmesi, zamandan tasarruf, ürün çeşitliliği ve rekabet başarısı sağlanmış olur



Şekil 8. Türkiye Çelik Haritası (Ahiler Kalkınma Ajansı, 2017).

2.4 Kümelene liman, demiryolu, karayolu, havayolu ve enerji nakil hatları gibi altyapı hizmetleri gerektirir

Hammaddeye düşük maliyetli ulaşım, kimya endüstrisinde rekabetçiliği kolaylaştırır. Piyasalara yakınlık ve hammaddeye kolay ulaşılabilirlik, firmaların ulaşım maliyetlerini azaltmasına ve hızlı bir şekilde mamul ürünlerini daha düşük fiyatlarda müşterilerine sunmasına yardımcı olur. Özellikle dayanıksız, oldukça kırılabilir veya çok ağır ürünler için firmaların konumlandıkları yerde hazır bir piyasanın ve hammaddenin bulunması istenir. Kimya ürünlerinin önemli bir kısmı nispeten büyük hacimli olduğundan ve tehlikeli kimyasal maddelerin taşınmasındaki zorluklardan dolayı, imalatçılar hedef piyasalarına yakın bir yerde bulunmayı ister. Kimya firmalarının petrol rafinerilerinin yakınında kümeleneği geniş çapta tercih edilir (Sektör Stratejilerindeki Mekânsal Boyutum Güçlendirilmesi, 2016). Kimya sektöründe hammaddenin uzak olduğu yerlerden boru hatları ile nakliyat tercih edilmektedir (Şekil 3).

Orta Karadeniz sahilinde bulunan Samsun ve Zonguldak limanlarıyla dış ülkelerle ticarete nakliyat kolaylığı sağlanır. Kırıkkale'ye en yakın olan Zonguldak ve Samsun limanları, Türkiye'nin uluslararası limanı olma özelliğine sahiptir. Her ikisi de ithalat, ihracat ve transit taşımacılığında demiryolu vagonlarına yükleme boşaltma hizmetleri vermektedir. Türkiye ile Rusya arasında Samsun sanayi rıhtımında bulunan Kavkaz demiryolu feribot hattı vasıtasıyla demiryolu taşımacılığı yapılmaktadır. Rus vagonlarının bojipleri bu tesiste değiştirilerek Devlet Demir Yollarının (DDY) uygun gördüğü hatlara gidebilmektedir. Karadeniz sahil yolu ve Samsun, Zonguldak demiryolu hatları ile getirilen yüklerin, liman terminal sahalarında, Rus vagonlarına aktarılması sağlanmaktadır. Ayrıca, Kırıkkale-Çorum-Samsun demir yolunun projeleri tamamlanmak üzere olup projeler tamamlandığında yatırım programına alınıp, inşaatına başlanacağı belirtilmektedir. Merzifon' da havaalanı olması bu güzergâha daha büyük bir işlevsellik katmaktadır (Samsun İli Mevcut Durum Raporu, 2019). Samsun-Sivas demiryolu 2019 yılında hizmete girmiştir. Kırıkkale ile Samsun ve Zonguldak limanları arasında yeterli kara yolu vardır. Zonguldak limanı-Kırıkkale arasında demiryolu mevcut olup 170km mesafededir. Samsun-Kırıkkale tren yolunun Çorum'dan geçmesiyle önemli bir hammadde ve ürün nakliyat imkanı sağlanmış olacaktır (Şekil 3, Şekil 9).

Entegre Filyos Vadisi Projesi kapsamında, büyük bir liman, serbest bölge ve ihtisas Organize Sanayi Bölgesi (OSB) inşaatına Zonguldak ilinde 2014 yılı itibariyle başlanmıştır. Bu mega projenin, (Zonguldak, Karabük ve Bartın) bölgesinin ekonomik kalkınmasını desteklenmesinde ve 40,000'den fazla kişi için istihdam sağlanmasında önemli olacağı ileri sürülmektedir. Yapım aşamasındaki Filyos Vadisi Projesi, özellikle sanayi için ayrılmış büyük ölçekli araziyle beraber liman ve demiryolu bağlantıları içermesiyle, kimya firmalarının talebini karşılamaya yönelik çok önemli bir adım olarak görülmektedir (Sektör Stratejilerindeki Mekânsal Boyutum Güçlendirilmesi, 2016).



Şekil 9. Türkiye'nin mevcut ve projelendirilmiş demiryolu hatları (Journal of Railway Turkey, 2014).

2.5 Kimya kümelenmesinde enerji güvenliliği, ucuz enerji arzı ve verimliliği vardır

Karadeniz'de Türkiye'nin kendi kıta sahanlığında keşfettiği 405 milyar metreküp doğal gazın varlığı son derece büyük bir başarıdır. Bu zamana kadar enerjisini ithal doğal gazdan sağlayan Türkiye'nin Mavi Vatanda gerçekleştirdiği yeni doğal gaz araştırmalarına ümit ve güvenle bakmaktayız. Türkiye'nin 8 yıllık toplam doğal gaz ihtiyacını karşılayabilecek kapasitede olan bu rezervin ekonomik değeri 80 milyar dolardır. Rezervin işlenmesi için Zonguldak Filyos limanında kurulmasına başlanan rafineri tesisinden bölge kimya kümelenmesi enerji ihtiyacının karşılanabilme imkanı da doğmuştur.

Ceyhan-Kırıkkale ham petrol boru hattı, Mavi Akım Samsun-Kırıkkale doğal gaz ve müstakbel ham petrol boru hatları ve TANAP doğal gaz enerji boru hattı kümelenme bölgemizden geçer (Şekil 3). Elektrik ihtiyacı, doğalgaza dayalı kojenerasyon tesisinden, Kızılırmak üzerindeki hidroelektrik santralından, güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından da sağlanabilir (Şekil 3). Türkiye'de yenilenebilir enerji alanında izlenen hızlı gelişmeyle bölgede çevre dostu yeni enerji kaynaklarına da ulaşılabilecektir. Sinop'ta kurulması planlanan nükleer elektrik santrali, toplam 4.480MW kapasiteye sahip olacaktır. Uranyum ile birlikte % 20-30 toryum yakıtını da kullanan Canada Deuterium Uranium (CANDU) tipinde olması teklif edilmiştir (Nuclear News, 2012). Türkiye, dünyanın 2. büyük toryum rezervlerine sahip olmakla beraber, henüz tamamen toryum yakıtı kullanan ticari nükleer santral yoktur, fakat araştırmalar devam etmektedir. Sinop nükleer elektrik santralının tesisi için halen dış ülkeler ile temaslar sürdürülmektedir. Orta Karadeniz-Orta Anadolu kimya kümelenmesinin tüm elektrik ihtiyaçlarını tek başına karşılayabilecek kapasitededir. Nükleer santraller, yüksek soğutma suyu ihtiyacını karşılamak ve radyoaktif malzemenin kolay taşınabilmesi için deniz kenarlarına kurulmakta, ve deprem riskinin düşük olduğu yerler seçilmektedir.

Biyogaz bünyesinde %50-70 metan (CH₄) bulundurduğu için yanıcı ve enerji üreten bir gazdır. Bölgede lokal tesislerde üretilen biyogaz, meskun yerlerin enerji temininde ve ısıtılmasında kullanılarak sanayinin elektrik harcamalarına dolaylı olarak katkıda bulunabilir.

Ülkemiz petrol, doğal gaz gibi enerji kaynakları açısından dezavantajlı olması nedeniyle, enerji yoğun sektörlerin sürdürülebilir üretimleri güçleşmektedir. Firmaların rekabet güçlerinin desteklenmesi amacı ile, elektrik, doğal gaz v.s gibi enerji giderleri üzerindeki ek maliyetlerin düşürülmesi amacıyla enerji fiyatları yeni teşviklerle desteklenebilir. Avrupa'da PVC gibi enerji yoğun ürünlerde tüketilen elektrik bir ölçüde düşük fiyatlarla teşvik edilmektedir. Benzer uygulamaların ülkemize de getirilmesi sektöre yapılacak yatırımları artırabilir (Kimya Sanayi Çalışma Grubu, 2018).

2.6 Kümelenede çevre kirliliğini önleyen ve atık yönetimini sağlayan teknolojik önlemler uygulanır

Çevre kirliliğinin önlenmesi, atıkların kontrolüne ve atıklardan mamul madde üretimine dayanır. Kimyasal atıklar, canlıları ve cansız maddeleri de zararlı yönde etkiler. Kurulacak kimya tesislerinin çevre kirliliğine sebep olmaması için önlemlerin planlanmasına ihtiyaç vardır. Mümkün olan en iyi teknolojiyi kullanarak kimyasal faaliyetlerden ve ürünlerinden kaynaklanabilecek çevresel etkileri minimize etmek, atık üretimini en aza indirmek için gerekli tedbirler almak, doğal kaynakları korumamızı sağlar (Erk, 2015).

Plastiklerin geri dönüşümü ülke çapında mutlaka desteklenmeli ve geliştirilmelidir. Nafta hammaddesi darboğazı çeken ülkemizde plastik atık ithalatlarının kontrolü konusunda Ticaret Bakanlığı ve Çevre ve Şehircilik Bakanlığı gerekli alt yapıyı kurabilir. Ancak geri dönüştürülmüş plastik hurda ve atıkların kontrolsüz olarak ithalatı engellenmelidir (Kimya Sanayi 11. Kalkınma Planı, 2018).

2.7 Kümelenede nitelikli iş gücü, Ar-Ge kapasitesi ve inovasyon ile yatırımcı güveni kazanılır

Firmaların ihtiyaç duydukları becerileri bulamaması, kalkınmanın önünde büyüyen bir engel olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sorun, politika yapıcılar arasında daha belirgin hale gelmektedir. İşgücü piyasasının kötü işlemesi, özellikle eğitim sistemi ile üretici sektörler arasındaki uyumsuzluk – dünya genelinde yapılmış işletme anketleri sonuçlarında görüldüğü üzere- birçok bölge ve sektörde belirgindir (Sektör Stratejilerindeki Mekansal Boyutun Güçlendirilmesi, 2016). Normalde Üniversite mezunu bir teknik eleman; üretici bir firmada 5 yıl pratik olarak çalıştıktan sonra uzmanlaşabilir. Bu süreçte para, mevki ve şöhretten önce konusunda uzmanlaşmaya, mesleki becerilerde kendine olan güveni arttırmaya, mesleğini sevmeye odaklanmalıdır.

Petrokimyasallara talebin artarak önemli pazar oluşturduğu ülkemizde tesis edilecek Zonguldak Filyos doğalgaz rafinerisinde maksimum miktar ve çeşitlilikte petrokimyasal üretimi, nitelikli iş gücü, AR-GE kapasitesi ve inovasyonla gelişmiş iş ortamıyla sağlanıp petrokimyasal ve enerji açığı kapatılmaya çalışılabilir.

Ar-Ge çalışmaları; daha ziyade Türkiye’de bol bulunan inorganik kimyasal tuzlar, kimyasal metalikler, zayıf kalorili kömür yatakları, bitkisel ilaç ürünleri üzerinde yoğunlaşarak bu konularda dışa bağımlılıktan kurtulup ihracatçı durumunu kazanmak olmalıdır (Kimya Ürünleri Özel İhracat Daire Başkanlığı Raporu, 2016). Ülkemizde yeraltı sürdürülebilir inorganik kimyasal tuz yatakları rezervleri bulunmuştur. Ancak bu rezervlerin solüsyon madenciliğiyle ülke endüstrisine kazandırılması yöntemleri gelişmemiştir. Ar-Ge çalışmalarına ve teknoloji transferine ihtiyaç vardır.

Kimya sektöründe, daha az hammadde kullanarak ve sermaye harcamalarını azaltarak, mevcut imalat süreçlerindeki etkinliği nasıl geliştirebiliriz diye Ar-Ge hedefleri seçilebilir. Savunma ve metal sanayinin gelişiminde yüksek katma değerli ürün üreten makinaların ithal edilmesi yerine yerli üretimle sağlanması için Ar-Ge çalışmalarına önem verilebilir. Böylelikle bazı parçaların tedarikçisi olan kimya sektörüne de yeni iş imkanları sağlanmış olur.

Son yıllarda MTA Genel Müdürlüğünün yoğun sondaj çalışmalarıyla bulunan yeni linyit rezervleri, mevcut rezervi ikiye katlamış ve ülkemizde yaklaşık toplam 20 milyar ton görünür linyit rezervi tespit edilmiştir. Linyitten termik santrallerde yapılan elektrik üretimi Türkiye enerji ihtiyacının yaklaşık %20’sini karşılamaktadır. Dünyada kalın linyit yataklarını yeraltında yakıp gazlaştırma yöntemleri ile hava kirliliğini azaltan yeni enerji üretim teknolojileri ve bu gazdan petrokimya hammaddesi metanol ve diğer bazı kimyasalları üretmek için pilot AR-GE çalışmaları sürdürülmektedir (Şekil 2).

3. Sonuç ve Öneriler

Kırıkkale petrol rafinerisi, Kırıkkale ve Çankırı savunma sanayi, Karabük ve Zonguldak Ereğli demir-çelik fabrikaları, Zonguldak Filyos doğal gaz rafinerisi ve Taş Kömürü işletmesi, Samsun sülfürik asit, bakır izabe ve gübre fabrikalarının bölgedeki varlığı, Adana-Ceyhan petrol, Mavi Akım ve TANAP doğal gaz nakil hatlarının ve Kızılırmak, Yeşilirmak, Filyos, Sakarya nehirleri ve kollarının bölgeden geçmesi, Karadeniz’de keşfedilen büyük doğal gaz rezervinin ve planlanan Sinop nükleer elektrik santralının sağlayacağı enerji güvenliği, Orta Anadolu kimyasal tuz ve endüstriyel mineral yataklarının sürdürülebilir miktar ve kalitede olması, bölgenin kara ve deniz ulaşım alt yapısının gelişmiş olması, bölge kimya kümeleneşi alt yapısını oluşturan önemli unsurlardır. Kimya endüstrisi ürünleri, diğer endüstri sektörleri üretimlerine % 71 oranında katkıda bulunmaktadır (Şekil 1). İnovasyon çalışmaları ve yatırımcı teşebbüsleriyle kimya kümeleneşi tamamlanıp, uluslararası düzeyde daha rekabet edebilir düzeye ulaşmış olacaktır. Mavi akım ham petrol boru hattının Samsun limanına döşenmesi ve Samsun limanında ham petrolü işleyen rafinerinin kurulması, bölge ve Türkiye organik kimya sektörünün gelişmesi için önemli bir başlangıç olabilir. Türkiye’de toplam 20 milyar ton linyit rezervi tespit edilmiş olup rafine kömür katranı; kresot yağı, naftalin, fenol, metanol ve benzen gibi kimyasalların üretiminde kullanılabilir (Şekil 2).

Bölgenin inorganik kimyasal girdileri olan Kırıkkale Çankırı, Çorum, kaya tuzu (NaCl), Ankara Polatlı sodyum sülfat ve Ankara Kazan, Beypazarı sodyum karbonat yatakları (Şekil 7) zenginliğine ve buralardan solüsyon madenciliğiyle çıkarılabilecek tuzlu suların boru hatlarıyla taşınma verimliliğine dayanan kloralkali türüleri, PVC ve diğer kimyasallar üreten birkaç tesisin kurulmasına ihtiyaç vardır. İnorganik kimyasal tuz yataklarının madencilik, üretim, zenginleştirme ve boru hatlarıyla nakliyat projeleri ve teknolojileri geliştirilebilir. Türkiye’nin tuz üretim ve ticaretinde asıl önemli kaybı, bu tuzlardan elde edilen birincil ve ikincil kimyasal maddelerin

yüksek miktar ve değerlere ulaşan ithalattır. Bölgede petrokimya sanayinde kullanılabilecek malzeme güçlendirici alaşım ve dolgu maddesi olarak, sürdürülebilir miktar ve çeşitlilikte endüstriyel mineral rezervleri vardır (Tablo 1).

Orta Anadolu'nun çok kalın yeraltı kaya tuzu yataklarında doğal gaz ve petrol depolayan kavernaların çözelti madenciliğiyle açılması ve çıkan tuzlu solüsyon sularının kloralkali ve petrol rafineri tesislerinde kullanılması mümkün olduğu gibi çevre kirliliğini önlemek amacıyla sifon yapılıp Samsun'da denize dökülmesi de mümkün olabilir.

Başta raylı sisteme sahip Samsun ve Zonguldak limanları işlevliklerinin ve dış ülkelere ihracat kolaylığının artırılması, daha sonra Trabzon, Sinop, Ordu, Giresun limanlarının işlevliklerinin ve dış ülkelere ihracat kolaylığının zamanla artırılması önemlidir. Bölgenin hava limanları, demir ve karayolu alt yapısının daha da geliştirilmesiyle ham ve mamul madde nakliyatı kolaylaşıp ucuzlayacak ve Karadeniz, Orta ve Doğu Anadolu ve komşu dış ülkelerin kimyasal ürün pazarlarına daha kolay erişim ve daha büyük ihracatlar sağlanabilecektir. Bu kümelenme; mevcut endüstriyel tesislerin eksikliklerini tamamlayan, inovasyonu destekleyen, sektöriyel ağ yapılarını geliştiren ve rekabet üstünlüğünü sağlayan, yeni bir bölgesel kalkınma modeli olabilir.

Kimya Sanayi 11. Kalkınma Planı, (2018) göre; Türkiye'de kimya başarısını etkileyecek faktörler şöyledir:

Türkiye'de petrokimyasallara olan talebin artması nedeniyle Dünyanın diğer üreticileri ve yatırımcıları için cazip pazar oluşturur. Ülkemiz içindeki pazarların ve katma değer kaybılmemesi ve istihdamın sağlanması yönünde kimya sektöründe yeni yatırımların hızlandırılması ve krizlerin başarıyla yönetilmesi gereklidir,

Kimya kümelenmeleri için devlet tarafından yapılan iyi bir stratejik planlamaya ihtiyaç vardır, Rekabetçi Pazar koşullarıyla devlet kontrolünde mücadele edilebilir,

Bölgede Petrokimya ve Kloralkali Endüstrileri için sürdürülebilir kimyasal tuz ve endüstriyel hammadde rezervleri vardır, Bilgiye, araştırmaya ve yüksek katma değerli ürünlerin üretimine dayanan yeni ekonomik atılımların geliştirilmesi için siyasi iradeler büyük gayret gösterebilir,

Sektörün gelişmesi için devlet desteği önem kazanır. Yerli üretimin desteklenmesine yönelik olarak, daha ucuz plastik hammadde temini için ithalatına vergi konulmamalıdır. Yatırım ve üretim maliyetlerini azaltacak teşvikler verilerek yerli üretici korunmalıdır, Türkiye; büyük Avrupa, Afrika pazarlarına ve Orta Doğu, Türk Cumhuriyetleri pazarlarına yakındır ve uluslararası ekonomiler için lojistik merkez konumundadır.

Teşekkür

MTA Genel Müdürlüğü yaptığı karotlu sondajlarda son 7 yılda Ankara Polatlı KD'da ve Çayırhan civarında zengin tenardit (Na_2SO_4) tuzu rezervleri ve 1983 yılında Ankara Beypazarı yakın KD'da zengin trona (Na_2CO_3) tuzu rezervleri bulmuştur. Ayrıca Çankırı ve Çorum'da son 10 yılda çok kalın kaya tuzu yatakları rezervleri saptamıştır. Bu kimyasal tuzlar, Petrokimya Endüstrisinde naftadan sonra en çok kullanılan hammaddelerdir. MTA Genel Müdürlüğünün bu başarılarından ve ülkemiz petrokimya endüstrisine yararlı olan bu hammadde keşiflerinden dolayı teşekkürü görev sayarım.

2012-2015 yılları arası danışman olarak çalıştığım KİAŞ Genel Müdürlüğü, Kırıkkale Eskişehir Köyü civarında gerçekleştirdiği jeofizik SİSMİK ve DES ölçümleriyle ve yaptığı karotlu sondajlarla 1000m kalın kaya tuzu yatağı kesmiştir. Ayrıca kaya tuzundan kloralkali tesisi kurmak için ETİ MADEN Şirketiyle antlaşmalar yapmıştır. Bu yararlı çalışmalarından ötürü KİAŞ Genel Müdürlüğüne şükranlarımı sunarım.

Ankara Polatlı Yeniköseler köyü civarında GASTERM Madencilik Şirketi, 2019-2020 yılında karotlu sondajlarla ortalama %73,32 Na_2SO_4 tenörüne sahip 360,21 milyon ton tenardit tuzu kaynak/rezervi bulmuştur. Bu başarısından dolayı projesinde çalıştığım GASTERM A.Ş. Madencilik Şirketi teknik müdürü sayın Dr. Abdurrahman Murat beye ve araştırmanın finansmanını sağlayan GASTERM Madencilik Şirketinin sahibi sayın İsmet Kılıç beye şükranlarımı sunarım.

Makalenin geliştirilmesinde katkısı bulunan sayın editör ve hakemlere şükranlarımı sunarım.

Referanslar

DPT. Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik ÖİK Raporu, (2001). Kimya Sanayii Hammaddeleri Çalışma Grubu. Raporu, Cilt II "Bor Tuzları, Trona, Kaya Tuzu, Sodyum Sülfat, Stronsiyum". (www.scribd.com ve www.maden.org.tr).

Enerji Tarımı ve Biyoyakıtlar 4. Ulusal Çalıştayı Bildiriler Kitabı, 28-29 Mayıs, 2014, Samsun.

- Erceber, H. (2020). “Türk Kimya Sanayi ve Geleceği”. Pagev Plastik Dergisi, Sayı, 147. (www.turkchem.net ve www.kmo.org.tr ve rh.proquest.com.libraryproxy.griffith.edu.au).
- Erk, E. (2015). “Çevre kirliliği; kimya sanayine ve ekonomiye kronolojik bakış”.
- Ertek, E. (2014). “Türkiye’de kimya sektörü. Ekonomik Araştırmalar”. Türkiye Sanayi Kalkınma Bankası. (www.tskb.com.tr).
- İKMİB sonuç raporu (2013). Temel Kimyasallar Sektörü Gelecek Araştırması Çalıştayı 2015-2023 Hedefler-Stratejiler, T.C. Ekonomi Bakanlığı, İstanbul Kimyevi Maddeler ve Mamulleri İhracatçılar Birliği (İKMİB).
- Has, Z. (2013). Kümelenme teorisi ve Porter elmas modeli. İzmir Ticaret Odası.
- Hobikoğlu, E. H. & Deniz M. H. (2011). Kümelenme Modeli ve Politikaları Çerçevesinde Bilgi Yapılanması ve Rekabet İlişkisi International Conference On Eurasian Economies.
- “Kırıkkale İli Karma Endüstri Bölgesi Fizibilite Raporu” (2018). Kırıkkale Valiliği Bilim, Sanayi ve Teknoloji İl Müdürlüğü, Ahiler Kalkınma Ajansı. (www.tupras.com.tr ve www.ahika.gov.tr).
- Kırıkkale Ticaret ve Sanayi Odası, Sektör Analizleri Raporu (2017). Türkiye Çelik Haritası (2012) Ahiler Kalkınma Ajansı.
- Kırtıl, M., Çolak, A., Kocaharzen, A. & Kırbaş, H. (2019) Ankara-Polatlı Yöresindeki S:201700027 (ER: 3351092) No’lu IV. Grup Ruhsat Sahasının Buluculuğa Esas Ek Raporu “Polihalit Cevherine Ait Maden Jeolojisi ve Kaynak Tahmini Maden Jeolojisi Raporu”. Maden Tetkik ve Arama Genel. Md. Derleme Rap. No.13780 (yayınlanmamış).
- Kırtıl, M., Kocaharzen, A. & Kırbaş, H. (2019). “Ankara-Polatlı Yöresindeki S:201700027 (ER: 3351092) No’lu IV. Grup Ruhsat Sahasının Buluculuğuna Ait Maden Jeolojisi ve Kaynak Tahmini Raporu”, Maden Tetkik ve Arama Genel.Müdürlüğü, Derleme Rap. No. 13771 (yayınlanmamış).
- KİAŞ-ETİ MADEN ortak kimyasal değerlendirme projesi raporu, (2014). “Kırıkkale Delice Tuz Madeni Değerlendirme Projesi (kaverna - klor alkali - PVC üretimi)”, Kömür İşletmeleri – Eti Maden İşletmeleri, (yayınlanmamış).
- Kimya Sanayi 11. Kalkınma Planı (2018). Kimya Sanayi Çalışma Gurubu “On birinci Kalkınma Planı (2019-2023)”. T.C. Kalkınma Bakanlığı. (es.scribd.com).
- Kimya Ürünleri Özel İhracat Daire Başkanlığı Raporu, (2016). T.C. Ekonomi Bakanlığı İhracat Genel Müdürlüğü.
- Küçüker, C. (2012). Endüstriyel Kümelenme Yaklaşımları: Bir Değerlendirme.
- Murat, A., Özgüner, A. M., Karaca, O., Kardelen, M. A. & Kuru, G. S. (2020) “Türkiye, Ankara, Polatlı-Yeniköşeler Sodyum Sülfat Ruhsatı Kaynak/Rezerv Ön Arama Teknik Raporu”, GASTERM Madencilik AŞ. Ankara (yayınlanmamış).
- Nuclear News, June 2012. “Candu Energy signs MOU for second nuclear plant”.
- Öcal, T. & Uçar, H. (2011). Kümelenmelerde Yapısal Değişim ve Rekabet Gücü.© Sosyal Siyaset Konferansları, Sayı: 60, 2011/1, s. 285–321. <http://www.iudergi.com/tr/index.php/sosyalsiyaset>.
- Öğütçü, M. (2002). “FDI and Regional Development: Sharing Experiences from Brazil, China, Russia and Turkey”, paper presented at the OECD International Conference on Regional Development ve FDI, Fortaleza, Brazil.
- Özgüner, A. M. & Kızıldağ, İ. (2014). “Kırıkkale-Sekili Evaporit Havzasındaki Kayatuzu Yatağının Jelolojik Etüdü ve Doğalgaz Depolama İmkanlarının Araştırılması” Kömür İşletmeleri Anonim Şirketi (KİAŞ), (yayınlanmamış).
- Özgüner, A. M., Murat, A. & Kabaoğlu M., (2019). ”Kırıkkale Delice Halitli Köyü Yöresi Yeraltı Kaya Tuzu Yatağı Ruhsat Sahasının Ön Etüt Raporu”, GASTERM Madencilik AŞ. Ankara (yayınlanmamış).
- Porter, M. E. (1998). “Clusters and the New Economics of Competition”, Harvard Business Review.
- Railway map of Turkey, (2014). Journal of Railway Turkey.

Samsun İli Mevcut Durum Raporu, (2019). Samsun Yatırım Destek Ofisi, Orta Karadeniz Kalkınma Ajansı. (dergipark.org.tr ve www.samsunport.com.tr).

Sönmez, İ., Erdoğan, & Kırbas, (2011). “Çorum Bayat, yukarı Emirhalil AR: 200805561 no.lu ruhsat sahasının buluculuğa esas maden jeolojisi raporu”. MTA Derleme Rapor no.11977 (yayınlanmamış).

Sönmez, İ. & Aydındağ, A. K. (2017). “Çankırı Çorum Havzasında Halit (NaCl), Gliberit (Na₂Ca(SO₄)₂) ve Blodit (Na₂Mg(SO₄)₂.4H₂O) Oluşumları”. MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, vol. 23, 13-26 (yayınlanmamış).

Taşkömürü sektör raporu, (2015). Türkiye Taşkömürü Kurumu.

T.C. Ticaret Bakanlığı, Ticaret Araştırmaları Genel Müdürlüğü, (2020). [neftegaz](http://neftegaz.gov.tr) web sitesi.

Tenekeci, Ö., Şener, F., Evin, E., Aslan, İ., Kayakıran, S., Telek, E., Has, F., Özden, M., Nal, S., Özoğuz, A. & Aydın, A. E. (1983). Ankara Beypazarı Trona Yatağı Ara Değerlendirme Raporu. Ankara: MTA. Derleme no. 7321. (yayınlanmamış).

The Competitiveness Institute (TCI), 03.04.2020.

Toprak, V. & Rojay, B. (2001). “Final Report of Geological Investigation in Kazan Soda Project Area, Ankara”, for: Rio- Tinto Mining Company ODTÜ-AGÜDÖS 00.03.09.02.00.12 April (yayınlanmamış).

Türkiye Çelik Haritası (Ahiler Kalkınma Ajansı, 2017).

Türkiye'nin Sektör Stratejilerindeki Mekansal Boyutun Güçlendirilmesi, (2016). Türkiye'de Bölgesel Rekabet Edebilirliğin Geliştirilmesi. Avrupa Birliği İktisadi İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı (OECD) , Publishing, Paris.

Türkiye (Ulusal) Kimya Sektörü Strateji Belgesi ve Eylem Planı (2012), T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi Genel Müdürlüğü.

Zukunft, W. (2020). Raw Material Base of the Chemical Industry. Verband Der Chemischen Industrie (VCI) e.V. Vinyl Chloride Monomer (VCM) Chemical Economics Handbook, May 2019.



Yoğunlaştırılmış Bütünleşik Işınım Ayrıştırımlı PV/T Sistemlerinin Enerji ve Ekserji Analizi

Energy and Exergy Analysis of Concentrated PV/T Systems with Beam Splitting

Ömer Resuloğulları¹ , Ali Erişen² 

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

²Ostim Teknik Üniversitesi, Ostim, Yenimahalle, Ankara, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 14/02/2022

Kabul/Accepted: 27/05/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Güneş enerjisi sistemlerinde, en yüksek teknoloji ve maliyet değerine sahip olan fotovoltaik modüllerin kullanımı söz konusudur. Bunların etkin ve yoğun kullanılması için önerilen yöntem, yutulmuş tabakası aracılığıyla ışınım ayrıştırımlı PV/T sistemleridir. Bu çalışmada, sistem parametrelerinden, yutulmuş ünitesi kalınlığı, akışkan debisi ve ışınım şiddeti değişimlerinin sisteme olan etkileri incelenmiştir. Sırasıyla, yutulmuş ünitesi kalınlığının artırılmasıyla fotovoltaik modüle ulaşan ışınımın daha yüksek verimde elektrik üretimi, akış debisinin artırılmasıyla sistemde ekserji artışı sağlanabileceği belirlenmiştir. Ayrıca, ışınım şiddetinin artırılmasıyla da, sistemde ısı kazanımlarının ve dolayısıyla bu kazanımlara dayalı ekserji artışlarının olabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Işınım Ayrıştırma, Optik Analiz, HAD Analizi, Yoğunlaştırılmış Fotovoltaik”

Abstract

The effects of the changes in absorption unit thickness, fluid flow rate and radiation intensity parameters of the Radiation decomposition PV/T systems are examined through the absorption layer, which is recommended for the effective and intensive use of photovoltaic modules, which have the highest technology and cost value in solar energy systems. It has been shown that radiation can provide higher efficiency electricity production. It has been determined that exergy production can be increased in the system by increasing the flow rate.

Key Words

“Beam Splitting, Optical Analysis, CFD Analysis, Concentrated Photovoltaic”

1.Giriş

Birincil enerji kaynağı olarak kullanılan fosil yakıtların gelecekte kısıtlı potansiyellerinden dolayı enerji ihtiyacını karşılayamayacağı ve sebep oldukları çevresel zararlardan dolayı daha temiz ve sürdürülebilir enerji sistemlerine yönelim olduğu görülmektedir. Tüm enerji sistemleri içerisinde, Güneş Enerji Sistemleri (GES), çevre dostu olmaları ve sürdürülebilirlik açısından öne çıkmaktadır. Isıl Güneş enerji sistemleri evsel, tarım ve endüstriyel alanlarda kullanılmakta olup günümüzde yaygın kullanım amacı evsel sıcak su ihtiyacını karşılamaktır. Elektrik üreten Güneş enerji sistemleri ise şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız olarak elektrik ihtiyacını karşılamak için kullanılmaktadır. Yarı iletkenlerin Güneşten gelen fotonların enerjilerini yutarak akım oluşturması esasına dayalı çalışan fotovoltaik enerji sistemlerinin günümüzde ticari ürün verimleri % 24 ile sınırlı olup; laboratuvar koşullarında % 48 elektrik dönüşüm verimlerine ulaşılmıştır. Yeryüzünde birim alana (m^2) düşen ışınım şiddetinin 1065 W ile sınırlı olması sebebiyle birim enerji dönüşüm alanından alınabilecek enerji miktarı kısıtlıdır. Yoğunlaştırılmış ışınım kullanan Güneş enerji sistemlerinde, yansıtıcı veya kırıcı optik eleman aracılığıyla, enerji dönüşüm alanına daha fazla ışınım düşürme amaçlanmakta olup; yoğun ışınım, fotovoltaik dönüşümde oluşacak akımı arttırmasının yanı sıra açık devre voltajını da arttırarak sistem verimini arttırmaktadır. Diğer taraftan yoğunlaştırılmış ışınımın fotovoltaik modül sıcaklığını arttırarak sistem verimini düşürdüğü bilinmektedir. Bu problemin çözümü için önerilen fotovoltaik modülün arka yüzeyinden su ile soğutma kanalı yerleştirilmesi, fotovoltaik modül sıcaklığını düşürerek elektrik üretim verimini arttırabileceği gibi, soğutma için kullanılan suda depolanacak ısı enerji, sistemde faydalı hale getirilebilir. Bu soğutma sistemine ek olarak, fotovoltaik modülde akım üretme potansiyeli olmayan uzun dalga boylu düşük enerji kapasiteli ışınım, modülde sıcaklık artışını engelleyecek şekilde, modüle ulaşmadan yutulurken, ısı sistem faydası sağlanabilir. Fotovoltaik modülün soğutulmasını ve uzun dalgaboylu ışınımın yutulmasını sağlayacak bileşenleri kapsayan sisteme ait, enerji ve ekserji anaizi bu çalışmanın konusunu oluşturmaktadır. Literatürde rastlanan benzer çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Bergene T. ve Lovvik OM., (1995) PV/T sistem performansını, sayısal ısı transfer modeliyle belirlemiş oldukları çalışmada Duffie JA. ve Bechman WA., (1991) düz güneş enerjisi toplayıcılarını da kapsayan analizler yapmışlardır. Toplam sistem verimlerinin % 60 ile % 80 arasında değiştiğini göstermişlerdir.

Ji J. ve arkadaşları (2007) dış ortam şartlarında alüminyum alaşım ısı değiştirici kullandıkları PV/T sisteminde panel sıcaklığının düşmesiyle elektrik veriminin arttığını gösterdikleri çalışmada, dış ortam koşullarında % 45 ısı ve % 10 elektrik verimliliklerini ve suyun panel altından çıkış sıcaklığını 28 °C olarak ölçmüşlerdir.

Hatwaambo ve arkadaşları (2008) düşük yoğunluklu fotovoltaik sistemin performansının, yarı dağınık olarak haddelenmiş yansıtıcı elemanlar kullanılarak geliştirilmesini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar, solar modül hücresinin düzlemine paralel olarak reflektör üzerindeki dağınık haddelemenin daha uniform bir ışın dağılımı sağlayarak fotovoltaik sistemin performansını artırdığını göstermiştir.

Tripathi R. ve arkadaşları (2018) dört sistem için kısmen kapalı fotovoltaik termal bileşik parabolik yoğunlaştırıcıların (PVT-CPC), fotovoltaik termal (PVT) yoğunlaştırıcıların, bileşik parabolik yoğunlaştırıcıların (CPC) ve seri olarak bağlanmış düz plaka toplayıcılarının (FPC) enerji ve ekserji performansı arasında karşılaştırmalı analizini yapmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda PVT-CPC sistemin diğer sistemlere göre ısınmasına rağmen soğutulurken daha fazla performans elde edilmiştir.

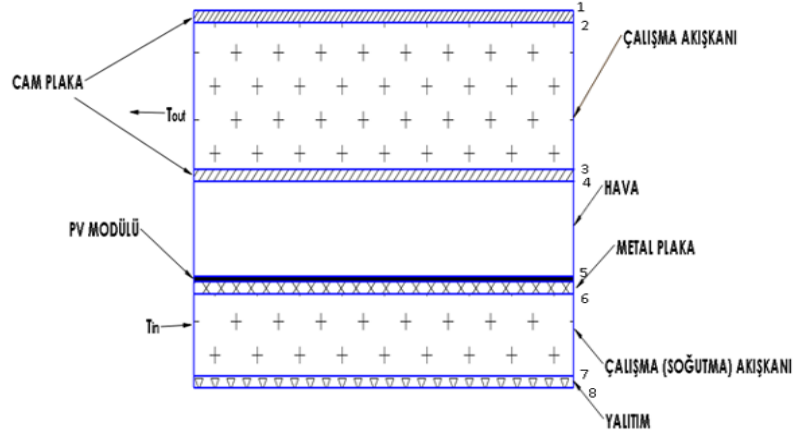
Gang Wang ve arkadaşları (2019) Lineer Fresnel yansıtıcı yoğunlaştırılmış ışınım kullanılan sistemlerinde PV panel ön yüzeyine yerleştirdikleri 380-1100 nm aralığındaki ışınımı geçiren diğer dalga boylarındaki ışınımı dağıtan sistemleriyle % 51,2'lik optik verime ulaşmışlardır. Çalışmalarında lineer fresnel lens kullanımı ve güneş takibiyle ilgili optik kayıplar olduğunu ön görmüşlerdir. Toplam verim açısından düşük kalan bu gibi sistemler optik ve ısı açıdan geliştirilmeye açıktırlar.

Zhao J. ve arkadaşları (2011) PV panel üst yüzeyine yerleştirilen su ve içeriğini vermedikleri optimize edilmiş bir akışkanla güneş ışığını soğurarak panele gelmesini sağlayan bir sistem için 1-B matematiksel model oluşturmuşlardır. Optimize ettikleri akışkanla kızılötesi ışınımın % 92 sinin yutulduğu, görünür ışınımın (400-800 nm) % 89 geçirilip PV yüzeyine ulaştığı sistemlerinde, toplam verimin ışınım yoğunluğuna göre değiştiğini, değerinin % 60- % 67 aralığında olduğunu ve ısı sistemin çıkış sıcaklığının 196 ° C olduğunu belirlemişlerdir. Sistemin en büyük avantajının, kullanılabilirlik veriminin % 12 lerden % 22 lere çıkarılması olduğunu yorumunu yapmışlardır.

Smith ve arkadaşları (2014) yoğunlaştırılmış Güneş ışınımı altında PV hücrelerini ön taraftan sprey su ile soğutmuşlardır. Çalışmalarında, mono kristalin PV panel kullanmışlardır. Sürekli su soğutması sonucunda pompanın güç tüketimi de göz önüne alındığında net güç kazancının % 4,6 olduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmada aktif soğutma yöntemi ele alınmıştır. Bu bağlamda bir mono kristalin PV hücresinin hem soğutmasız hem de soğutma olması durumunda yüzey sıcaklığının ne olacağı HAD analizi ile araştırılmıştır. PV hücresinin 230 W/m² ile 980 W/m² değerleri arasında değişen Güneş ışınımı altında olduğu varsayılmıştır. Her bir ışınım değeri için beş farklı kütleli debide analizler gerçekleştirilmiştir .

1. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma kapsamında, Şekil 1’de şeması verilen PV/T sistemi için Optik Analiz Programı kullanılarak sistem katmanlarında geçirilen ve yutulan enerji miktarları bulunmuş, elde edilen veriler Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (ANSYS) Programında sınır şartları olarak kullanılıp, kolektör yutulmuş ve soğutma katmanlarında çıkış sıcaklığı bulunmuştur. Yutulmuş ünitesi, iki cam plaka arasında çalışma akışkanı olarak suyun farklı katman kalınlıklarında bulunduğu bölge olarak tasarlanmış olup, soğutma ünitesi fotovoltaik modül altına yerleştirilen 2 cm kalınlıklı 1-1 m ölçülerinde bölge olarak tasarlanmıştır. Bu kısımda gerçekleştirilen modelleme çalışmasında güneş ışınlarının geliş açısı 0° olarak, güneş ışınlarının dik geldiği an için yapılmıştır.



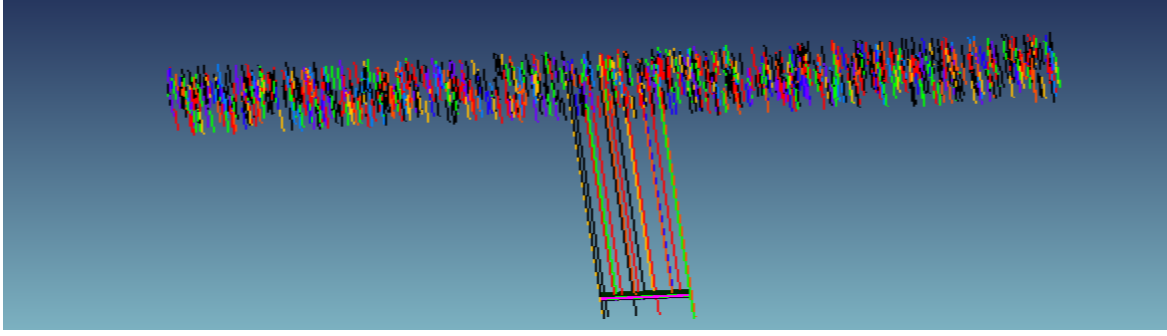
Şekil 1. Işınım Ayrıştırımlı PV/T Sistem şeması

Çalışmada ışık kaynağı, 800 W/m^2 ışınım akısına sahip $10 \times 10 \text{ m}$ ölçülerinde güneşin 1,5 AM spektrisine uygun spektral saçılma sahip dikdörtgen ışık bir yüzeyle modellenmiş olup, ışık kaynağı için kullanılan dalgaboyları ve ağırlık fonksiyonları Tablo 1 ‘de verilmiştir.

Tablo 1. Işık kaynağı spektral ağırlık fonksiyonu

Dalga boyu μm	Ağırlık Fonksiyonu	Dalga boyu μm	Ağırlık Fonksiyonu
0,34	0,306596	0,8	0,855869
0,36	0,357791	0,84	0,81471
0,4	0,537107	0,92	0,735842
0,42	0,668764	0,96	0,698617
0,46	0,878149	1	0,710833
0,48	0,894947	1,1	0,596818
0,52	0,907741	1,3	0,524489
0,54	0,956974	1,5	0,421573
0,58	1	1,8	0,295243
0,6	0,990259	2	0,172895
0,68	0,956336	2,3	0,147168
0,72	0,916374		

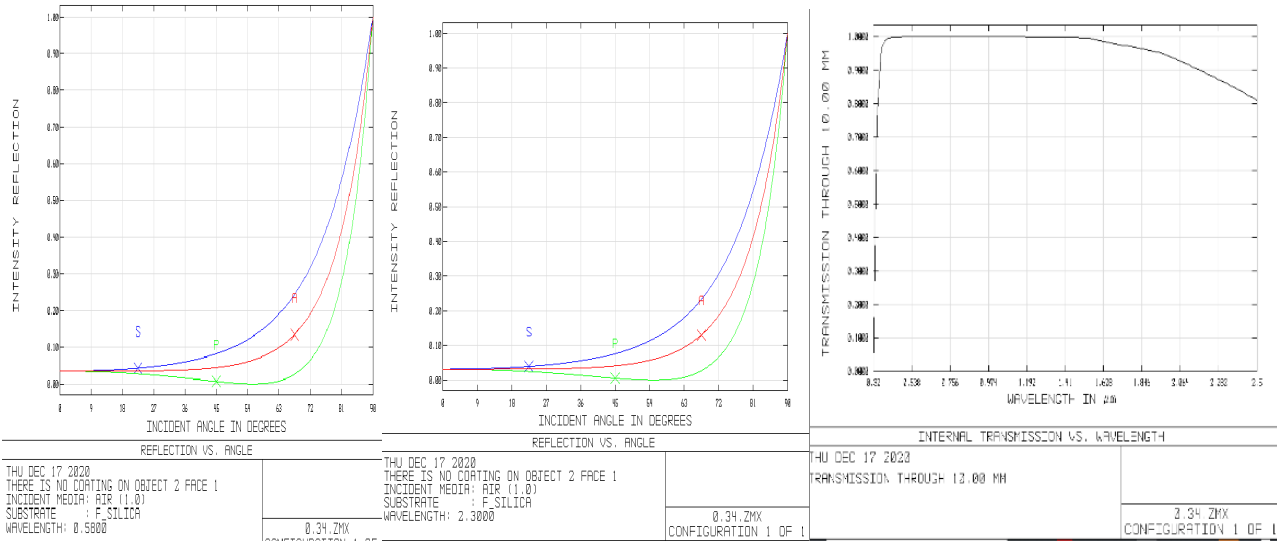
Işın izleme metoduyla yapılan tasarım için ışın kaynağından programın üst limiti olan 4×10^9 ışın ile optik analiz yapılmış olup sistem geometrisinin 1000 ışınlık şeması Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Tasarlanan Işık kaynağının sistem elemanlarıyla Optik Analiz Programı Şeması

Tasarlanan PV/T sisteminin ısı üniteleri için suyun geçeceği, geçirgenliği yüksek yansıtıcılığı ve yutuculuğu düşük, Güneş Enerji sistemlerinde sıkça kullanılan temperlenmiş düşük Fe_2O_3 oranına sahip 1 cm kalınlığında 1-1 m ölçülerinde alt ve üst cam tasarlanmış olup geometrik olarak suyun alt ve üst yüzeylerine temas edecek şekilde yerleştirilmiştir.

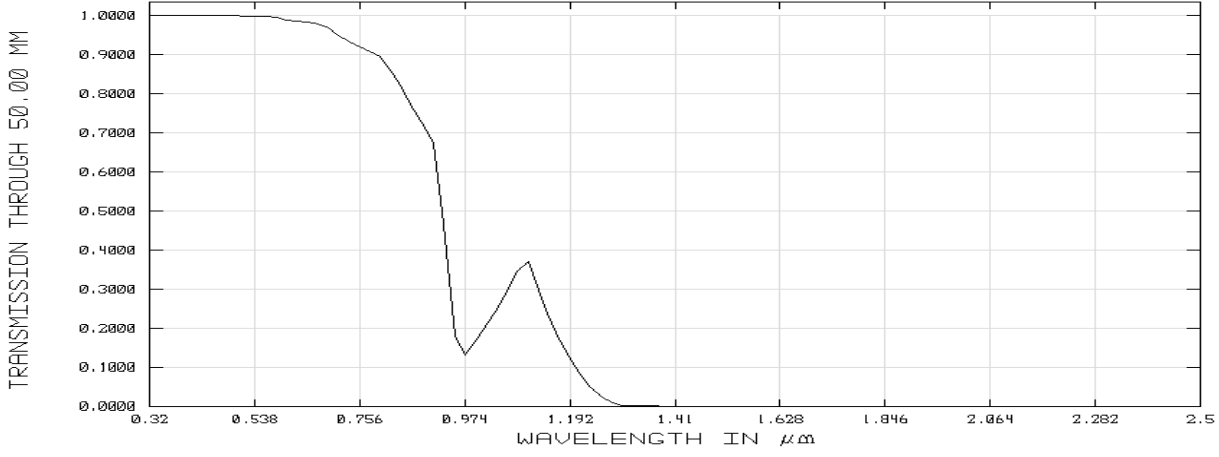
F-Silica camın 340-2300 nm dalgaboyu aralığı için optik özellikleri program kapsamında olduğu gibi alınmış olup, Şekil 3'te cam yüzeylerdeki yansıtıcılığın geliş açısına bağlı olarak farklı dalga boyları için değerleri ve içsel geçirgenlikleri verilmiştir.



Şekil 3. Cam yüzeylerde geliş açısına bağlı yansıtma oranları ve içsel geçirgenlikleri

Fotovoltaik panelde elektrik enerjisi üretimi için Band enerjisini yenemeyerek paneldeki yarı iletken tabakalardan geçerek arka yüzeyde yutulan düşük enerjili ve uzun dalga boylu ışınım, panel sıcaklığının artmasına yol açar. Panel sıcaklığının artması panel potansiyel farkını ve dolayısıyla panel verimini düşürecek bir etki ortaya çıkartır. Bu ışınım bir su katmanı tarafından yutulur ve panel sıcaklığının artmaması sağlanabilir. Bu amaçla, sıcak su eldesi için kullanılacak su tabakası, 10,25,50 ve 100 mm kalınlıklı 1x1 m ölçülerinde tasarlanmış olup optik özellikleri Deng Ruru ve ark.(2012) çalışmasından alınarak optik tasarım programına girilmiştir.

Suyun farklı dalgaboylarındaki geçirgenliği için girilen değerler Şekil 4'te verilmiştir.



INTERNAL TRANSMISSION VS. WAVELENGTH

FRI DEC 18 2020

TRANSMISSION THROUGH 50.00 MM

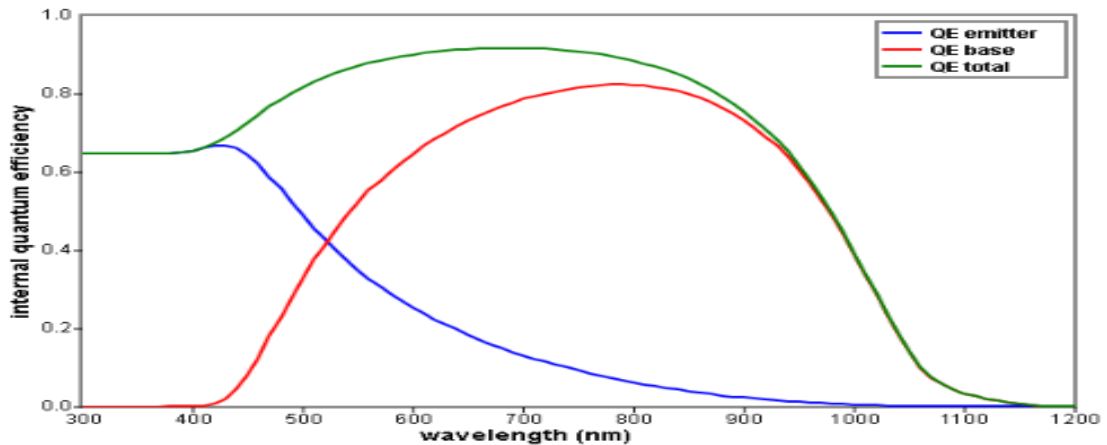
0.34.ZMX
CONFIGURATION 1 OF 1

Şekil 4. Suyun farklı dalgaboylarındaki geçirgenliği

Fotovoltaik panel 1x1 m ölçülerinde dalgaboyundan bağımsız 0.02 yansıtıcılık ve 0.98 yutuculuk katsayılarına sahip düzgün saçılımlı yüzey kaplamalı olarak tasarlanmıştır. Işınım şiddeti sayımı; üst cam üstü, su tabakası üstü, su tabakası altı ve fotovoltaik panel yüzeyi konumlarına dedektörler yerleştirilerek yapılmıştır.

Şekil 1'de şeması verilen üst ısı bölgede, ışınım yutulmasını sağlayacak akışkan, alt soğutma bölgesinde fotovoltaik panelde oluşacak ısının aktarıldığı akışkan olan 25 °C giriş sıcaklığındaki su olarak tasarlanmıştır. Fotovoltaik panelin soğutulmasında kullanılan su akışı ve aynı zamanda, ısı bölge girişini besleyen akış olarak alınmıştır. Optik analiz bölümünden suyun ışınım yutulumu ve fotovoltaik panele gelen ışınım değerleri kullanılacak olup 50 mm kalınlığındaki su tabakası tasarımı referans alınacaktır.

Fotovoltaik panelden soğutucu akışkana geçecek ısı miktarı panel verimi ile ilişkilidir. Panel verimini etkileyen en önemli parametre olan kuantum verimi panelin farklı dalgaboylarındaki Spektal yanıtını oluşturan parametre olarak bilinmektedir. Bu çalışmada Sun Power firmasının 1.5 AM standartlarında ; 68.6 V potansiyel ve 6.12 Amperlik kısa devre akımına sahip, %79.1 dolgu faktörü ve %18 elektrik dönüşüm verimine sahip paneli farklı dalgaboylu ışınım altında kuantum verimi bilindiğinden referans olarak alınmıştır. Şekil 5'te panelin farklı dalgaboylu ışınım altında içsel kuantum verimi verilmiştir.



Şekil 5. Referans panelin içsel kuantum verimleri

300- 1200 nm dalgaboyu aralıklarında ($\Delta\lambda = 10$ nm için) farklı kalınlıklarda su tabakası altında düzeltilmiş fotovoltaiik panel verimi Denklem (1)'de verilmiştir.

$$\eta_d = \eta_{ref} \frac{\sum_{\lambda=300}^{1200} I_{\lambda}(IQE)_{\lambda} \Gamma e^{-\alpha_{\lambda} L}}{\sum_{\lambda=300}^{1200} I_{\lambda}(IQE)_{\lambda}} \quad (1)$$

Yukarıda verilen eşitlikte η_{ref} referans verimi, I_{λ} spektral ışınım değerini, $(IQE)_{\lambda}$ içsel kuantum verimini, Γ optik kayıp katsayısını, α_{λ} spektral yutulum katsayısını ve L su tabakası kalınlığını göstermektedir. Farklı su tabakası kalınlıkları altında panel verimleri ve panel elektrik üretim değerleri hesaplanarak panelde açığa çıkan ısı miktarları hesaplanmış ve 50 mm'lik yutulum ünitesi kalınlığı değerleri için bu değer soğutma ünitesi için yüzeysel ısı akısı olarak sınır şartlarında tanımlanmıştır.

Isıl analizlerde, soğutma ünitesi girişine 25 ° C sıcaklığında, sırasıyla 64, 128 ve 256 kg/h debilerinde su akışı laminer akış şartlarında girş yapmakta olup, soğutma ünitesi çıkış sıcaklıkları yutulum ünitesi giriş sıcaklıkları olarak alınmıştır. Yoğunlaştırılmış ışınım tasarımları için 64 kg/h debi durumunda sırasıyla, 800, 1600, 2400 ve 4000 W/m² lik ışınım akısı durumlarını çözümlenmiş olup bulgular bir sonraki bölümde verilmiştir.

2. Bulgular ve Tartışma

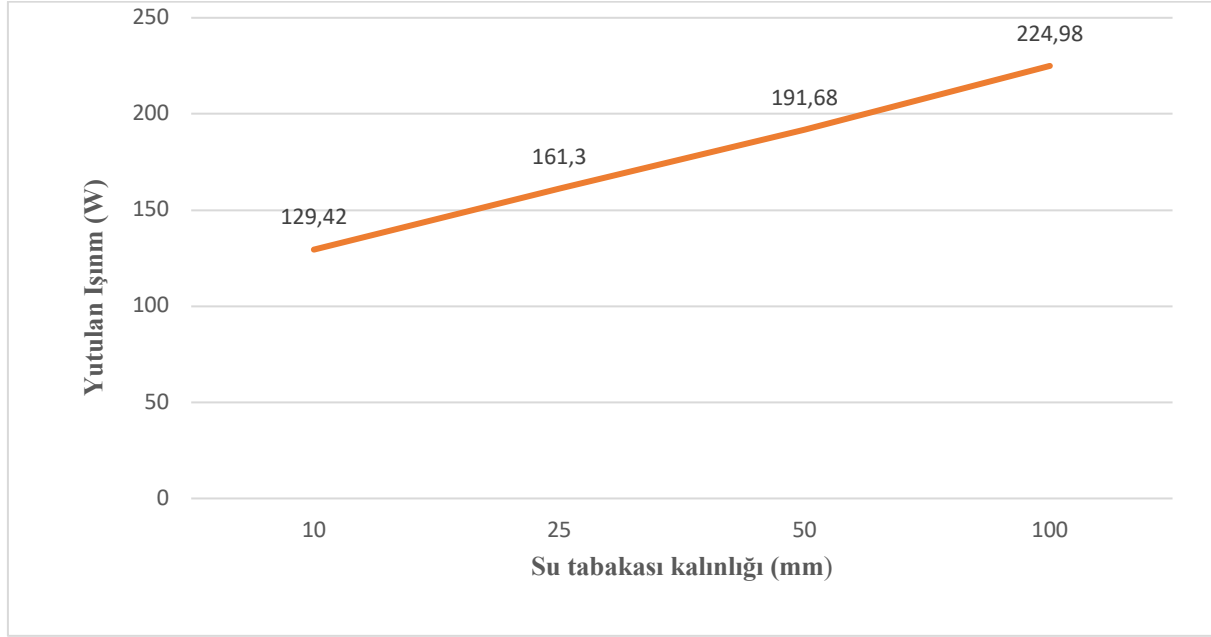
Bu çalışmada, tasarlanan 4 farklı ışınım yutulum ünitesindeki dedektörlerden alınan ışınım değerleri Tablo 2 'de verilmiştir.

Tablo 2. Sistemin farklı konumlarındaki ışınım

	DEDEKTÖR NUMARASI	DEDEKTÖR KONUMU	TOPLAM IŞINIM (W)		DEDEKTÖR NUMARASI	DEDEKTÖR KONUMU	TOPLAM IŞINIM (W)
MODEL 1 10 mm SU TABAKALI YUTULUM ÜNİTESİ	1	-10 mm (üst cam üstü)	799,39	MODEL 3 50 mm SU TABAKALI YUTULUM ÜNİTESİ	1	-10 mm (üst cam üstü)	799,39
	2	0 mm (su tabakası üst bölge)	772,66		2	0 mm (su tabakası üst bölge)	772,2
	3	10 mm (su tabakası alt bölge)	643,24		3	50 mm (su tabakası alt bölge)	580,52
	4	60 mm (PV panel)	620,45		4	100 mm (PV panel)	560,11
MODEL 2 25 mm SU TABAKALI YUTULUM ÜNİTESİ	1	-10 mm (üst cam üstü)	800	MODEL 4 100 mm SU TABAKALI YUTULUM ÜNİTESİ	1	-10 mm (üst cam üstü)	800
	2	0 mm (su tabakası üst bölge)	773		2	0 mm (su tabakası üst bölge)	772,75
	3	25 mm (su tabakası alt bölge)	611,7		3	100 mm (su tabakası alt bölge)	547,77
	4	75 mm (PV panel)	590		4	150 mm (PV panel)	528,39

- Model 1’de su tabakası üst ve altında konumlandırılan 2. ve 3. Dedektörlerde saydırılan ışınım farkı 129.42 W değerindeki ışınım yutulmuş bölgesinde yutulmuş olup, fotovoltaik panel yüzeyine 620 W’lık ışınım düştüğü belirlenmiştir.
- Model 2’de su tabakası üst ve altında konumlandırılan 2. ve 3. Dedektörlerde saydırılan ışınım farkı 161.3 W değerindeki ışınım yutulmuş bölgesinde yutulmuş olup; fotovoltaik panel yüzeyine 590 W ışınım düştüğü belirlenmiştir.
- Model 3’te su tabakası üst ve altında konumlandırılan 2. ve 3. Dedektörlerde saydırılan ışınım farkı 191.69 W değerindeki ışınım yutulmuş bölgesinde yutulmuş olup; fotovoltaik panel yüzeyine 560.11W ışınım düştüğü belirlenmiştir.
- Model 4 ‘te su tabakası üst ve altında konumlandırılan 2. ve 3. Dedektörlerde saydırılan ışınım farkı 224,98 W değerindeki ışınım yutulmuş bölgesinde yutulmuş olup; fotovoltaik panel yüzeyine 528,39 W ışınım düştüğü belirlenmiştir.

Optik analiz sonuçlarından yutulmuş ünitesinde yutulmuş ışınım miktarının tabaka kalınlığına göre değişimi Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Farklı kalınlıklardaki su tabakalarında yutulmuş ışınım

Farklı su tabakası kalınlığına sahip modeller için panel elektrik üretim verim ve miktarları, panelden atılması gereken ısı miktarları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Farklı su tabakası kalınlıkları için Panel Verimi, Elektrik ve Isı Üretimi

	Panel Verimi η_{pv}	Panel’e Ulaşan Işınım (W)	Elektrik Üretimi (W_{el})	Isı Üretimi Q (W)
Referans Panel	18	800	144	656
10 mm su tabakalı	16,35	620,45	130,82	489,43
25 mm su tabakalı	15,89	590	127,12	462,88
50 mm su tabakalı	15,34	560,11	122,72	437,39
100 mm su tabakalı	14,6	528,39	116,8	411,59

50 mm su tabakası kalınlıklı yutulmuş ünitesi bulunduran model için akışkan farklı akışkan debilerinde çıkış sıcaklıkları Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Farklı Debilerde Isıl Ünite Akışkan Çıkış Sıcaklıkları

Debi (kg/h)	Soğutucu Akışkan Çıkış Sıcaklığı T_{çıkış} (°C)
64	34,08
128	29,73
256	27,59

Farklı debi değerleri için ısı kazanımlarının Carnot eşlenik elektrik değerleri sırasıyla 10.35 , 61.75 ve 95.08 W olarak hesaplanmıştır.

50 mm su tabakası kalınlıklı yutulmuş ünitesi bulunduran model için akış debisi 64 kg/h alınarak farklı ışınım değerlerinde yapılan ısı analizler için çıkış sıcaklıkları Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Farklı Işınım Altında Isıl Ünite Akışkan Çıkış Sıcaklıkları

Işınım Şiddeti (W/m²)	Soğutucu Akışkan Çıkış Sıcaklığı T_{çıkış} (°C)
800	34,08
1600	42,93
2400	51,89
4000	69,83

Farklı ışınım şiddeti değerleri için ısı kazanımlarının Carnot eşlenik elektrik değerleri sırasıyla 10,35 , 155,54 , 440,41 ve 1223,57 W olarak hesaplanmıştır.

3. Sonuçlar

Bu çalışma 4 farklı su katmanı kalınlığındaki ışınım yutulmuş ünitesi içeren modeller karşılaştırıldığında su katmanı kalınlığının artırılması yutulmuş katmanında yutulmuş enerji miktarını artırarak fotovoltaik modülün düzeltilmiş elektrik verimini arttırdığı görülmüştür. Çalışmada su debisinin artışıyla sistemde ortalama sıcaklıkların düşürülmesi aracılığıyla üretilebilecek elektrik enerjisi ve kazanılan ısı Carnot eşdeğeri elektrik miktarlarının arttığı görülmüştür. Yine, yoğunlaştırılmış ışınım altında sistem ortalama sıcaklıklarının artmasıyla beraber kazanılan ısı Carnot eşdeğeri elektrik miktarlarının arttığı da görülmüştür.

Yoğunlaştırılmış ışınım altında fotovoltaik modülle elektrik üretiminin en büyük problemi olan yüksek sıcaklıkları düşürmenin çok katmanlı yüksek verimli ve yüksek maliyetli hücre kullanımına alternatif olarak görece düşük maliyetlerle yutulmuş katmanı sayesinde gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir.

Bu çalışmanın devamında farklı fotovoltaik modül teknolojileri ve farklı yutulmuş ünitesi akışkanları araştırılarak optimum Güneş enerjisi sistemi tasarlanabilir.

Referanslar

- Bergene, T., ve Lovvik, O.M., (1995). Model Calculations On A Flat-Plate Solar Heat Collector with Integrated Solar Cells, *Solar Energy*, 55(6), 453-462. doi:10.1016/0038-092X(95)00072-Y.
- Deng, R., He, Y., Qin, Y., Chen, Q., & Chen, L. (2012). Measuring pure water absorption coefficient in the near-infrared spectrum(900--2500 nm). *Yaogan Xuebao- Journal of Remote Sensing*, 16(1), 192-206.
- Duffie JA, Beckman WA, (1991). *Solar Energy of Thermal Process*, 2nd Edition. New York, John Wiley & Sons,
- Gang Wang, Fasi Wang, Fan Shen, Zeshao Chen, Peng Hu (2019). Novel design and thermodynamic analysis of a solar concentration PV and thermal combined system based on compact linear Fresnel reflector. *Energy* 180,133-148. doi: 10.1016/j.energy.2019.05.082.
- Hatwaambo, S, Hakansson, H., Nilsson, J. ve Karlsson, B. (2008). Angular characterization of low concentrating PV– CPC using low-cost reflectors. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 92: 1347– 1351. doi:10.1016/j.solmat.2008.05.008
- Ji, Jie, et al. (2007). A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation. *Applied Energy*, 84.2: 222-237. doi:10.1016/j.apenergy.2006.04.009
- Smith, M. K., Selbak, H., Wamser, C. C., Day, N. U., Krieske, M., Sailor, D. J., & Rosenstiel, T. N. (2014). Water cooling method to improve the performance of field-mounted, insulated, and concentrating photovoltaic modules. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 136(3), [034503]. doi:10.1115/1.4026466
- Tripathi R., Saini, V., Tiwari, G.N. ve Al-Helal, I.M. (2018). Electrical and thermal energy assessment of series connected N partially covered photovoltaic thermal (PVT)-compound parabolic concentrator (CPC) collector for different solar cell materials. *Applied Thermal Engineering*, 128: 1611–1623. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.09.119
- Zhao Jiafei, Song Yongchen, Lam, Wei-Haur, Liu Weiguo, Liu Yu, Zhang Yi, & Wang DaYong (2011). Solar radiation transfer and performance analysis of an optimum photovoltaic/thermal system. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1343-1353. doi:101016/j.enconman201009032



Use of Deep Learning Algorithms to Prevent Pantograph-Catenary Malfunctions

Şakir Parlakyıldız¹ , Muhsin Tunay Gençoğlu² , Mehmet Sait Cengiz¹ 

¹ Technical Sciences Vocational School, Bitlis Eren University, Bitlis, TURKEY

² Engineering of Electrical-Electronic Engineering, Fırat University, Elazığ, TURKEY

Başvuru/Received: 24/06/2021

Kabul/Accepted: 28/03/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Abstract

Today, the demand for rail transport is increasing. Studies in this area are increasing worldwide. While the railway infrastructure is increasing in the world, the suitability of the railroads and train sets built is of great importance in terms of road and passenger safety. The most important test to ensure road and passenger safety is on the electrification line. The energy required for the movement of the electric train is provided by the power line. Continuous contact between the power line and the pantograph is desired while in motion by providing continuous energy for the rail system to operate. Even short-term non-contact between the pantograph and the catenary adversely affects the rail system vehicle and the electronic systems inside. For this reason, the pantograph and catenary interaction should be controlled dynamically and statically in certain periods. In this study, dynamic and static control was provided by using deep learning. The k-fold cross-validation algorithm was used in the training and testing of the data sets. The data obtained is divided into 4 layers, each fold is divided into training and testing. Test and training results are given for each fold of the system. The data received from the system are recorded in CSV format. Using deep learning algorithms, failure points have been successfully detected up to 99.4%.

Key Words

“Catenary, data acquisition, high speed train, fault detection, pantograph”

1. Introduction

The current demand for transportation is increasing. Studies in this field in our country have accelerated after 2007. Currently, it provides service on the Ankara-Konya and Ankara-Eskişehir lines, reaching a speed of 250 km/hour, and its duration is significantly shortened (Burrow et. al., 2004). Continues to railroad infrastructure in Turkey, compliance with the speed of the roads and train sets, and passenger road transport is of great importance.

The tests conducted to ensure road and passenger safety can be grouped under 3 main headings. The first of these is the controls on the electrification line. The energy required for the movement of the train comes from the power line. In order for the rail system vehicle to be continuously energized, the pantograph and a very short-term lack of contact between a continuous contact line and the pantograph do not adversely affect the bile rail system vehicle and the electronic systems inside. Therefore, test the pantograph and static statically periodically (Taşdan, 2015).

The second preferred method for road and passenger safety is to measure the rails on which the train set moves dynamically and statically. For this purpose, tests are carried out periodically to measure the road geometry and track profile. The third test is conducted to determine whether the passengers traveling in the rail system vehicle are traveling in the desired comfort. The general purpose of this test is to measure the interaction of the train set moving on the rail between the rail and the train and to detect the jolt felt by the passenger.

Electrically operated traction motors are required for the movement of electric rail system vehicles, and electronic cards operating with direct current for the control system (Erşin, 2015). Whether there is electrical continuity, which is vital for the movement of the electric train, should be checked periodically. Firms working in this field in our country have the technical capability to establish the railway infrastructure with their own means. However, in railways, it is not enough to just make the line, it is also necessary to test whether the line is in international standards and whether it is safe to travel at the high speeds reached. Currently, there is no state or private sector participant in our country that can measure and test on the 3 main tests mentioned above. The tests are made by companies from abroad, paying serious costs per km. Another importance of the tests for the train operator is that the errors on the line can be determined as a result of the measurement.

The tests required to perform the pantograph-catenary dynamic interaction can be grouped under 4 subtitles. The first of these is to measure the force exerted by the pantograph, which is mounted on the rail system vehicle and is responsible for providing the necessary energy to the train set. If this force is more than desired, the power line will break due to strain, and less will cause arcs during the journey and mechanical damage to the pantograph. The second parameter to be tested is that the force applied to the travel wire in a rail system vehicle with an unstable speed change in proportion to the speed of the train set. Acceleration at different speeds should also be measured and controlled. The third parameter to be measured is that the travel wire touching the pantograph does not create a heating effect on the coal on the pantograph and does not cause mechanical damage. In order to achieve this, it should be checked whether the travel cable is traveling within the allowed distance limits from one end to the other on the pantograph. This situation is expressed as a disability. The last parameter to be measured is to know where it is on the railway if there is a real problem in the interaction of catenary and pantograph. The Ankara-Eskişehir line is approximately 245 km. If a problem is detected and no information is given at which point on the railway, the test performed does not matter. Because, in case of failure, scanning the entire 245 km line will cause both time and cost loss.

Accelerometer sensor, load cell sensors and encoder or GPS system are required to perform the tests mentioned above (Kiessling, 2014). As a result of the regular application of the test and measurement systems to be detailed in the following sections on railways and rail system vehicles, both road and passenger safety and passenger comfort in trains that can reach high speeds will be carried out in accordance with international standards.

The aim of this study is to determine which tests are carried out on rail system vehicles, which parameters are paid attention to in the test result, and to make a real-time applicable test system whose results are analyzed.

High-speed trains are used safely in various cities of European and Asian countries today. In Japan, which has a significant weight in high-speed train lines, the density of passengers is also above the world average (Matvejevs, 2010). It serves over 305 million passengers a year with over 100 trains. High-speed trains were also used first in Japan. The first line was made between Tokyo-Osaka cities in 1959. Shinkansen, the line with the highest passenger density in the world, was opened in 1964. The line, which served approximately 30 million people when it was first commissioned, now serves more than 300 million passengers. Shinkansen is considered to be the line with the highest passenger carrying capacity in the world. Japan will continue to be one of the firsts in the field of high-speed rail. "Maglev", which moved without contact from the rail in 2003, reached a speed of 581 kilometers per hour and still maintains the record in this branch. In Table 1. the total railway line lengths of some countries are given.

Table 1. The total length of railway lines in the world and Turkey

Country	Total line length (km)
China	20.318
Japan	2.495
Spain	3.744
France	2.106
Germany	1.410
Italy	1.015
Russia	1.180
Turkey	1.048
Taiwan	345
South Korea	412
Belgium	209
Netherlands	120
United Kingdom	113
Swiss	107

2. Implementation Process for Pantograph-Catenary Faults

As in all areas, the biggest need for transportation is energy. Energy consumption is increasing day by day due to reasons such as requirements of modern life, increasing competition environment, cultural and social developments. The area where electric energy is used in transportation systems is Electric Rail Systems (ERS). Electric rail systems have been used in transportation for many years. The most important elements in ERS are pantograph and catenary. Compatibility between pantograph and catenary is one of the most important issues in these systems. A pantograph is mobile and a catenary is a fixed element. These two elements touch each other and move in ERS is provided. Therefore, having contact between them makes the system more complicated (Palta et. al, 2017; Cengiz et. al, 2018; Parlakyıldız et. al., 2020; Zhang et. al, 2018; Cengiz and Cengiz, 2018; Wu et. al, 2016; Akalp et. al, 2021; Kaynaklı et. al., 2018; Cengiz and Mamiş, 2017; Yaylak et. al., 2017; Eren et. al., 2017).

The current pantograph is the most important source of failure in Electrical Rail Systems. The pantograph is above the roof of the train and collects current from the overhead catenary line. The Catenary line is fixed to poles with support points at regular intervals along the railway line. When the train moves, the pantograph moves along the catenary line and delivers electrical energy to the ERS. The contact between the catenary and the pantograph should be optimal. When the ERS speed increases, vibrations occur in the catenary line. This disrupts the interaction between the pantograph and the catenary. These vibrations negatively affect the contact between the pantograph and the catenary. Since the contact between the pantograph and the catenary is interrupted in electrical contact, wear and arc occur. Rail systems are generally advantageous means of maintenance in terms of maintenance factors other than pantograph-catenary systems. So maintenance factor multipliers are high. Mechanical parts of ERS require very little maintenance for a long time.

When the studies in the literature were examined, the researchers either examined the catenary-pantograph interaction with the help of a simulation program or tried to measure the force applied by the pantograph to the catenary wire by creating a test system in the laboratory. However, none of the studies focused on the design and implementation of the real-time measurement system using these parameters and the information that the user will determine where the fault is on the railway by adding the localization information of the detected fault. Periodic movement of the catenary wire from one end to the other within the limits allowed on the pantograph is of great importance in terms of not being mechanically forced on the pantograph. In the studies in the literature, the determination of whether the catenary wire moves within the desired limits on the pantograph has not been mentioned much. However, with the help of the existing hardware on the system, it is possible to make this detection only by means of computer software without the need for any additional electronic sensor. The two conditions mentioned above are two elements that should be included in the measurement system, and when the project is completed, how these parameters are determined will be brought to the literature.

The advantages of electric railway vehicles over diesel-powered vehicles can be listed as follows:

- Noise and environmental pollution rate is much less than other vehicles.
- Low maintenance costs in electrical systems.
- As the motors act as generators in descents and braking, the catenary system is also energized.

- As the traction power is higher than other traction systems, the number of locomotives can be saved or it is possible to carry more load with the same power.
- Fuel savings are higher compared to other systems .

Ding examined the abrasive properties of the arc caused by not making proper contact on the carbon strip on the pantograph (Östlund et al., 2008). It has found that arc wear and oxidation are effective on wear. It proved that the friction coefficient and wear rate are proportional to the current drawn from the catenary wire. In this study, he stated that the biggest factor in arc formation is low contact force, in other words, low friction. Thus, arc wear is seen as an important factor in shortening the life of the carbon on the pantograph arch.

Regarding the formation of arcs as a result of the pantograph-catenary interaction, Östlund examined this situation seasonally, and determined that the pantograph-catenary interaction decreases due to ice formation in winter, so that the arc is formed and has an erosive effect on the pantograph. It aimed to determine the contact strip wear by means of the direct current component occurring in the arc, and for this purpose, parameters such as current, voltage, train speed were used. The arc has a corrosive effect on the carbon on the arc, but considering that there are other factors that erode the carbon, it can be said that this study is incomplete in this sense. Midya et al. (2009) has worked on a system design that will examine the arc faults occurring in the system due to current and voltage values, therefore the current and voltage values at the moment the arc occurs (Midya et al., 2009). Facchinetti et al., (2012) worked on a system in which the wear, arc and heating parameters were evaluated together in the complex system he developed.

Studies have been carried out using image processing techniques to find pantograph-catenary interactions and failures. The general purpose of these studies was to measure the top point of the rail system vehicle and the distance where the arch touches the catenary wire. In these studies Boguslavskii et al. (2006) used the Canny edge extraction algorithm. In addition to image processing studies, O'Donnel et al. (2006) conducted studies on real-time measurement of dislocation. Xiao-Heng et al. (2010) determined the abrasions on the carbon strip using edge extraction and detection algorithms in image processing techniques. Wang et al. (2013) made analyzes for wear using the contact pressure, train speed, and wear characteristic parameters. He has studied that mechanical and electrical wear are related to contact wire pressure. He stated that the contact wire will cause electrical wear due to contact with the pantograph with a lower pressure than desired, and high pressure contact will cause mechanical wear. Wang et al. (2013) stated that there is an inversely proportional relationship between speed and contact wire interaction, as the speed increases, the interaction with the contact wire decreases, and when the speed decreases, this interaction increases.

Bucca et al. (2009) developed laboratory tests on contact wire and pantograph made of different materials at different contact force, various current, and varying speed values. He gave the results of contact, graphy, and carbon in different current, velocity, and contact forces comparatively. The study in question is considered to be incomplete due to its material-based analysis of wear. Taran et al. (2013) created a two-mass model with a reference force of 100 Newtons for the pantograph. The model created is based on the simulation results of the catenary stiffness varying with time at different speeds, it has been understood that the model gives good results at constant speeds but does not give good results at variable speeds. Matvejevs (2010) continued their studies in a simulation environment because he thought that reducing the contact force effect would only be possible with special designs and that the special design to be made would be costly. Xiaodong et al. (2011) argued that abrasions are caused by vibration and that the control method to be applied to the pantograph-catenary system should be applied to the pantograph arch suspension to reduce these vibrations. Östlund (2008) concluded that the active control system to be implemented would be difficult to implement in practice and the system was not suitable for practice.

In the literature, there are experimental and simulation-based thesis studies conducted for the pantograph - catenary active control method. When these studies were examined, localization information was not given in any of the experimental studies for the real use of the application. Song et al. (2020) worked on cable irregularities in high speed trains in pantograph catenary interaction.

When the studies carried out until 2020 are examined, many models for the electrification interaction of rail systems have been proposed and field studies have been carried out. However, it has been observed in the studies that there is no work to locate the fault. The second point that was noticed in the reviews is that the test data obtained as a result of the test were not examined in advanced algorithms. In our field test, there are 9984 data and these data are interpreted in terms of deep learning algorithms. In previous studies, artificial neural network algorithms were not used in analyzing these data and making decisions for implementation. For this purpose, there are many new studies including different subjects (Cengiz et al., 2017; Cengiz, 2020; Çıbuk et. al., 2020; Efe, 2018; Efe and Cebeci, 2013; Ertuğrul and Tağluk, 2017; Ertuğrul and Tağluk, 2016; Ertuğrul, 2018).

3. Test System Set Up To Collect Data

Four load cells capable of measuring up to four 500 Newton forces were used in the project. Since the project was carried out in UIC standards, the criteria determined by UIC were taken as basis in all operations and all equipment to be used, and it was determined that at least four load cells should be used according to these standards. When the train is in park position and the pantograph is in contact with the catenary, the minimum force applied by the pantograph to the catenary is 70 Newtons. This minimum force is determined by applying the formula below. The forces acting on the pantograph are shown in equation 1. This calculation is also called pantograph balanced force. Contact force is seen in Figure 1.

$$F_c = F_b + F_a + F_I \quad (1)$$

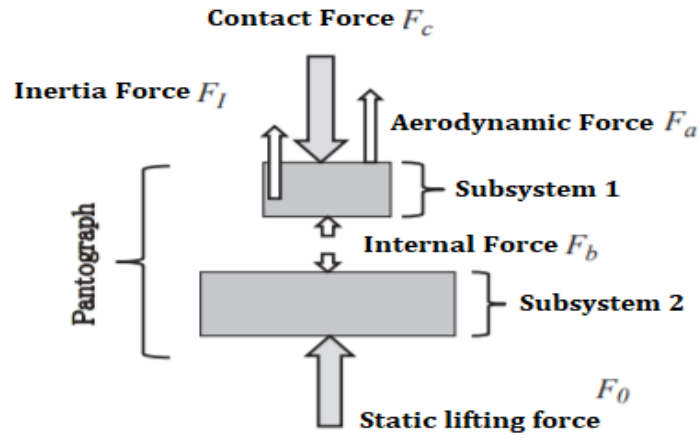


Figure 1. Contact force

If you want to measure the pantograph force in high oscillations, the forces calculated from different points of the pantograph are ideal. In this thesis, the acceleration from four points is measured.

$$F_I = \sum_{i=1}^n m_i \cdot a_i \quad (2)$$

Train contact force is calculated as in the following equation.

$$F_m = 0,00097 \cdot V^2 + 70 \text{ N} \quad (3)$$

As can be understood from Equation 3, the contact force applied when the train speed is zero should be 70 Newtons, the tests should be continued after this initial condition is met. Turkey in the current fastest operation speed of the train maximum rate per hour 250 km/h to the movement speed when this is thought to be an effect of 130 Newtons. While selecting the sensors, such calculations were taken into account, in terms of practical use, four sensors with a capacity of 500 Newton were used, and the total force was 2000 Newton, which is far above the capacity of the sensor to be used in the maximum speed train used in practice. As defined in the EN 50317 standard, the total force acting on the pantograph can be calculated by the following formula [26].

$$F = \sum_{i=1}^{kf} F_{\text{sensor}, i} + \frac{n_{\text{peak}}}{k_a} \cdot \sum_{i=1}^{ka} a_{\text{sensor}, i} + F_{\text{corr, air}} \quad (4)$$

The Figure 2 shows the test of the load cell with 2 kg.



Figure 2. Test of the load cell

The screen output of the software made is shown in Figure 3. This software is only for loadcell, software for all sensors was made separately and then combined.

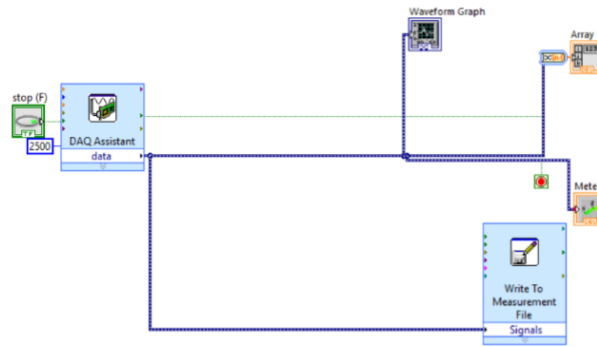


Figure 3. Software for retrieving loadcell data

Four accelerometers capable of measuring up to four 50 g acceleration were used in the project. Since the project was carried out in UIC standards, the criteria determined by UIC were taken as basis in all operations and all equipment to be used, and it was determined that at least four load cells should be used according to these standards. The selected accelerometer is uniaxial, and accelerometers are chosen to measure the vertical axis where the movements of the pantograph are only on the vertical axis. In the literature, this axis is called the z-axis. An example of the accelerometer sensor used in Figure 4 is shown.



Figure 4. An example of the accelerometer sensor used

GPS module is used for location information. The module has 12 channels and continuously detects high sensitivity GPS signals. GPS signal is detected at the antenna input of the module, position, speed and time information is transferred to the computer screen through the serial communication interface. Thanks to the module TTFF technology, it can detect low signal levels (Çıbuk and Cengiz, 2020; Cengiz, 2013). NMEA protocol is used. The GPS module with NMEA protocol is shown in Figure 5.

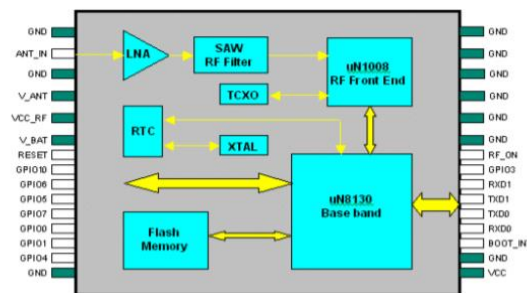


Figure 5. GPS module with NMEA protocol

With the software, the data are screen printed and recorded in real time. Used latitude, longitude, north/south information, east/west information, speed and angle data are displayed on the screen. Graphic software for receiving GPS data is shown in Figure 6. In Figure 7, the completed version of the project can be seen after the sensors are assembled. The system is ready to save data.

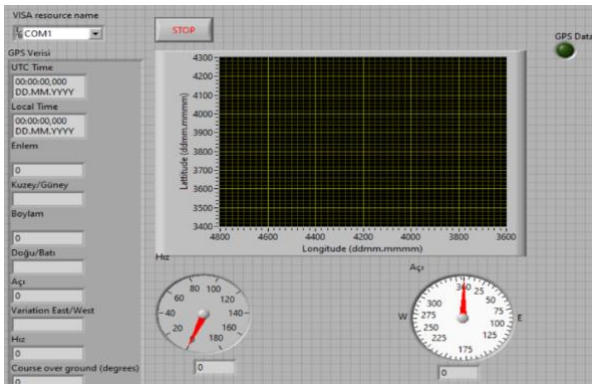


Figure 6. GPS gui software



Figure 7. Complete assembly

5. Method: Recommended Deep Learning Algorithm for Data Analysis

This study has two stages, in the first stage a measurement system was designed and implemented, and in the second stage, a deep learning algorithm was used to evaluate this density data. Deep learning is a learning method developed for learning, perception, and feature extraction applications, which consists of successive layers and examines the output data coming before each layer as input data. 768 * 11 sized data set is used. This method was chosen to evaluate the data obtained after the test, as the deep learning algorithms give fast results and offer a complete solution from the beginning to the end, not in parts. In this study, the force on which the catenary wire acts on the pantograph, affects the "F" parameter, ""Acc1", "Acc2", "Acc3", "Acc4", "Lcc1", "Lcc2", "Lcc3", "Lcc4" and "Vlc". Variables are modeled with the deep learning algorithm. Lcc data designed in the model are defined as (Newton) and F (Newton).

The 6-layer algorithm was created for the evaluation of the data set. Table 2 has been created for this model. The sequenceinput layer contains data consisting of 8 columns. There are 200 hidden units in the LSTM layer. While analyzing the data in the system, 8 folders were used, 4 of these folders were used for training and 4 for testing.

Table 2. Deep learning layers

1	'sequenceinput'	Sequence Input	Sequence input with 8 dimensions
2	'lstm'	LSTM	LSTM with 200 hidden units
3	'fc_1'	Fully Connected	50 fully connected layer
4	'dropout'	Dropout	50% dropout
5	'fc_2'	Fully Connected	1 fully connected layer
6	'regressionoutput'	Regression Output mean-squared-error with response	'Response'

Cross-validation is a statistical method used to estimate the skill of machine learning models. It is widely used in applied machine learning to select a model for a particular predictive modeling problem. It produces much more accurate results than other equivalent models. In this study, a k cross-validation algorithm was applied to estimate the skill of the machine learning model (Wang et al. 2013;Wu et.al, 2016;Parlakyıldız et. al., 2020;Michalski et. al., 1986;Carbonell, 1983;Parlakyıldız et. al., 2020;Parlakyıldız et. al., 2018). The k-fold cross-validation algorithm was used in the training and testing of the data sets. The data obtained is divided into 4 layers, each fold is divided into training and testing. Test and training results are given for each fold of the system. The results for the training data for cross-validation 1 are shown in Figure 8. The results for the test data for cross validation 1 are shown in Figure 9.

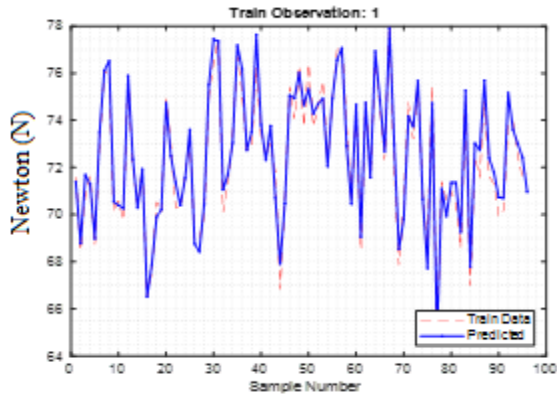


Figure 8. Fold-1 train data

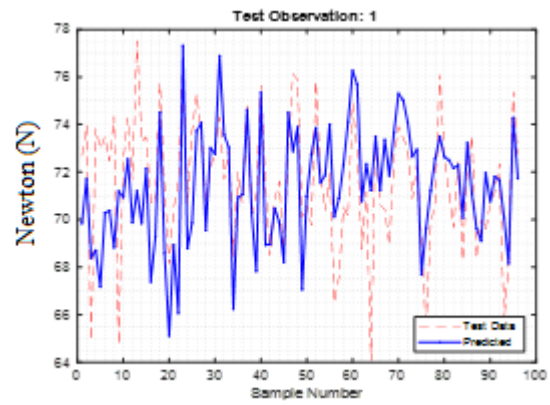


Figure 9. Fold-1 test data

The results for the training data for cross validation 2 are shown in Figure 10. The results for the test data for cross validation 2 are shown in Figure 11.

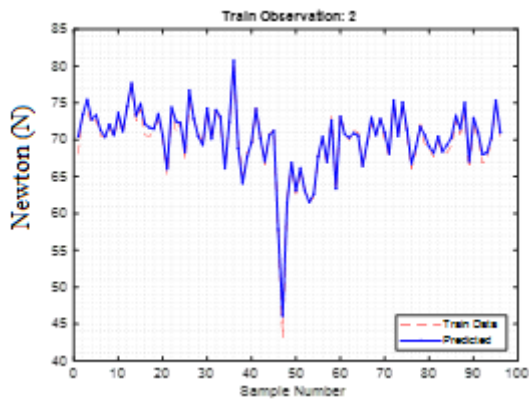


Figure 10. Fold-2 train data

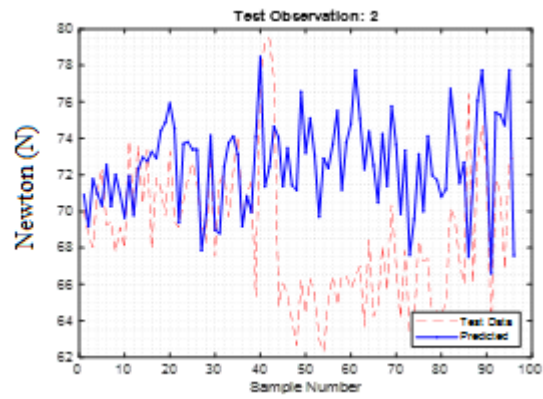


Figure 11. Fold-2 test data

The results for the train data for cross validation 3 are shown in Figure 12. The results for the test data for cross validation 3 are shown in Figure 13.

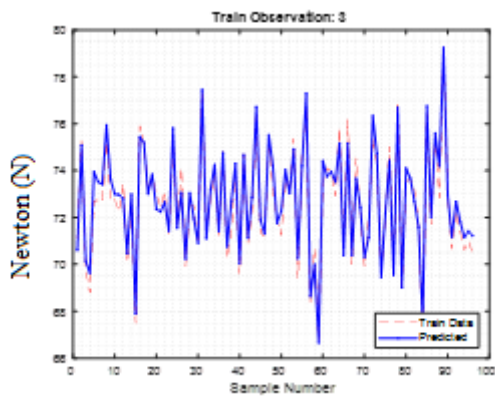


Figure 12. Fold-3 train data

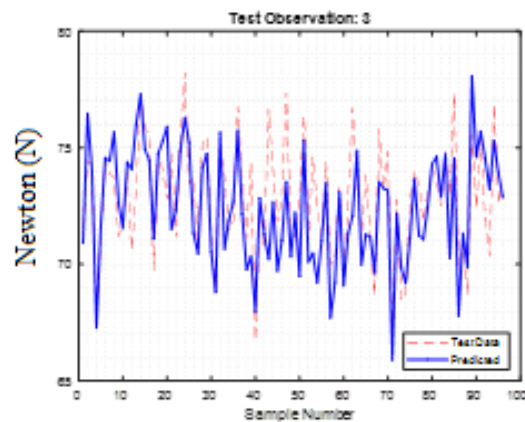


Figure 13. Fold-3 test data

The results for the train data for cross validation 4 are shown in Figure 14. The results for the test data for cross validation 4 are shown in Figure 15.

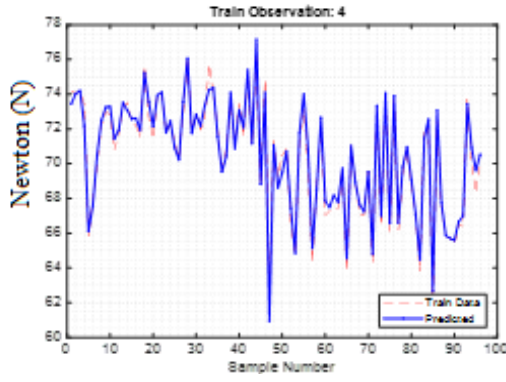


Figure 14. Fold-4 train data

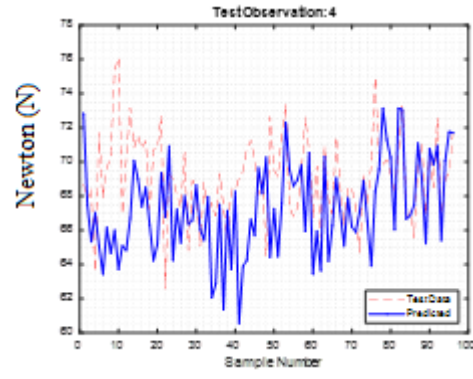


Figure 15. Fold-4 test data

MSE (Mean Square Error), RMSE (Root Mean Square Deviation), MAPE (Mean Percent Error), R2 (Determination coefficient) are used in the performance evaluation of the applied method. MSE is used to make sense of the performance of machine learning algorithms, it has a positive value and it can be said that its performance is better as it increases closer to zero. It is calculated as shown in Equation 5.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2 \quad (5)$$

RMSE refers to the distance between real data and predicted data in machine learning algorithms. It indicates that it performs well as its value approaches zero, and a value equal to zero indicates that it did not make any mistakes. It is calculated as shown in Equation 6.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2} \quad (6)$$

MAE, in this method, the best line to the data is found, this is the average vertical distance between the position closest to the line at the perpendicular distance. Because it is easy to interpret, machine learning algorithms are often preferred in their results. Low-value results can be interpreted as the algorithm gives better results. It is calculated as shown in Equation 7.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{e_t}{y_t} \right| \quad (7)$$

MAPE performs its calculations provided that there is no zero between the values, the maximum value of the predictive value is 100, but the lower the value, the better the algorithm can be said. It is calculated as shown in Equation 8.

$$MAPE = \frac{\%100}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{e_t}{y_t} \right| \quad (8)$$

The error performance results regarding training data for 4 folds in the models used are shown in the figure below. The fact that the results are below 1 proves the success of the applied algorithms. The error performance results regarding the test data for 4 folds in the models used are shown in the Figure 16. Average error value for each fold has shown below. The error performance results regarding the test data for 4 folds in the models used are shown in Fig. 17.

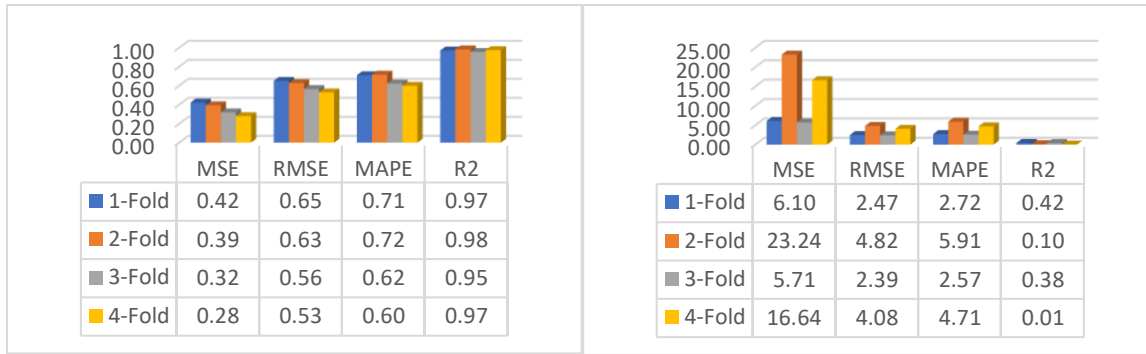


Figure 16. Learning performance of the system

Figure 17. Test performance of the system

6. Conclusion

The main purpose of the pantograph and catenary in rail system vehicles that provide electricity with electricity in railway systems is to provide energy to the system and to keep the current collection capacity of this energy at an optimum level. The general name of this system is called pantograph - catenary interaction system, and one of the most important parameters is to keep the force applied by the pantograph to the catenary within the desired limits and to control whether it travels within certain limits in a way that does not cause mechanical problems to the pantograph while navigating on the pantograph.

When a new electric rail line is installed, the line needs to be certified in terms of measuring the reliability of the line, it is checked whether it is safe to travel on the line by checking it periodically on the certified line. Considering that the line installed will be 100 km or more while conducting all these tests, it is undoubted that hundreds of thousands of data will be recorded in the system when tests are made with the measurement system. Controlling these hundreds of thousands of data manually by an operator will cause both troubles and mistakes, and it is obvious that this mistake will cause serious financial damages for the line, rail system vehicle, train operator and passenger. These negative situations will cause serious financial losses as well as irreparable consequences such as loss of passenger life.

After the measurement process is carried out, the next important step is the examination and processing of the data received. In the systems currently used, measurement data are sent to the company that produces the test system, and a certain fee is paid and transactions are made according to the results from that company. It is possible for the local user to access the data recorded by the test company because the company saves these data in a format that their software can read. In this study, the measurement results are recorded in csv format that can be accessed by everyone. The next step after saving the data is to interpret them by an expert personnel or even to determine if there is a malfunction. For this purpose, deep learning algorithms have been used and the training results have been successfully tested up to 99.4%.

Acknowledgement

This work has been supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under Grant EEEAG-118E322. (EEE-AG: Electrical Electronics Engineering Research Group).

References

- Akalp, O., Özbay, H., Efe, S.B. (2021). Design and Analysis of High-Efficient Driver Model for Led Luminaires, *Light & Engineering*, 29(2), 96–106.
- Bucca, G., Collina, A., (2009). A Procedure for the Wear Prediction of Collector Strip and Contact Wire in Pantograph–Catenary System, *Wear*, 266, 46–59.
- Boguslavskii, A.A., & Sokolov. S.M., (2006). Detecting Objects in Images in Real-Time Computer Vision Systems Using Structured Geometric Models, *Pleiades Publishing, Inc.*, 32, 177–18.
- Burrow, M., Ghataora, G., & Stirling, A. (2004). Rail research UK, Department of Civil Engineering, University Of Birmingham, A Rational Approach To Railway Track Substructure Design, Birmingham, UK.
- Carbonell, J.G. (1983). Learning by analogy, Formulating and generalizing plans from past experience, In *Machine learning*, 137-161. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Cengiz M. S., (2019). Thermal Design Calculations for LED Luminaires, *International Journal of Engineering Research and Development*, V11, #2, pp. 432–441.
- Cengiz M. S. (2018). Tünel Aydınlatma Sistemlerinde Aydınlik Düzeyi Toleransının Bakım Faktörüne Göre Saptanması, *International Journal of Engineering Research and Development*, V10, #2, pp. 69–75.

- Cengiz, M.S. (2013). Smart meter and cost experiment, *Przeglad Elektrotechniczny* 89(11), 206-209.
- Cengiz, MS. (2014). Evaluation of Smart Grids and Turkey, *Global Advanced Research Journal of Engineering, Technology and Innovation*. 3(7), 149-153.
- Cengiz, M.S. (2020). Effects of Luminaire Angle and Illumination Topology on Illumination Parameters in Road Lighting. *Light & Engineering*, 28(4), 47–56.
- Cengiz, M.S., & Cengiz, Ç. (2018). Numerical analysis of tunnel lighting maintenance factor. *International Islamic University Malaysia Journal*, 19(2), 154-163.
- Cengiz Ç., Cengiz M.S. (2021). Using Symmetric and Asymmetric Lens In Urban Lighting. II. International Halich Congress On Multidisciplinary Scientific Research, 29-30 October 2021, Istanbul.
- Cengiz Ç., Cengiz M.S. (2021). The Relationship Between Shadow and Visional Comfort in Indoor Areas. II. International Halich Congress On Multidisciplinary Scientific Research, 29-30 October 2021, Istanbul
- Cengiz, M. & Mamiş, M. (2015). Endüstriyel tesislerde verimlilik ve güneş enerjisi kullanımı, VI. Enerji Verimliliği Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi, 21-25, 4-6 Haziran 2015, Sakarya.
- Cengiz, M. & Mamiş, M. (2015). Solution Offers for Efficiency and Savings in Industrial Plants. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, 5(1) , 24-28.
- Cengiz, Ç., Cengiz, M.S., Yurci, Y., Kaynaklı, M., Parlakyıldız, Ş., İlcihan, Z. (2017). Realization of warming in lighting, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 12(6) Ver.II, 83-85.
- Çıbuk, M., & Cengiz M.S. (2020). Determination of Energy Consumption According to Wireless Network Topologies in Grid-Free, Lighting Systems. *Light & Engineering*, 28(2), 67–76.
- Doğru, A. Koymat, N., Civelek Z. (2021). Fuzzy Logic Controller for Energy Saving in Commercial Building LED Lighting Systems, *UMAGD*, 13(1), 22-31.
- Efe, S.B. (2018). UPFC Based Real-Time Optimization of Power Systems for Dynamic Voltage Regulation. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 116(3), 391-406.
- Efe, S.B., & Cebeci, M. (2013). Power Flow Analysis by Artificial Neural Network. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 2(6), 204-208.
- Eren, M., Yapıcı, İ., Yıldırım, S., Cengiz, Ç., Gencer, G., Palta, O., Aybay, E., Yurci, Y. (2017). Driver circuit effects in LED Lighting Systems, Realization of warming in lighting, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 12(6) Ver.III, 1-4.
- Erşin, H. (2015). Raylı Ulaşımında Enerji Hesabı ve Katener Dizaynı.
- Ertuğrul, Ö.F., & Tağluk, M.E. (2017). A novel machine learning method based on generalized behavioral learning theory. *Neural Computing and Applications*, 28(12), 3921-3939.
- Ertuğrul, Ö.F., & Tağluk, M.E. (2016). A novel machine learning method based on generalized behavioral learning theory. *Neural Comput Appl*. 28, 39-21.
- Ertuğrul, Ö.F. (2018). Two novel versions of and omized feed forward artificial neural networks, stochastic pruned stochastic. *Neural Processing Letters*, 48(1), 481-516.
- European St., & ards-BS EN 50317,012 Railway applications. Current collection systems. Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line, ISBN, 9780580707803, 2012-02-29.
- Facchinetti, A., & Bruni, S. (2012). Hardware-in-the-loop Hybrid Simulation of Pantograph–Catenary Interaction, *Journal of Sound and Vibration*, June, 2783-2797.
- Kaynaklı, M., Palta, O., Cengiz Ç. (2018). Solar Radiation and Temperature Effects on Agricultural Irrigation Systems, *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, 6(1), 53-58.
- Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., & Schneider, E. (2009). *Contact Lines for Electric Railways, Planning, Design, Implementation, Maintenance*, Publicis Corporate Publishing.
- Michalski, R.S., Mozetic, I., Hong, J., & Lavrac, N. (1986). The multi-purpose incremental learning system, AQ15 its testing application to three medical domains. *Proc. AAAI 1986*, 10-41.
- Matvejevs (2010). Pantograph-Catenary System Modeling Using Matlab-Simulink Algorithms, *Scientific Journal of Riga Technical University Computer Science. Information Technology and Management Science*, 38-44.

- Midya, S., Bormann, D., Schütte, T., & Thottappillil, R. (2009). Pantograph Arcing in Electrified Railways-Mechanism and Influence of Various Parameters-Part I, With DC Traction Power Supply, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24, 1931-1939.
- O'Donnell, C., Palacin, R., & Rosinski, J. (2006). Pantograph Damage and Wear Monitoring System, *The Institution of Engineering and Technology International Conference on Railway Condition Monitoring*, 29-30 Nov., Birmingham, Engl. 178-181.
- Östlund, S., Gustafsson, A., Buhrkall, L., & Skoglund, M. (2008). Condition Monitoring of Pantograph Contact Strip, *Railway Condition Monitoring*, 4th IET International Conference, 1-6.
- Palta, O., Yıldırım, S., Yapıcı, İ., Eren, M., İlcihan, Z., Aybay, E., Gencer, G. (2017). Cost Comparison in Lighting and Selection Criteria in Leds, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 12(6) Ver.III, 5-10.
- Parlakyıldız, Ş., Gençoğlu, M.T., & Cengiz, M.S. (2020). Analysis of Failure Detection and Visibility Criteria in Pantograph-Catenary Interaction. *Light & Engineering*, 28(6).
- Parlakyıldız, Ş., Gençoğlu, M.T., & Cengiz, M.S. (2018). Development of Rail Systems, *International Conference on Multidisciplinary, Science, Engineering and Technology*.
- Parlakyıldız, Ş., Gençoğlu, M.T., & Cengiz, M.S. (2020). Electric Train Application Study for Catenary-Pantograph Interaction, *European Journal of Science and Technology*, (20), 506-515.
- Schöar, R. (2013). Active Control of the Pantograph-Catenary Interaction in a Finite Element Model, Master Thesis, Division of Rail Vehicles Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm and Institute for Dynamic Systems and Control Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich.
- Song, Y., Liu, Z., Rannquist, A., Navik, P., & Liu, Z. (2020). Contact Wire Irregularity Stochastics and Effect on High-speed Railway Pantograph-Catenary Interactions. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.
- Taran, M.F., R-Ayerbe P., Olaru, S., & Ticlea, A. (2013). Moving Horizon Control and Estimation of a Pantograph-Catenary System, *17th International Conference System Theory Control Computing*, 527-532.
- Taşdan, S.G. (2015). Yüksek Hızlı Tren Uygulamalarında Elektrik Besleme Sistemlerinin İncelenmesi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 255 s.
- Yaylak, M., Kaynaklı, M., Ceylan, H., Cengiz, M.S., Aybay, E. (2017) Academic Study Trends in Engineering and Basic Science, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 12(6) Ver.III, 49-55.
- Zhang, W., Zou, D., Tan, M., Zhou, N., Li, R., & Mei, G. (2018). Review of pantograph and catenary interaction, *Front. Mech. Eng.*, 13(2), 311-322.
- Wang, Z., Guo, F., Chen, Z., Tang, A., & Ren, Z. (2013). Research on Current-carrying Wear Characteristics of Friction Pair in Pantograph Catenary System, *59th Holm Conference on Electrical Contacts*, 15.
- Wu, G., Wei, W., Gao, G., Wu, J., & Zhou, Y. (2016). Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph-catenary system, *J. Mod. Transport*, 24(2), 132-138.
- Xiaodong, Z., & Yu, F. (2011). Active Self-Adaptive Control of High-Speed Train Pantograph, *Power Engineering Automation Conference*, 3, 152 - 156.
- Xiao-Heng, Z., Xiao-rong, G., Ze-yong, W., Li, W., & Kai, Y. (2010). Study on the Edge Detection and Extraction Algorithm in the Pantograph Slipper's Abrasion, *International Conference on Computational and Information Sciences*, 474 - 477.



Sıcaklık ve Deformasyon Hızının Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi

Investigation of the Effect of Temperature and Strain Rate on Mechanical Properties

Süleyman Kılıç^{1*}, Mehmet Fatih Demirdöğen²

¹Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 40100, Kırşehir, Türkiye

²Uygurlar Makina, Organize Sanayi Bölgesi, 40100, Kırşehir, Türkiye

Başvuru/Received: 27/08/2021

Kabul / Accepted: 11/03/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Çekme testi, malzemenin kopana dek tek ekseninde çekildiği ve buradan elde edilen verilerden, malzemeyi tanımamızı sağlayan en temel ve basit testlerden biridir. Malzemeleri tanıırken onların farklı sıcaklık ve deformasyon hızları altındaki davranışları da önem arz etmektedir. Özellikle, imalat sanayinde çok farklı üretim ve şekillendirme yöntemleri vardır ve her birinin kendine has özellikleri mevcuttur. Örneğin, sıcak yapılan çekme deneyleri ile malzemenin mekanik özellikleri belirlenmekte ve buradan elde edilen bilgilerle başarılı sıcak derin çekme işlemleri yapılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında çelik, titanyum, alüminyum ve nikel alaşımlarında sıcaklık ve deformasyon hızının çekme özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çeliklerde, sıcaklık artışının mukavemeti ve sünekliği düşürücü bir etkisi bulunmaktadır. Yaklaşık 300 °C sıcaklığının üstünde ise süneklik artışı olduğu görülmektedir. Oda sıcaklığında deformasyon hızının etkisi olmazken, yüksek sıcaklıklarda etkisi ortaya çıkmaktadır. Titanyum alaşımlarında sıcaklık, iç yapıda meydana gelen deformasyon mekanizmasını etkilediği için önemli bir parametredir. Alüminyum alaşımlarında, deformasyon hızından ziyade deformasyon sıcaklığının etkili parametre olduğu belirtilmektedir. Nikel alaşımlarında ise sıcaklık ve deformasyon hızı, mukavemeti etkilerken süneklik üzerinde etkili olmadığı görülmektedir. Yapılan incelemelerde, bu malzemeler için sıcaklık ve deformasyon hızının, gerilme ve süneklik üzerinde oldukça etkili oldukları görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

“Deformasyon hızı, Sıcaklık, Çelik, Titanyum, Alüminyum, Nikel alaşımları”

Abstract

The tensile test is one of the most basic and simple tests in which the material is pulled in a single axis until it breaks, and from the data obtained from this, we can identify the material. While recognizing materials, their behavior under different temperatures and deformation rates is also important. In particular, there are many different production and shaping methods in the manufacturing industry, and each has its own characteristics. For example, the mechanical properties of the material are determined by hot tensile tests and with the information obtained from this, successful hot deep drawing operations can be performed. In this study, the effects of temperature and deformation rate on tensile properties have been investigated in steel, titanium, aluminum and nickel alloys. In steels, temperature increase has a decreasing effect on strength and ductility. It is observed that ductility increase occurs above the temperature of approximately 300 °C. While deformation rate has no effect at room temperature, its effect occurs at high temperatures. Temperature in titanium alloys is an important parameter as it affects the deformation mechanism in the internal structure. It is stated that in aluminum alloys, the deformation temperature is the effective parameter rather than the deformation rate. In nickel alloys, it is seen that temperature and deformation rate affect the strength but not the ductility. In the examinations made, it has been seen that the temperature and deformation rate for these materials are quite effective on the stress and ductility.

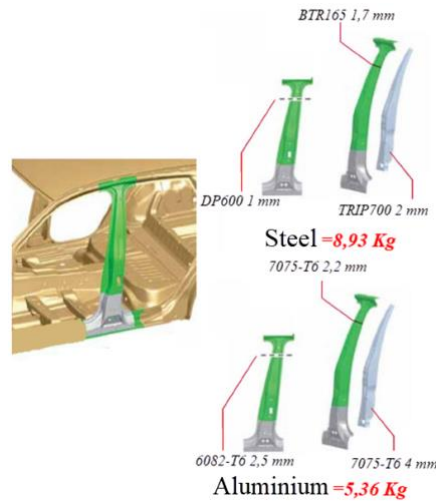
Key Words

“Strain rate, Temperature, Steel, Titanium, Aluminum, Nickel alloys”

1. Giriş

İnsanlık tarihi çağlar aştıkça ihtiyaç duydukları araç gereçleri imal etmek üzere doğadaki malzemelerden faydalanmıştır. İnsan yeryüzündeki çeşitli maden ve hammaddeleri keşfettikçe, zekâ ve kabiliyetini kullanarak yeni araç ve ekipman imalatını gerçekleştirmiştir. Yeri geldiğinde malzemeyi ısıtarak şekil vermiş, yeri geldiğinde daha fazla yük uygulayarak. Bugüne baktığımızda endüstri ve sanayide birçok farklı malzeme kullanılmaktadır. Elbette burada kullanılan malzemeler, yılların birikimi olan araştırma ve tecrübelerle dayanmaktadır. Tasarım aşamasında malzemeyi seçmeden önce malzemeyi tanıyarak, operasyon sırasında vereceği tepki ve göstereceği davranışların bilinerek prosese uygun olup olmadığına karar verilir. Malzeme istenen değerleri vermediğinde, bu değerleri elde etmek için araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Özellikle sıcaklık ve deformasyon hızının malzemenin mekanik özelliklerine etkilerinin incelenmesi üzerine birçok çalışma yapılmaktadır.

Geçmişten günümüze otomotiv sektöründe gerek malzeme gerekse yakıt teknolojisinde birçok gelişme olmuştur. Yakıt maliyetlerinin artması sonucu araçlar hafifletilerek hem yakıt maliyeti düşürme hem de çevreye salınan zararlı gazları önlenmesi amaçlanmaktadır. Araç şasesinde yapılan hafifletme çalışmalarında yoğunluğu fazla olan çelik malzemelerden yoğunluğunun az olması sebebiyle alüminyum malzemeye doğru bir geçiş söz konusudur. Özellikle yaşlandırma uygulanan alaşımlarda mekanik özelliklerin iyi değerlendirilmesiyle aynı mukavemet değerinde hafifletme sağlanmaktadır (Şekil 1) (Altan&Long, 2015). Fakat alüminyum alaşımlarına plastik şekil verme işleminde çeşitli sorunlarla karşılaşmaktadır. Plastik şekil verme yeteneğini geliştirmek üzere sıcaklık artırılarak deneysel çalışmalar yapılmaktadır (Kilic, 2019; Liu et al. , 2020; Simonetto et al. , 2020; Attar et al. , 2021).



Şekil 1. Mekanik özellikleri kullanarak hafifletme sağlanması (Altan&Long, 2015).

Malzemelerin çalışma koşullarına bağlı olarak sahip olmaları istenilen özellikler belirlenmekte ve uygun malzeme seçimiyle birlikte malzemelerin mekanik özelliklerinde iyileştirme çalışmaları devam etmektedir. Malzemeyi tanımak ve test etmek adına birçok yöntem kullanılmaktadır. İmalat sanayide kullanılan malzemelerden çeliklere baktığımızda demir karbon alaşımı olarak tanımlanır. Çelikler yüklerle karşı dayanıklı ve sertlik değerleri yüksektir. Kimyasal içerikleri açısından alaşımsız ve alaşımlı çelikler olarak ayrılırlar (Borek et al. , 2019). Petrol ve doğalgaz endüstrisinde açılan kuyularda kullanılan malzemeler de yüksek mukavemete ve korozyona dayanıklı olması gerekmektedir. Bu alanda TWIP çeliği hakkında incelemeler yapılmaktadır (Haïtao et al. , 2020). Dünyadaki enerji ihtiyacı giderek artmakla birlikte, bu enerji ihtiyacını karşılamak için yeni enerji santralleri faaliyete geçirilmektedir. Santrallerde kullanılan malzemeler yüksek sıcaklıklarda stabil mekanik özellikler göstermek zorundadırlar. Bu alanda kullanılabilmesi adına G115 çeliği adı verilen 9Cr-3W-3Co çeliği üzerinde çalışmalar yapılmaktadır (Alsagabi et al. , 2018). Havacılık endüstrisinde ise, yeni seri Alüminyum Lityum alaşımları geliştirilmiş ve kullanım alanlarına göre mekanik özellikleri incelenmektedir (Kilic et al. , 2019). Görüleceği üzere ihtiyaçlar neticesinde yeni malzemeler geliştirilmekte ve bunların kullanım alanlarına göre özellikleri araştırılmaktadır.

İmalat sanayinde, özellikle metal şekillendirme işlemlerinde, malzemenin mekanik özelliklerinin bilinmesi önemlidir. Metal şekillendirme işlemlerinde malzeme plastik olarak deformasyona uğratılmaktadır. Malzemeyi plastik deformasyona uğratabilmek için uygulanan kuvvetin, malzemede akma gerilmesini geçirmesi gerekmektedir. Başarılı ve hatasız bir plastik deformasyon yapılabilmesi için malzemelerin düşük akma mukavemetine sahip olmaları ve özellikle karmaşık parçalar için sünekliğin yüksek olması gerekmektedir. Akma mukavemeti ve süneklik, sıcaklık ve deformasyon hızından oldukça etkilenmektedir (Ozturk et al. , 2009; Ozturk, 2010; Toros et al. , 2011). Genel olarak sıcaklık artışı malzemenin akma mukavemetini düşürürken sünekliğini artırmaktadır. Bunun nedeni ise, yüksek sıcaklıklarda yeniden kristalleşme gerçekleşmesidir. Bunun neticesinde, yeni dislokasyonlar oluşmadığından, dislokasyon yoğunluğu azalarak mukavemeti düşürmektedir. Sıcaklık artışı aynı zamanda malzeme içerisindeki kusurları da artırmaktadır. Sıcaklık azalışı ise, malzemede pekleşme oluşturmakta ve bu nedenle mukavemet artarken, sünekliği azaltmaktadır. Uygulanan kuvvetin etkisiyle yeni dislokasyonların oluşması ve bunların hareketlerinin engellenmesiyle mukavemet artışına pekleşme denilmektedir. Deformasyon hızının artmasıyla beraber, mukavemetin arttığı da yine bilinen bir olgudur. Bu artışın temelinde hızla duyarlı mekanizmalar vardır. Bazı durumlarda dislokasyonlar engellerle karşılaştığında, bunları tırmanma (climb) mekanizması gibi

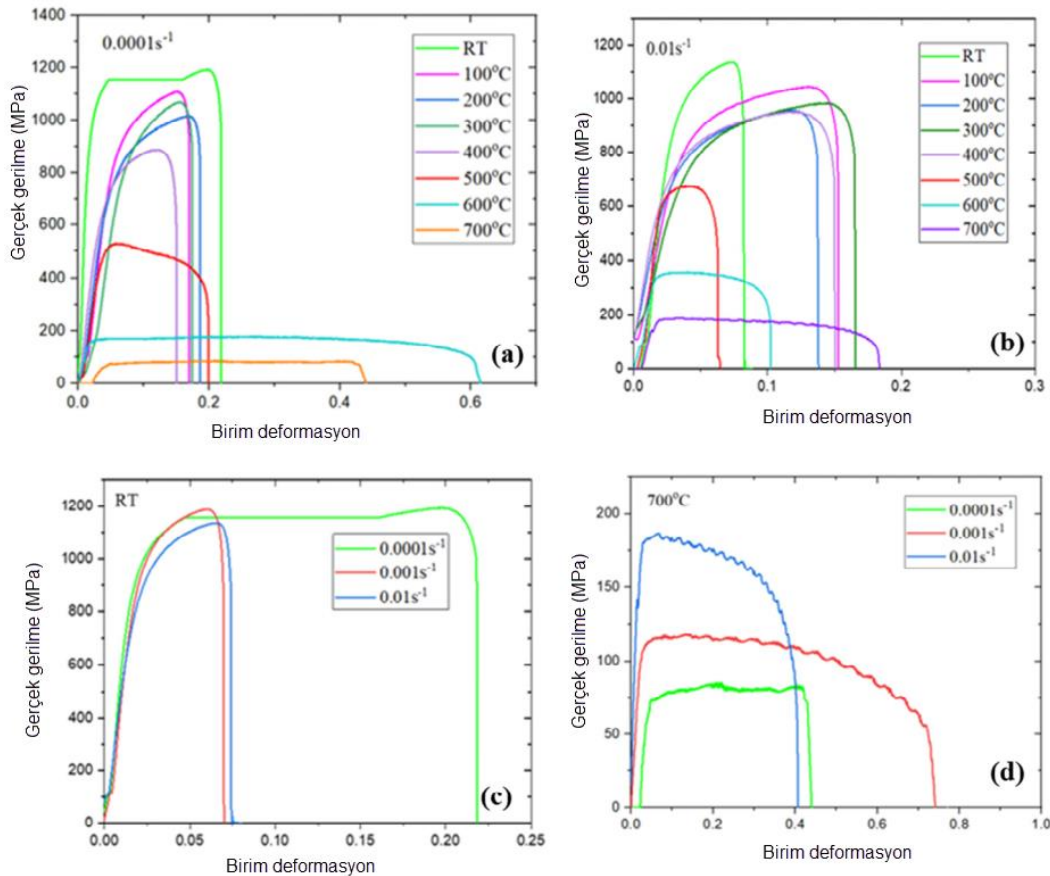
mekanizmalar ile geçmeye çalışırlar. Tırmanma mekanizmasının da gerçekleşebilmesi için zamana ihtiyacı olduğundan eğer yeterli zaman tanınmazsa dislokasyonları geçmeye zorlanacağından mukavemet artmaktadır. Mukavemeti artırmada önemli aktörlerden olan dislokasyon hareketinin kısıtlanması, deformasyon hızında önemli bir rol üstlenmektedir. Bir diğer önemli etkende tane sınır kaymasıdır. Yüksek sıcaklıklarda ve çok düşük deformasyon hızlarında taneler birbiri üzerinde kayarak yer değiştirdiğinden, sünekliğin artmasına neden olurlar.

Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi genellikle çekme deneyi yardımıyla yapılmaktadır. Tek eksenli çekme testi, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlı malzeme davranışını karakterize etmek için yaygın olarak kullanılan basit bir yöntemdir. Tek eksenli çekme işleminin yanında gelişmiş deney cihazları ile çift eksenli çekme testleri yapılmaktadır. Bu cihazlarda bulunan termal kabinler sayesinde soğuk ve sıcak deneyler yapılabilmektedir. Örneğin Zwick (Zwick, 2021) marka termal kabinde $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar, Shimadzu (Shimadzu, 2021) marka termal kabinde ise $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar deneyler yapılabilmektedir. Soğutma işleminde sıvı nitrojen kullanılmaktadır. Isıtma işlemi ise, kabin içerisinde yer alan rezistanslar yardımıyla yapılmaktadır. Bu kabinlerin en önemli özelliklerinden birisi de çok kısa süre (yaklaşık 20 dakika) içerisinde sınır sıcaklıklara ulaşabilmeleridir.

Bu çalışmada, imalat sanayinde yaygın olarak kullanılan çelik, titanyum, alüminyum ve nikel alaşımlarında deformasyon hızı ve sıcaklığın mekanik özelliklerine etkileri ele alınmış olup, üzerinde çalışılan makaleler derlenmiştir. Bu malzemelerin deformasyon sıcaklığına ve hızına karşı göstermiş oldukları davranışlar açıklanmıştır.

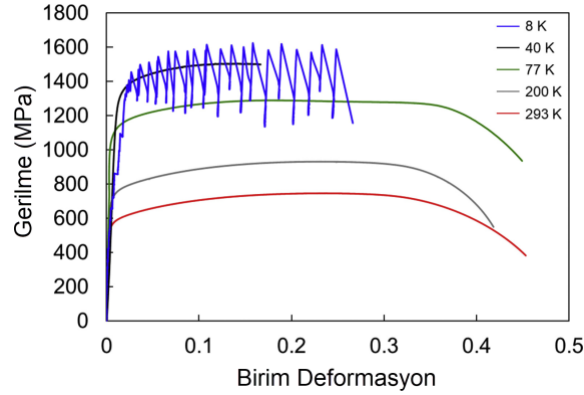
2. Çeliklerde Etkiler

Otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan DP590 çeliğinde (Dual Phase: çift fazlı) farklı deformasyon sıcaklığı ve deformasyon hızlarının etkisinin incelendiği bir çalışmada (Pandre et al. , 2019), iç yapıdaki ferrit ve martenzit fazının etkisiyle, akma mukavemetinin sıcaklık ve deformasyon hızından önemli ölçüde etkilendiği ifade edilmiştir (Şekil 2). Oda sıcaklığı ile $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkları arasında yapılan çekme deneylerinde, sıcaklığın artmasıyla her iki deformasyon hızında da akma mukavemetinde önemli oranda azalma meydana gelmiştir. Oda sıcaklığında deformasyon hızının akma mukavemetine etkisi yok denecek kadar azken, yüksek sıcaklıklarda etkisi de artmaktadır. $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ deformasyon sıcaklığının üzerinde iç yapıda meydana gelen etkilerin hızlandığı ve birim deformasyon eğrisinde daha belirgin hale geldiği ifade edilmiştir.



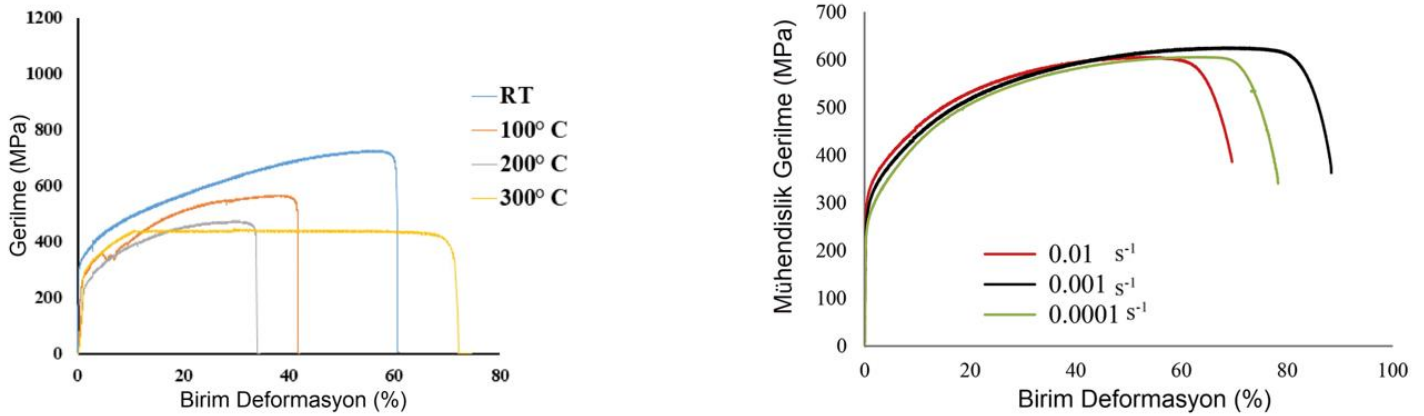
Şekil 2. DP590 çeliğinde deformasyon sıcaklığı ve hızının gerilme birim deformasyon eğrisine etkisi (Pandre et al. , 2019). Paslanmaz çeliklerin bir ailesi olan dubleks paslanmaz çeliğinde iç yapı, eşit oranda östenit (YMK-FCC) ve ferrit (HMK-BCC) fazından oluşmaktadır. Koga ve arkadaşları da (Koga et al. , 2021), kriyojenik sıcaklıkların dubleks çeliğinin mekanik özelliklerine

etkisini incelemişlerdir. 77 K (-196 °C) ile 293 K (20 °C) arasında yapılan çekme deneylerinde toplam deformasyon miktarı değişmezken, sıcaklık düştükçe oluşan gerilme miktarının arttığı görülmüştür (Şekil 3). Deformasyona bağlı martenzit hacim oranı 77 ve 8 K’ de yüksekken, 40 K da düşük olduğu ve bununla toplam uzama miktarıyla ilişkili olduğu belirtilmiştir. Bunun yanında 40 K’ sıcaklığında gevrek kırılma gerçekleşirken, diğer bütün sıcaklıklarda sünek kırılma tipi meydana gelmiştir. 8 K sıcaklığındaki dikkat çekici tırtık oluşumu ise deformasyon bölgesindeki ani sıcaklık artışından dolayı deformasyona bağlı martenzitin hacminde artışı meydana geldiğini ve bununla tırtıklı bir yapı oluşturduğunu ifade edilmiştir.



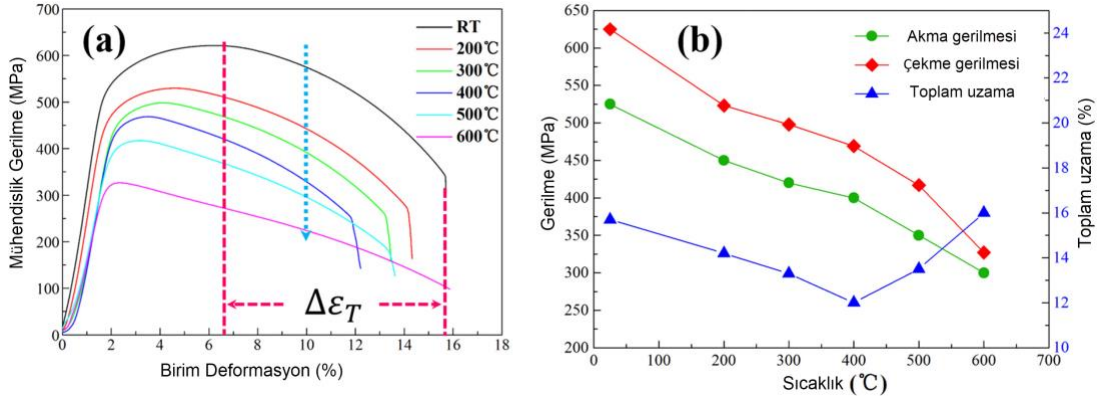
Şekil 3. Farklı sıcaklıklarda dubleks çeliğinin gerilme birim deformasyon eğrisine etkisi (Koga et al. , 2021).

Kori ve arkadaşları (Kori et al. , 2020), 304 kalite östenitik paslanmaz çeliğinin farklı sıcaklıklardaki şekillendirilebilirlik özelliklerini incelemiştir. Sıcaklık arttıkça malzemede gerilmenin düştüğü görülmüştür (Şekil 4.a). Yapılan sıcak deneylerde ise akma gerilmesi değişmezken, sünekliliğin 300 °C oldukça arttığı görülmüştür. 300 °C sıcaklığının malzeme için şekillendirilebilirliğinin daha iyi olduğu vurgulanmıştır. Kundu ve arkadaşları da (Kundu et al. , 2020), deformasyon hızının etkisini incelemişlerdir. Ortalama geometrik dislokasyon yoğunluğu ve deformasyonun neden olduğu martenzit miktarı, artan plastik deformasyonla birlikte beklenenden daha hızlı arttığı gösterilmiştir. Artan deformasyon hızı ile ortalama geometrik dislokasyon yoğunluğunun arttığını göstermişlerdir. Şekil 4.b’de deformasyon hızı artışının mukavemeti çok fazla etkilemese de sünekliliği etkilediği görülmektedir.

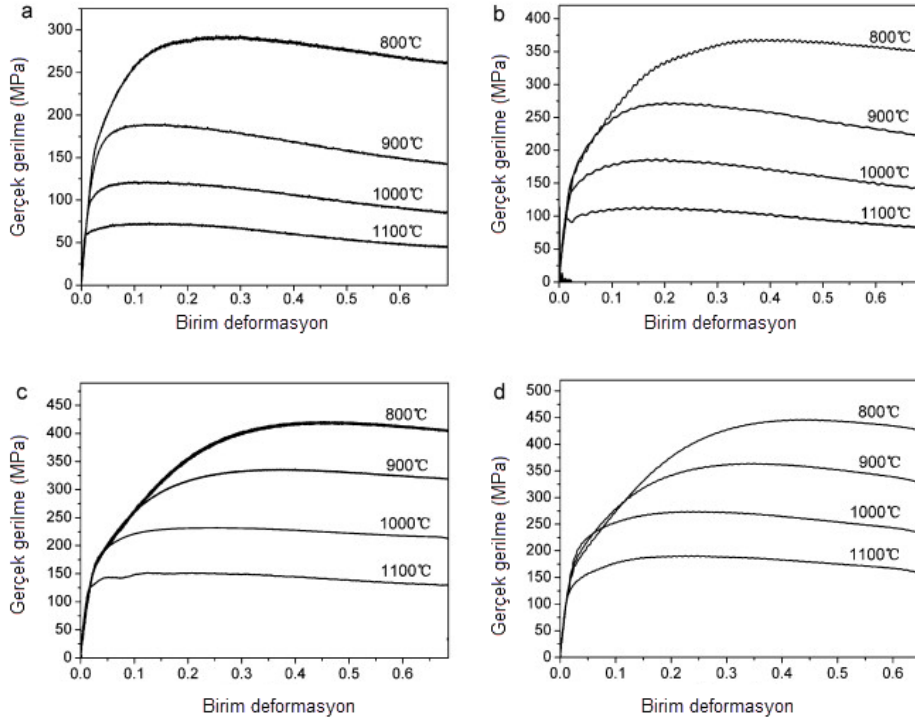


Şekil 4. (a) 304 kalite östenitik paslanmaz çeliğinin farklı sıcaklıklardaki gerilme birim deformasyon eğrisi (Kori et al. , 2020), (b) 304 kalite östenitik paslanmaz çeliğinde deformasyon hızının etkisi (Kundu et al. , 2020).

Ferritik-Martenzitik bir çelikte (9Cr-1.7W-0.1C) farklı sıcaklıkların çekme davranışına etkisi incelenen bir çalışmada (Mao et al. , 2018), sıcaklık artışı ile akma ve çekme mukavemetinin düştüğü, sünekliliğin ise 600 °C hariç düştüğü gösterilmiştir (Şekil 5). Ara sıcaklıklarda sünekliliğin azalmasının nedeni olarak çözünen atomlar ve kafes sınırları ile etkileşim mekanizması altında dislokasyon dağılımının değişmesinin ana neden olduğu söylenmiştir. Sıcaklık ve deformasyon hızının, dinamik gerilim yaşlanması olayının çekme deformasyonu davranışı üzerindeki etkileşim yoğunluğunu, kafes sınırlarındaki dislokasyon birikimini değiştirerek etkilediğini vurgulamışlardır.

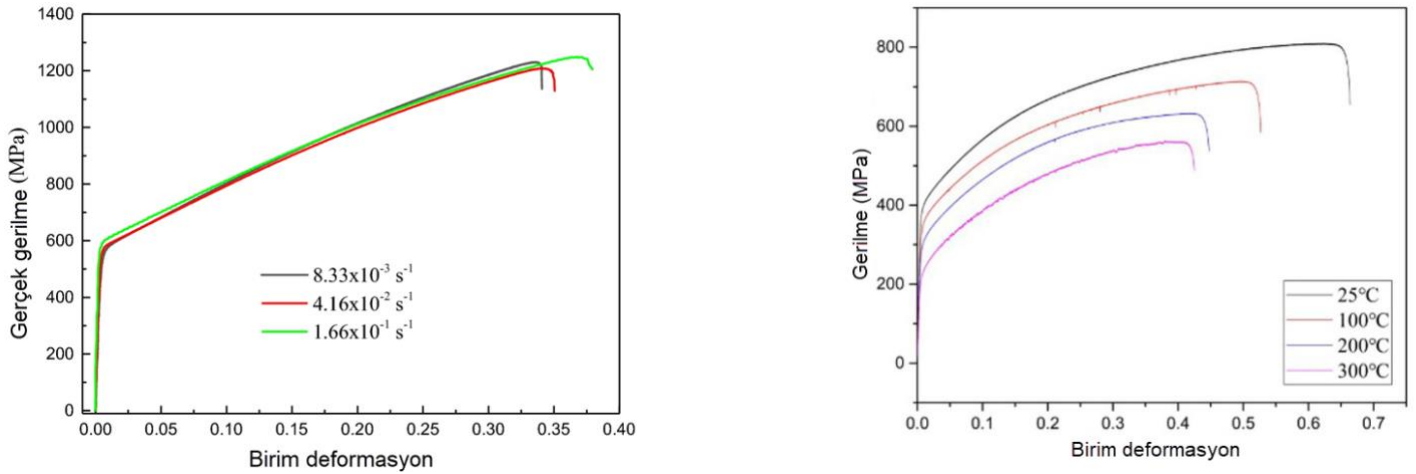


Li ve arkadaşları (Li et al. , 2011), TWIP çeliğinde sıcaklık (800- 1100 °C) ve deformasyon hızının (0,05- 5 s⁻¹) etkilerini araştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada, sıcaklık artışının mukavemeti önemli ölçüde düşürdüğünü, deformasyon hızındaki artışın ise az miktarda mukavemet artışı sağladığı gösterilmiştir (Şekil 7). Sıcaklık artışının dinamik yeniden kristalleşmeyi önemli miktarda etkilediğini ifade etmişlerdir.



Şekil 7. Fe-25Mn-3Si-3Al (TWIP) çeliğinde sıcaklık ve deformasyon hızının etkisi, (a) 0,01 s⁻¹, (b) 0,1 s⁻¹, (c) 1 s⁻¹, (d) 5 s⁻¹ (Li et al. , 2011).

Kılıç ve arkadaşları (Kilic&Ozturk, 2017; Kilic et al. , 2018), farklı deformasyon hızlarında TWIP900 çeliğini çekme testine tabi tutmuşlardır. Deformasyon hızının TWIP900 çeliğinde çok fazla etkisi olmadığını göstermişlerdir (Şekil 6.a). Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan akma eğri fonksiyonlarının TWIP çeliğinde özel olarak seçilmesi gerektiğini göstermişlerdir. Xue ve arkadaşları (Haitao et al. , 2020), TWIP (0.21C; 25Mn; 0.9Si; 1.8Al) çeliğinde sıcaklığın etkilerini incelemişlerdir. Diğer malzemelerin aksine, sıcaklığın artmasıyla akma mukavemeti ve sünekliliğin beraber düştüğünü göstermişlerdir (Şekil 6.b). TWIP çeliğinin deformasyondan önce ve sonra tek fazlı östenit yapısını koruduğunu, deformasyon ikizlerinin artan sıcaklıkla beraber azaldığını, artan sıcaklık nedeniyle istiflenme hata enerjisinin yükselerek ikizlenmeyi engellediği ve dislokasyon kaymasının başlıca deformasyon mekanizması haline geldiğini vurgulamışlardır.



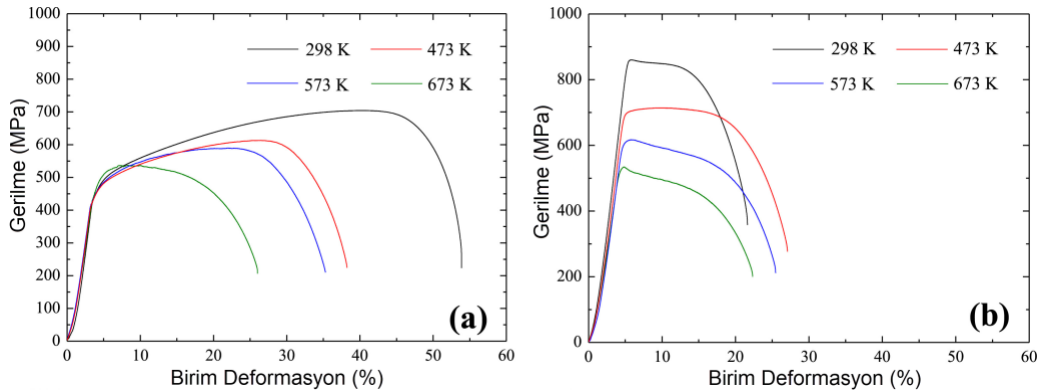
Şekil 6. (a) TWIP900 çeliğinde deformasyon hızının etkisi (Kilic et al. , 2018), (b) TWIP çeliğinde sıcaklığın etkisi (Haitao et al. , 2020).

Çeliklerde, malzemenin iç yapısına bağlı olarak deformasyon hızı ve sıcaklığın etkisi oldukça değişken olduğu görülmüştür. Oda sıcaklığında deformasyon hızının etkisi olmazken, deformasyon sıcaklığının artışı ile etkisi de artmaktadır. Sıcaklık artışı mukavemeti düşürürken, yaklaşık 300 °C sıcaklığına kadar sünekliği azaltıcı etki göstermektedir. Bunun nedenin çözünen atomlar ve kafes sınırlarıyla etkileşimden dolayı dislokasyon yoğunluğunun değişmesi olduğu söylenmektedir. Deformasyon hızının artmasının da akma mukavemeti üzerinde çok fazla etkili olmadığı görülmüştür.

3. Titanyum Alaşımlarında Etkiler

Titanyum alaşımları, iç yapılarına bağlı olarak sıcak şekillendirme işlemlerinde farklı deformasyon mekanizmalarına sahip olabilmektedirler. Bu nedenle titanyum alaşımları için sıcaklık aralıkları önem arz etmektedir. Literatürde yer alan farklı titanyum alaşımlarında, sıcaklık ve deformasyon hızlarının etkileri araştırılmıştır.

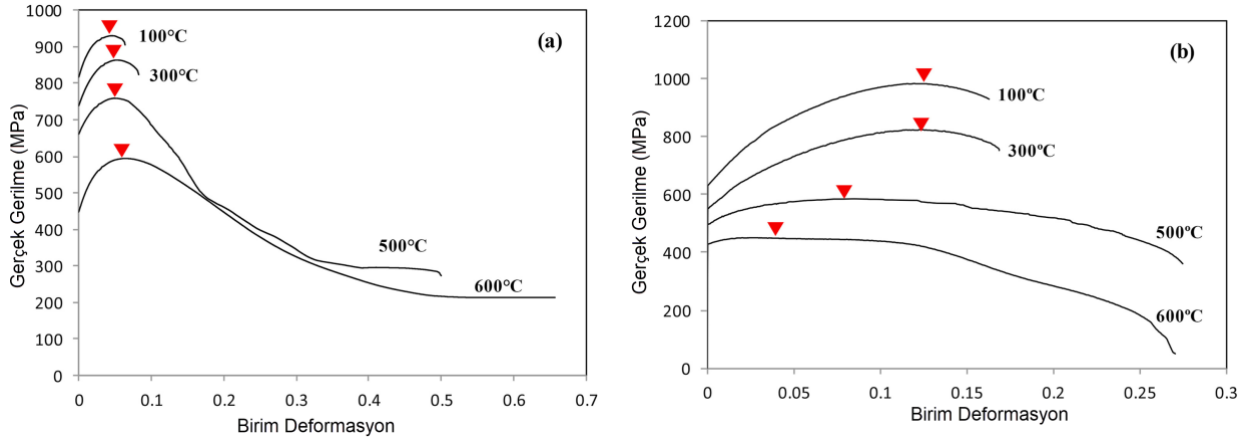
İki farklı titanyum alaşımında (Ti-15Mo ve Ti-15Mo-1Fe) deformasyon sıcaklığının etkileri araştırılan bir çalışmada (Yao et al. , 2019), 298 K (25 °C) ile 673 K (400 °C) sıcaklıkları arasında incelemeler yapılmıştır. Çekme deneyi hızı olarak 0,5 mm/dak hızı kullanılmıştır. Ti-15Mo alaşımında ikizlenme etkisi, Ti-15Mo-1Fe alaşımında ise, kayma dislokasyonu ile deformasyon meydana geldiği belirtilmiştir. Akma dayanımı, Ti-15Mo da nispeten sabit kalırken, Ti-15Mo-1Fe alaşımında ise sıcaklığın artmasıyla beraber akma dayanımının düştüğü görülmüştür (Şekil 8). İyapıdaki ω çökeltisinin β fazını etkilemesiyle, ikizlenme mekanizması ile kayma dislokasyonunun plastik deformasyona etkisinin arttığı; bununda Ti-15Mo alaşımında termal yumuşama etkisinin önüne geçtiği ifade edilmiştir. Bu etkinin bir sonucu olarak da birim deformasyon miktarının artması olarak görmekteyiz. Sıcaklığın, oluşan deformasyon türleri üzerinde de etkili olduğu söylenmiştir.



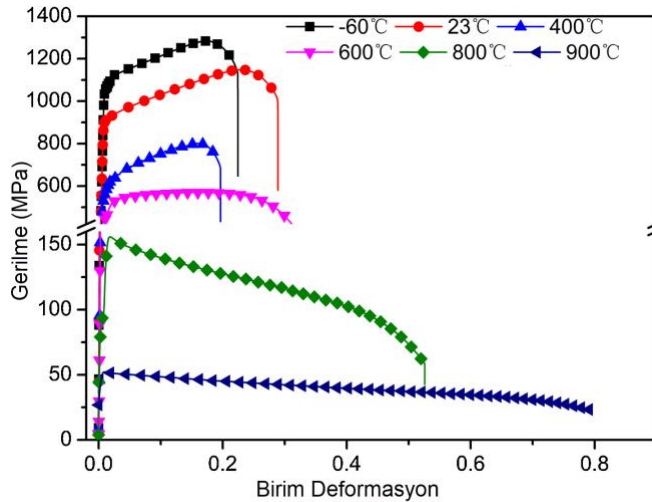
Şekil 8. (a) Ti-15Mo, (b) Ti-15Mo-1Fe alaşımları çekme deneyi sonuçları (Yao et al. , 2019).

Zang ve arkadaşları (Zang et al. , 2021), Ti-15Mo-2Al alaşımında kriyojenik sıcaklıklarda mekanik özelliklerini incelemiştir. Yüksek saflıkta yarı kararlı β -Ti alaşımı, 77 ve 20 K'da yüksek çekme mukavemeti değerlerine sahip olduğu, 77 K sıcaklığında çekme mukavemetinin yaklaşık iki kat artmasına rağmen hala sünekliğini koruduğunu göstermiştir. Bunun nedeni deformasyon sırasında oluşan ikizlerin neden olduğu dinamik Hall-Patch etkisinin, sürekli pekleşme sağlamalarından dolayı olduğu ifade edilmiştir. 20 K sıcaklığında ise, düzensiz plastik akış meydana gelmiş ve çok düşük süneklik meydana gelmiştir. Tırtıklı deformasyonun ise, dislokasyon ve ikizlerin aralıklı aktivasyonundan kaynaklandığı belirtilmiştir.

Paghandeh ve arkadaşları (Paghandeh et al. , 2021), Ti-6Al-4V alaşımında sıcaklığın etkilerini incelemiştir. Bu doğrultuda 100, 300, 500, 600 °C sıcaklıklarında 0,001 s⁻¹ deformasyon hızında çekme ve basma deneyleri yapmışlardır. 100 ve 300 °C sıcaklıklarında basma deneyinde erken kırılma tespit edilmiş, bunun nedeni olarak ise; yetersiz kayma sisteminin kaynaklandığı belirtilmiştir. Bunun aksine bu sıcaklıklardaki çekme işleminde ise pekleşme kapasitesi artıp düzgün uzama miktarında etkili olduğu belirtilmiştir. 500 ve 600 °C ise basmada ve çekmede, akma yumuşaması görülmüştür (Şekil 9). Bunun nedeni ise; dinamik toparlanma, yeniden kristalleşme, yumuşama olduğu ifade edilmiştir. Despax ve arkadaşları da (Despax et al. , 2020), 750 ve 920 °C sıcaklıklarındaki mekanik özelliklerin değişimini incelemiştir. 750 °C sıcaklıkta yüksek deformasyon hızlarındaki deformasyon özelliği esas olarak iç yapıdaki α fazının dislokasyon aktivitesi etkinken, düşük deformasyon hızlarında α ve β fazlarının dislokasyon aktivitesi etkin olduğu söylenmektedir. Bunun aksine, 920 °C sıcaklıkta tane sınırı kaymasının etkin mekanizma olduğu ifade edilmiştir. Jiang ve arkadaşları (Jiang et al. , 2020), artan sıcaklık ve azalan deformasyon hızı ile birlikte gerilmenin düştüğü gösterilmiştir. Bunun nedeni ise; yüksek sıcaklığın ve düşük deformasyon hızının, kayma dislokasyonu ve enerji birikimi için yeterli kuvvet ve zaman sağlaması olarak ifade etmişlerdir.



Şekil 9. Ti-6Al-4V alaşımında farklı sıcaklıkların gerilme birim deformasyon eğrisine etkisi. (a) Basma, (b) Çekme (Paghandeh et al. , 2021).



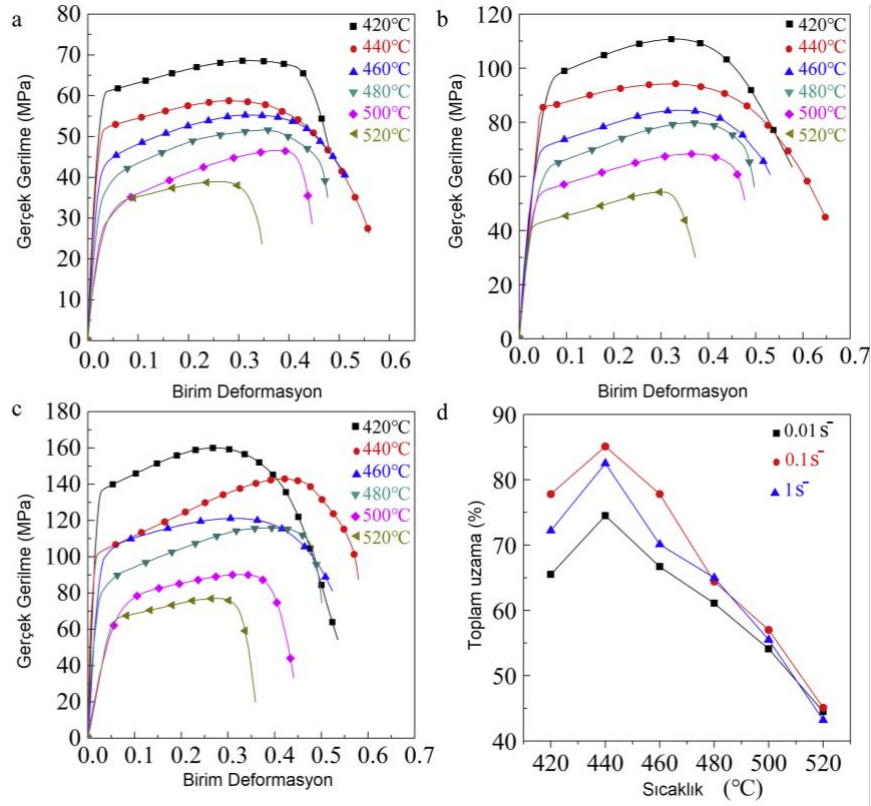
Şekil 10. Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V alaşımında sıcaklığın gerilme birim deformasyon eğrisine etkisi (Hao et al. , 2020).

Hao ve arkadaşları (Hao et al. , 2020), Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V alaşımında -60 °C ile 900 °C sıcaklıkları arasındaki 0,001 s⁻¹ deformasyon hızında mekanik özelliklerin değişimini incelemiştir. Uygulanan koşullara göre deformasyon tiplerinin değiştiğini vurgulamışlardır. Düşük sıcaklıklarda (400 °C'ye kadar) kayma dislokasyonu mekanizması yoğunlukta olmakla birlikte ikizlenme mekanizması da tespit edilmiştir. 600 °C den sonra dinamik yeniden kristalleşme ve küreselleşmeyle yumuşamaya neden olduğu tespit edilmiştir. Şekil 10.'da görüldüğü gibi sıcaklığın artmasıyla mukavemet düşerken süneklik artmıştır.

Titanyum alaşımları düşük süneklik yüksek mukavemet gösteren malzemelerdir. Bu alaşımlarda sıcaklığın etkisiyle iç yapıda meydana gelen deformasyon mekanizmalarının farklı olmasından dolayı sıcaklık önemli bir faktördür. Sıcaklık artışı malzemenin mukavemetini düşürürken, sünekliğini artırmaktadır. 300 °C sıcaklığı altında yetersiz kayma sisteminin dolayı şekillendirme işlemlerinde problemler ortaya çıkmaktadır. Azalan deformasyon hızı ile mukavemetin düştüğü görülmüştür.

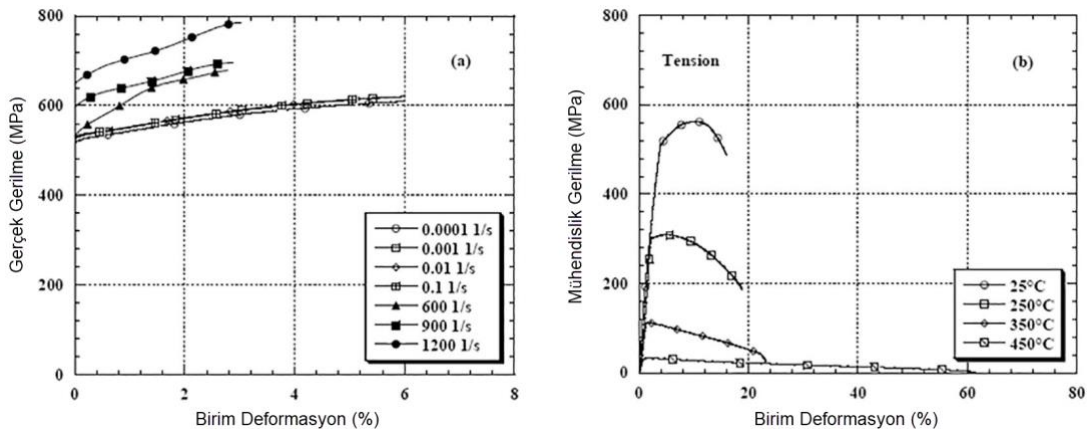
4. Alüminyum Alaşımında Etkiler

Havacılık endüstrisi için yeni olarak geliştirilen AA2195 alüminyum lityum alaşımında farklı sıcaklık ve deformasyon hızlarında yapılan araştırmada (Li et al. , 2020), azalan sıcaklıkla ve artan deformasyon hızıyla beraber çekme mukavemetinin arttığı gösterilmiştir (Şekil 11). Oluşan deformasyon miktarında deformasyon hızından daha çok deformasyon sıcaklığına bağlı olduğu vurgulanmıştır. Toplam deformasyon miktarları ile kaba tanelerin doğrusal bir ilişkisi olduğu söylenmektedir. Sıcaklığın artmasıyla, dinamik yeniden kristalleşme seviyesi artmaktadır. Buda sünekliliğin iyileşmesine katkıda bulunmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda özellikle de düşük deformasyon hızlarında, hızlı büyüme oranlarından dolayı yeniden kristalize edilmiş taneler daha büyük hale gelmektedir. Bundan dolayı da toplam uzamada bir düşüş meydana geldiği belirtilmiştir. Deformasyon hızının artması ise, akma mukavemetinde oldukça etkili olmuştur.



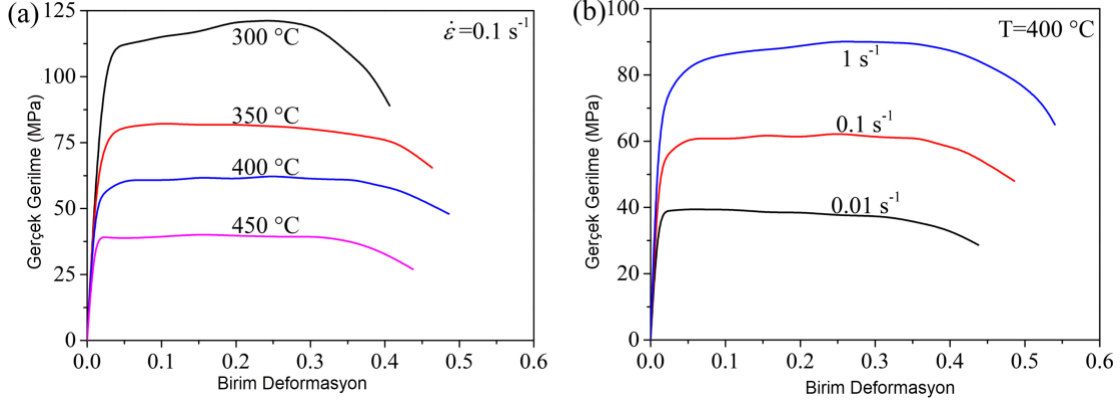
Şekil 11. AA2195 alüminyum lityum alaşımında sıcaklık ve deformasyon hızının gerilme birim deformasyon eğrisine etkisi, (a) 0,01 s⁻¹, (b) 0,1 s⁻¹, (c) 1 s⁻¹ (Li et al. , 2020).

AA2014-T6 alaşımında sıcaklık ve deformasyon hızında çekme, basma ve eğilme özellikleri incelenmiştir (Prakash et al. , 2020). Yüksek sıcaklıkların (250, 350 ve 450 °C) süneklilik ve pekleşme üzerinde etkili olduğu gösterilmiştir. Şekil 12.' De görüleceği üzere deformasyon hızının artması mukavemeti artırırken, sıcaklık artışı mukavemeti düşürmektedir.



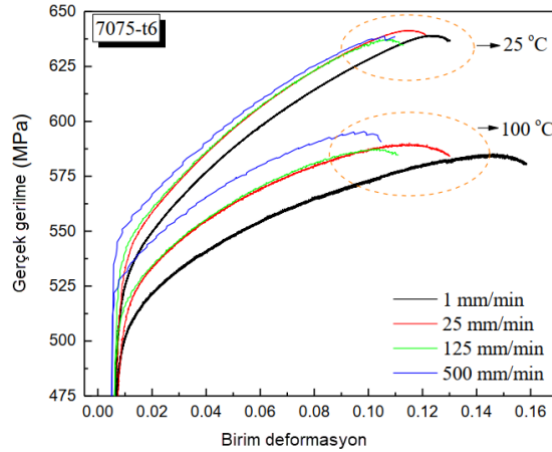
Şekil 12. AA2014-T6 alaşımında sıcaklık ve deformasyon hızının gerilme birim deformasyon eğrisine etkisi (Prakash et al. , 2020).

Xu ve arkadaşları (Xu et al. , 2021), AA7075-F alaşımında 673 K (400 °C) sıcaklığında farklı deformasyon hızlarında tek eksenli çekme deneyi yapmışlardır. Geleneksel tek eksenli çekme testi ve verilerin işlenmesinde, deney numunesinin homojen bölgesi (düzgün deforme olmuş kısmı) kullanılır. Xu ve arkadaşları da, bu durumun yüksek sıcaklıklarda hatalı olabileceğini düşünmüşler ve 2B-3B görüntü işleme yöntemlerini kullanarak bu durumu modellemişlerdir. Aynı zamanda, ABAQUS programında bu modeli uygulamışlar ve yüksek sıcaklıklarda uygulanabilir olduğunu vurgulamışlardır. 7075 alüminyum alaşımında farklı sıcaklık ve deformasyon hızının mekanik özelliklere etkisi incelenen diğer çalışmalarda da (Puchi-Cabrera et al. , 2011; Lu et al. , 2018; Xiao et al. , 2018; Kılıc, 2019), sıcaklık artışıyla birlikte akma mukavemeti düşerken, sünekliğin arttığı görülmüştür (Şekil 13-14). Deformasyon hızının artışıyla akma ve çekme mukavemeti artarken, sünekliğin pek fazla değişmediği gösterilmiştir. Buradaki temel etken deformasyon miktarının, sıcaklık ve deformasyon hızının tane büyüklüğünü etkilemesi olarak açıklanmıştır.

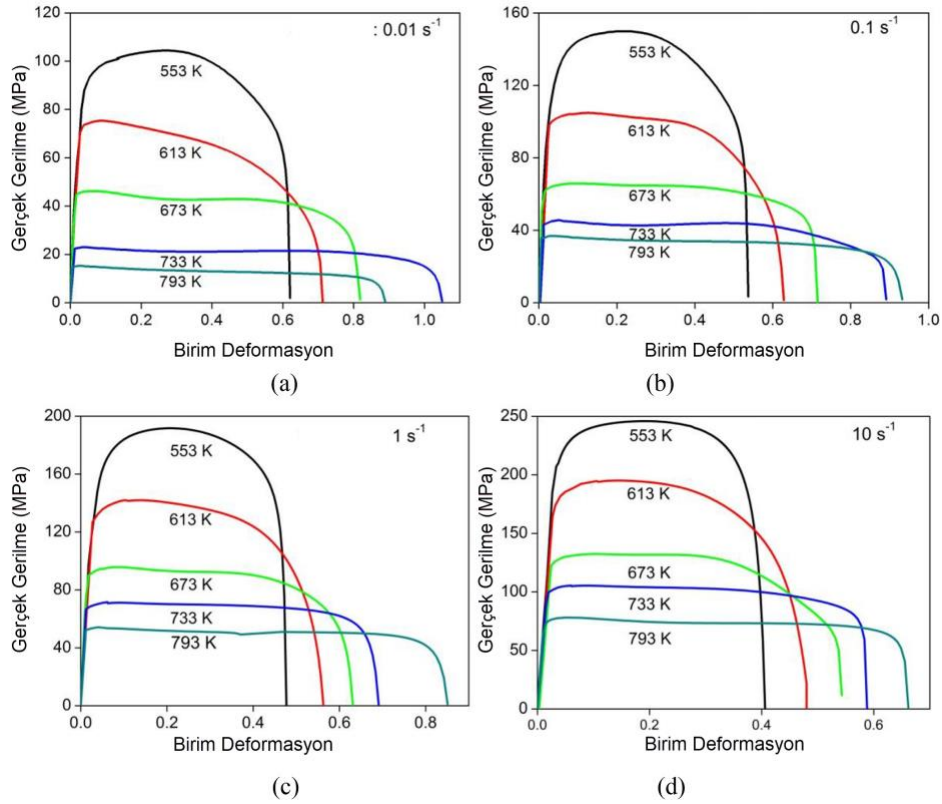


Şekil 13. AA7075 alaşımında farklı sıcaklık ve deformasyon hızlarının gerilme birim deformasyon eğrisine etkisi (Xiao et al. , 2018).

Dai ve arkadaşları (Dai et al. , 2019), 5083 alüminyum alaşımında sıcaklığın ve deformasyon hızının mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Sıcaklığın artırılması veya deformasyon hızının azaltılması akma mukavemetini düşürürken, sünekliği artırdığı göstermişlerdir (Şekil 15). Test edilen koşullarda dislokasyon hareketi ve sünek kırılmanın birincil deformasyon mekanizması olduğunu belirtmişlerdir. Sıcaklık ve deformasyon hızının artmasının dinamik yeniden kristalleşmeyi geliştirdiğini göstermişlerdir. 793 K sıcaklığında, tane sınırı kuvvetinin zayıflaması sonucu malzeme sünekliğinin azaldığı vurgulanmıştır.

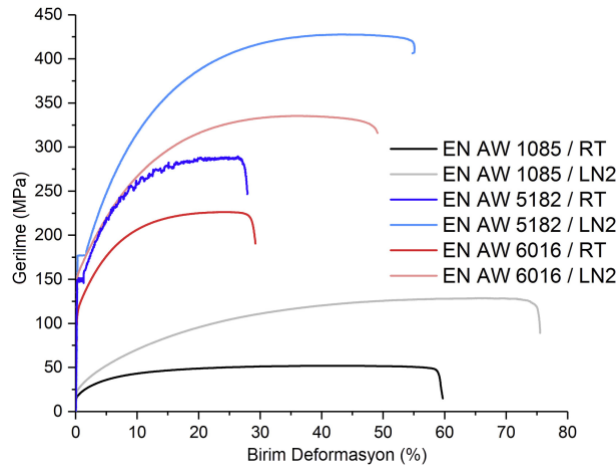


Şekil 14. 7075-t6 alaşımında sıcaklık ve deformasyon hızının etkisi (Kılıc, 2019).



Şekil 15. 5083 alüminyum alaşımında sıcaklık ve deformasyon hızının gerilme birim deformasyon eğrisine etkisi (Dai et al. , 2019).

Su ve Young (Su&Young, 2019), AA6063 ve AA6061 alaşımlarının farklı sıcaklıklardaki (24- 600 °C) çekme davranışını incelemiştir. Sıcaklığın artışıyla akma mukavemetinin önemli oranda düştüğü gösterilmiştir. Prakash ve arkadaşları (Vilamosa et al. , 2016), AA6082 alaşımında sıcaklık ve deformasyon hızının etkilerini incelemiştir. Sıcaklık arttıkça akma mukavemetinin düştüğü, fakat sünekliğin arttığı görülmüştür. Düşük sıcaklıklarda deformasyon hızının akma mukavemetine etkisi yok denecek kadar az iken, yüksek sıcaklıklarda etkili olduğu gösterilmiştir. Gruber ve arkadaşları (Gruber et al. , 2020), alüminyum alaşımlarında düşük sıcaklıklarda oluşan deformasyon mekanizmalarını incelemiştir. 1085, 5182 ve 6016 alüminyum alaşımları üzerinde 296 K ile 77 K sıcaklıklarında çekme deneyleri yapılmış ve iç yapı incelemesi yapmışlardır. Oda sıcaklığı ile soğuk deneyler karşılaştırıldığında akma ve çekme mukavemetleri artarken, sünekliğin de arttığı görülmüştür (Şekil 16). Düşük sıcaklıklardaki oluşan yüksek pekleşme hızlarının etkisinden kaynaklanmaktadır. Dinamik toparlanmanın dislokasyon yoğunluğunu artırdığını vurgulamışlardır. Kriyojenik sıcaklıkta daha yüksek oranda vida dislokasyonu oluştuğunu göstermişlerdir.

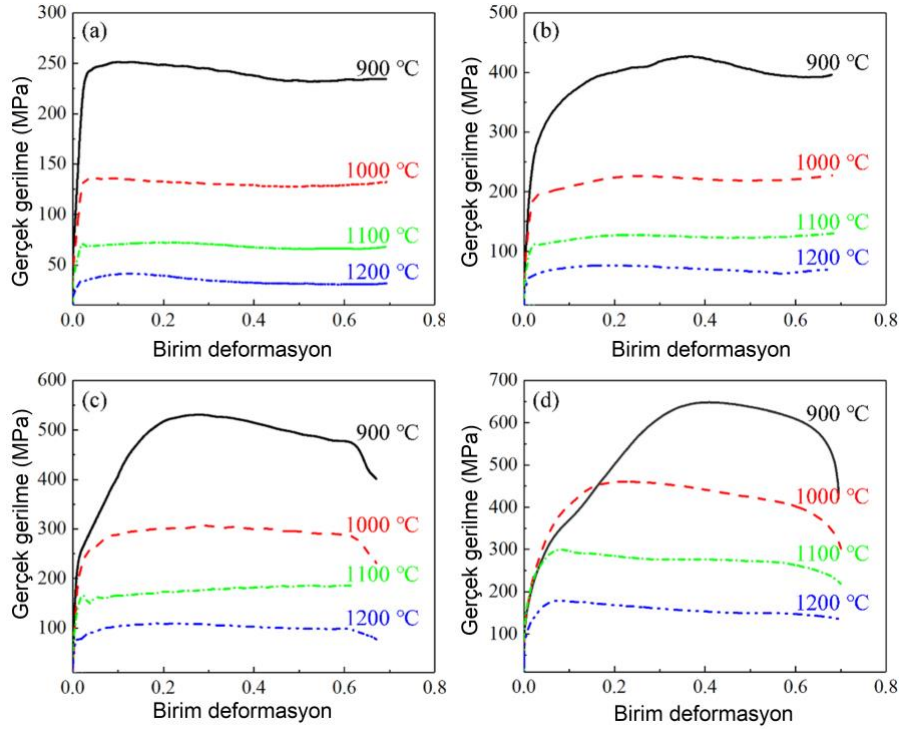


Şekil 16. Farklı seri alüminyum alaşımlarında sıcaklığın gerilme birim deformasyon eğrisine etkisi (Gruber et al. , 2020).

Alüminyum alaşımlarında deformasyon hızından ziyade deformasyon sıcaklığının daha etkin bir parametre olduğu söylenmektedir. Deformasyon hızının artmasıyla mukavemet artarken, sıcaklık artışı mukavemeti düşürmektedir. Düşük sıcaklıklarda deformasyon hızının etkisi azken, yüksek sıcaklıklarda artmaktadır.

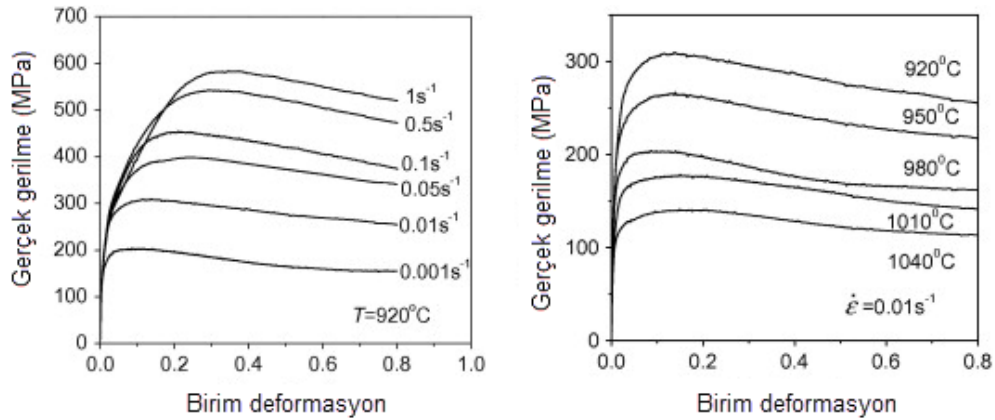
5. Nikel Alaşımlarında Etkiler

Pahalı bir malzeme olan nikel alaşımları, çok zor koşullar altında dahi paslanmazlık ve mekanik özelliklerini koruyabilmektedir. Süperalaşım veya yüksek performanslı alaşım olarak da bilinmektedir. Nikel alaşımlarına baktığımızda Inconel 625-718-783-600, Incoloy 825-800-925, Nickel 200-201 gibi farklı kalitede alternatifler sunulmaktadır. Tang ve arkadaşları (Tang et al. , 2021), Inconel783 süperalaşımında sıcaklık ve deformasyon hızının etkisini araştırmışlardır. Sıcaklık artışıyla mukavemet düşerken, sünekliğin değişmediği görülmüştür. Deformasyon hızının artmasıyla beraber mukavemetin arttığı ve yine sünekliğin değişmemiştir (Şekil 17). Yeniden kristalleşme hızının ve tane boyutunun genellikle sıcaklıkla arttığını, ancak deformasyon hızıyla azaldığını ifade etmişlerdir.



Şekil 17. Inconel783 süperalaşımında sıcaklık ve deformasyon hızının etkisi (a) $0,01 \text{ s}^{-1}$, (b) $0,1 \text{ s}^{-1}$, (c) 1 s^{-1} , (d) 10 s^{-1} (Tang et al. , 2021).

Lin ve arkadaşları (Lin et al. , 2015), Inconel718 süperalaşımında sıcaklık ve deformasyon hızının etkilerini incelemişlerdir. Deformasyon hızının artmasıyla mukavemet artarken, deformasyon sıcaklığının artmasıyla mukavemetin düştüğü görülmektedir (Şekil 18). Yapılan bu işlemlerin süneklik üzerinde herhangi bir etkisi olmamıştır. Akma eğrisi için yeni bir model geliştirmişler ve modelin doğruluk derecesinin yüksek olduğunu göstermişlerdir.



Şekil 18. Inconel718 süperalaşımında sıcaklık ve deformasyon hızının etkisi (Lin et al. , 2015).

Zhang ve arkadaşları (Zhang et al. , 2020), Cr-Mn-Si-Ni alaşımı ultra yüksek mukavemetli çeliğin farklı sıcaklık ve deformasyon hızlarında çekme davranışını incelemişlerdir. Pekleşmenin 4 aşamada gerçekleştiğini vurgulamışlardır. Oda sıcaklığında artan deformasyon hızının, dislokasyon yoğunluğunu artırdığını ve dolayısıyla akma mukavemetini artırdığını söylemişlerdir. Artan

deformasyon hızının, dislokasyon engeli ve pekleşmeyi kısıtladığından dolayı çekme mukavemetinde düşme meydana geldiğini vurgulamışlardır. Oda sıcaklığında yapılan çekme deneyinde dislokasyonlar sırasıyla düşük açılı tane sınırları ve yüksek açılı tane sınırlarına dönüşmüşlerdir. Sıcaklık artışının mukavemeti düşürdüğü ve deformasyon hızındaki artışın mukavemeti artırdığı göstermişlerdir.

Nikel alaşımlarında sıcaklık artışı mukavemeti düşürücü etkiye sahipken süneklik üzerinde bir etkisi olmadığı görülmüştür. Deformasyon hızının artması da mukavemeti artırıcı bir etkiye sahiptir.

6. Sonuç

Bu çalışma kapsamında, imalat sanayinde özellikle şekillendirme işlemlerinde önemli faktörlerden olan deformasyon sıcaklığı ve deformasyon hızının etkileri incelenmiştir. Literatürde yer alan çok sayıda çalışmalardan çelik, titanyum, alüminyum ve nikel alaşımlarında son yıllardaki yapılmış olan çalışmalar incelenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde deformasyon hızı ve sıcaklığının çelik, titanyum, alüminyum ve nikel alaşımlarının mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Bu malzemelerde deformasyon hızı ve sıcaklığının dislokasyon yoğunluğu, tane boyutu, iç yapı, yeniden kristalleşme, deformasyon mekanizması gibi parametreleri etkilemesinden dolayı, mekanik özelliklerde değişimler meydana gelmektedir. Çelik malzemede iç yapıyı oluşturan fazların sıcaklıktan etkilenmelerinden dolayı deformasyon hızından ziyade sıcaklık daha etkili bir parametre olmaktadır. Özellikle sünekliğin önemli olduğu durumlarda yaklaşık 300 °C ve üzerinde işlemler yapılması gerekmektedir. Sıcaklık artışı, deformasyon hızının etkisini artırmaktadır. İncelenen malzemeler içerisinde TWIP çeliğinin deformasyon hızından çok az etkilendiği görülmüştür. Titanyum alaşımlarında sıcaklık, deformasyon mekanizmasını etkilediğinden dolayı önemli bir parametredir. Yaklaşık olarak 300 °C altındaki sıcaklıklarda şekillendirme problemleri ortaya çıkarken, yüksek sıcaklıklarda süneklik artışından dolayı daha az problem ile karşılaşmaktadır. Alüminyum alaşımlarında, sıcaklığın tane yapısına etkisinden dolayı mukavemet üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Düşük sıcaklıklarda deformasyon hızının etkisi azken, yüksek sıcaklıklarda etkisi artmaktadır. Diğer malzemelerin aksine, Nikel alaşımlarında sıcaklık ve deformasyon hızının değişmesinin süneklik üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Genel olarak sıcaklığın, deformasyon hızından daha etkili bir parametre olduğu görülmektedir. Özellikle sünekliği düşük olup yüksek mukavemete sahip malzemelerde şekillendirilmesi zor parçaların sıcaklığın artırılmasıyla daha kolay şekillendirilebilecekleri bilinen bir gerçektir. Yapılan soğuk deneylerde ise pekleşmenin etkisiyle mukavemet artışları olduğu ve malzemelerdeki kritik sıcaklıkların önemli olduğu ve bunların iyi belirlenmesi gerektiği görülmüştür.

Referanslar

- Alsagabi, S., Alqahtani, M. & Alajlan, A., (2018). The Elevated Temperature Deformation of G115 Steel and the Associated Deformation Mechanism. *International Journal of Advances in Materials Science and Engineering (IJAMSE)*, 7 (1): 1-7. <https://doi.org/10.14810/ijamse.2018.7101>
- Altan, T. & Long, J., (2015). Forming Aluminum Alloys at Elevated Temperatures, Part 1, How Process Details Change for Warm and Hot Forming. *Stamping Journal*, 1 (1): 1-4.
- Attar, H. R., Li, N. & Foster, A., (2021). A New Design Guideline Development Strategy for Aluminium Alloy Corners Formed through Cold and Hot Stamping Processes. *Materials Design*, 207 (1): 109856. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109856>
- Borek, W., Lis, M., Gołombek, K., Sakiewicz, P. & Piotrowski, K., (2019). Effect of Plastic Deformation Rate at Room Temperature on Structure and Mechanical Properties of High-Mn Austenitic Mn-Al-Si 25-3-3 Type Steel. *Archives of Materials Science and Engineering*, 96 (1): 22-31.
- Dai, Q., Deng, Y., Jiang, H., Tang, J. & Chen, J., (2019). Hot Tensile Deformation Behaviors and a Phenomenological Aa5083 Aluminum Alloy Fracture Damage Model. *Materials Science and Engineering: A*, 766 (1): 138325. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138325>
- Despax, L., Vidal, V., Delagnes, D., Dehmas, M., Matsumoto, H. & Velay, V., (2020). Influence of Strain Rate and Temperature on the Deformation Mechanisms of a Fine-Grained Ti-6al-4v Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 790 (1): 139718. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139718>
- Gruber, B., Weißensteiner, I., Kremmer, T., Grabner, F., Falkinger, G., Schökel, A., Spieckermann, F., Schäublin, R., Uggowitz, P. J. & Pogatscher, S., (2020). Mechanism of Low Temperature Deformation in Aluminium Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 795 (1): 139935. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139935>
- Haitao, X., Dengke, W. & Kaihong, S., (2020). Effect of Deformation Temperature on Mechanical Properties and Microstructure of Twip Steel for Expansion Tube. *High Temperature Materials and Processes*, 39 (1): 63-73. doi:10.1515/htmp-2020-0020

- Hao, F., Xiao, J., Feng, Y., Wang, Y., Ju, J., Du, Y., Wang, K., Xue, L. n., Nie, Z. & Tan, C., (2020). Tensile Deformation Behavior of a near-A Titanium Alloy Ti-6al-2Zr-1mo-1v under a Wide Temperature Range. *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (3): 2818-2831. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.016>
- Jiang, Y.-Q., Lin, Y. C., Jiang, X.-Y., He, D.-G., Zhang, X.-Y. & Kotkunde, N., (2020). Hot Tensile Properties, Microstructure Evolution and Fracture Mechanisms of Ti-6al-4v Alloy with Initial Coarse Equiaxed Phases. *Materials Characterization*, 163 (1): 110272. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110272>
- Kilic, S., (2019). Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Different Temperature and Deformation Speeds on Mechanical Properties and Springback Behaviour in Al-Zn-Mg-Cu Alloy. *Mechanics*, 25 (5): 406-412.
- Kilic, S., Kacar, I. & Ozturk, F., (2019). New Trend in Aerospace Industry: Al-Li Based Alloys. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1): 275-296.
- Kilic, S. & Ozturk, F., (2017). Evaluation of Formability under Different Deformation Modes for Twip900 Steel. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 139 (3): 031001. 10.1115/1.4035621
- Kilic, S., Ozturk, F. & Picu, C. R., (2018). Investigation of the Performance of Flow Models for Twip Steel. *Journal of materials engineering and performance*, 27 (8): 4364-4371. 10.1007/s11665-018-3504-6
- Koga, N., Nameki, T., Umezawa, O., Tschan, V. & Weiss, K.-P., (2021). Tensile Properties and Deformation Behavior of Ferrite and Austenite Duplex Stainless Steel at Cryogenic Temperatures. *Materials Science and Engineering: A*, 801 (1): 140442. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140442>
- Kori, P., Vadavadagi, B. H. & Khatirkar, R. K., (2020). Hot Deformation Characteristics of Ass-304 Austenitic Stainless Steel by Tensile Tests. *Materials Today: Proceedings*, 28 (1): 1895-1898. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.303>
- Kundu, A., Field, D. P. & Chandra Chakraborti, P., (2020). Effect of Strain and Strain Rate on the Development of Deformation Heterogeneity During Tensile Deformation of a Solution Annealed 304 Ln Austenitic Stainless Steel: An Ebsd Study. *Materials Science and Engineering: A*, 773 (1): 138854. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138854>
- Li, D., Feng, Y., Yin, Z., Shangguan, F., Wang, K., Liu, Q. & Hu, F., (2011). Prediction of Hot Deformation Behaviour of Fe-25mn-3si-3al Twip Steel. *Materials Science and Engineering: A*, 528 (28): 8084-8089. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.073>
- Li, Q., Ning, J., Chen, L., Hu, J. & Liu, Y., (2020). The Mechanical Response and Microstructural Evolution of 2195 Al-Li Alloy During Hot Tensile Deformation. *Journal of Alloys and Compounds*, 848 (1): 156515. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156515>
- Lin, Y. C., Li, K.-K., Li, H.-B., Chen, J., Chen, X.-M. & Wen, D.-X., (2015). New Constitutive Model for High-Temperature Deformation Behavior of Inconel 718 Superalloy. *Materials Design*, 74 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.03.001>
- Liu, Y., Zhu, B., Wang, Y., Li, S. & Zhang, Y., (2020). Fast Solution Heat Treatment of High Strength Aluminum Alloy Sheets in Radiant Heating Furnace During Hot Stamping. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 3 (1): 20-25. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2019.11.004>
- Lu, J., Song, Y., Hua, L., Zheng, K. & Dai, D., (2018). Thermal Deformation Behavior and Processing Maps of 7075 Aluminum Alloy Sheet Based on Isothermal Uniaxial Tensile Tests. *Journal of Alloys and Compounds*, 767 (1): 856-869. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.07.173>
- Mao, C., Liu, C., Yu, L., Li, H. & Liu, Y., (2018). Mechanical Properties and Tensile Deformation Behavior of a Reduced Activated Ferritic-Martensitic (Rafm) Steel at Elevated Temperatures. *Materials Science and Engineering: A*, 725 (1): 283-289. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.03.119>
- Ozturk, F., Toros, S. & Kilic, S., (2009). Tensile and Spring-Back Behavior of Dp600 Advanced High Strength Steel at Warm Temperatures. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 16 (6): 41-46. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60025-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60025-8)
- Ozturk, F., Toros, S. & Kilic, S. , (2010). Tensile Deformation Behavior of Aa5083-H111 at Cold and Warm Temperatures. *International Journal of Materials Research*, 101 (9): 1172-1179.
- Paghandeh, M., Zarei-Hanzaki, A., Abedi, H. R., Vahidshad, Y., Kawałko, J., Dietrich, D. & lampke, T., (2021). Compressive/Tensile Deformation Behavior and the Correlated Microstructure Evolution of Ti-6al-4v Titanium Alloy at Warm Temperatures. *Journal of Materials Research and Technology*, 10 (1): 1291-1300. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.110>

- Pandre, S., Takalkar, P., Kotkunde, N., Kumar Singh, S. & Ul Haq, A., (2019). Influence of Temperatures and Strain Rates on Tensile Deformation Behaviour of Dp 590 Steel. *Materials Today: Proceedings*, 18 (1): 2603-2610. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.119>
- Prakash, G., Singh, N. K. & Gupta, N. K., (2020). Deformation Behaviours of Al2014-T6 at Different Strain Rates and Temperatures. *Structures*, 26 (1): 193-203. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.068>
- Puchi-Cabrera, E. S., Staia, M. H., Ochoa-Pérez, E., La Barbera-Sosa, J. G., Villalobos-Gutierrez, C. & Brenlla-Caires, A., (2011). Flow Stress and Ductility of Aa7075-T6 Aluminum Alloy at Low Deformation Temperatures. *Materials Science and Engineering: A*, 528 (3): 895-905. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.002>
- Shimadzu, 2021. Thermostatic Chambe. <https://www.shimadzu.com/an/products/materials-testing/uni-ttm-system/tce-n300a/index.html> (Erişim Tarihi: 01.07.2021).
- Simonetto, E., Bertolini, R., Ghiotti, A. & Bruschi, S., (2020). Mechanical and Microstructural Behaviour of Aa7075 Aluminium Alloy for Sub-Zero Temperature Sheet Stamping Process. *International Journal of Mechanical Sciences*, 187 105919. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105919>
- Su, M.-N. & Young, B., (2019). Material Properties of Normal and High Strength Aluminium Alloys at Elevated Temperatures. *Thin-Walled Structures*, 137 (1): 463-471. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.01.012>
- Tang, K., Zhang, Z., Tian, J., Wu, Y. & Jiang, F., (2021). Hot Deformation Behavior and Microstructural Evolution of Supersaturated Inconel 783 Superalloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 860 (1): 158541. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158541>
- Toros, S., Kilic, S. & Ozturk, F., (2011). The Effects of Material Thickness and Deformation Speed on Springback Behavior of Dp600 Steel. *Advanced Materials Research*, 264-265 (1): 636-645. [10.4028/www.scientific.net/AMR.264-265.636](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.264-265.636)
- Vilamosa, V., Clausen, A. H., Børvik, T., Holmedal, B. & Hopperstad, O. S., (2016). A Physically-Based Constitutive Model Applied to Aa6082 Aluminium Alloy at Large Strains, High Strain Rates and Elevated Temperatures. *Materials Design*, 103 (1): 391-405. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.047>
- Xiao, W., Wang, B., Wu, Y. & Yang, X., (2018). Constitutive Modeling of Flow Behavior and Microstructure Evolution of Aa7075 in Hot Tensile Deformation. *Materials Science and Engineering: A*, 712 (1): 704-713. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.028>
- Xu, Z., Peng, L., Jain, M. K., Anderson, D. & Carsley, J., (2021). Local and Global Tensile Deformation Behavior of Aa7075 Sheet Material at 673ok and Different Strain Rates. *International Journal of Mechanical Sciences*, 195 (1): 106241. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106241>
- Yao, K., Min, X., Emura, S. & Tsuchiya, K., (2019). Coupling Effect of Deformation Mode and Temperature on Tensile Properties in Twip Type Ti-Mo Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 766 (1): 138363. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138363>
- Zang, M. C., Niu, H. Z., Zhang, H. R., Tan, H. & Zhang, D. L., (2021). Cryogenic Tensile Properties and Deformation Behavior of a Superhigh Strength Metastable Beta Titanium Alloy Ti-15mo-2al. *Materials Science and Engineering: A*, 817 (1): 141344. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141344>
- Zhang, J.-Y., Jiang, P., Zhu, Z.-l., Chen, Q., Zhou, J. & Meng, Y., (2020). Tensile Properties and Strain Hardening Mechanism of Cr-Mn-Si-Ni Alloyed Ultra-Strength Steel at Different Temperatures and Strain Rates. *Journal of Alloys and Compounds*, 842 (1): 155856. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155856>
- Zwick, 2021. Isı Kabinleri. <https://www.zwickroell.com/tr/aksesuar/sicaklik-ve-klima/isi-kabinleri/> (Erişim Tarihi: 01.07.2021).



Direk Tipi Trafo Tesislerinde Parafudr Arızalarının Azaltılması

Reduction of Surge Arrester Faults in Pole Type Transformer Facilities

İbrahim Küçüksümbül¹, Mehmet Şen², Muciz Özcan³

¹Meram Elektrik Dağıtım A.Ş., 42500 Konya, TÜRKİYE

²Ankara Sosyal Bilimler Üniversitesi Uzaktan Eğitim, 06830 Ankara, TÜRKİYE

³Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, 42090 Konya, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 01/10/2021

Kabul / Accepted: 27/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Bu çalışmada direk tipi trafo tesislerinin bölgesel verileri ile tip proje modellemesi yapılarak parafudr kaynaklı oluşabilecek yüksek gerilim seviyesindeki (YG) arızaların şebekeye olan etkileri incelenmiştir. Öncelikle modellenmesi yapılan tesisin ilgili yönetmelik ve mevzuatlara uygunlukları kontrol edilmiştir. Çalışma bölgesi olan Konya Ereğli’de 2018 yılında direk tipi trafo tesis sayısı 1952 adet, 2019 yılında ise bu sayı 2187’dir. Çalışılan şebekede dpPower programı ile modelleme yapılmış ve parafudr arızalarından kaynaklanan tahakkuk kaybı ve tesis onarım maliyetlerinin en aza indirilmesi hedeflenmiştir. 2018 yılında 1.370.444,54 ₺ olan toplam arıza maliyeti, 2019 yılında 2.024.613,93 ₺’ye yükselmiştir. Her yıl artan bu arıza maliyetleri, önerilen revizyon sonrasında minimum seviyede olması amaçlanmıştır. Şebeke modellenmesi sonrasında yapılan iyileştirmelerde hattın beslenen 89 aboneden, 88 abonenin enerjisiz kalması önlenmiştir ve müşteri memnuniyeti artırılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Arıza, Parafudr, Tip Proje, Trafo”

Abstract

This study examined the effects of direct transformer facilities on the network of medium voltage faults that can be caused by surge arrester using regional data and type project modeling. The plant modeled first, has been checked to comply with the relevant regulations and legislations. In Ereğli district of Konya, the number of post-type transformer plants was 1952 in 2018 and 2187 in 2019. The network worked was modeled with dpPower program and was intended to minimize accrual loss and plant repair costs due to surge arrester faults. The total cost of fault, which was 1.370.444,54 ₺, in 2018, increased to 2.024.613,93 ₺ in 2019. Increasing fault costs each year are intended to be minimal after the proposed overhaul. Improvements made after modeling have prevented 88 subscribers from being energy-free from 89 subscribers fed on the line and increased customer satisfaction.

Key Words

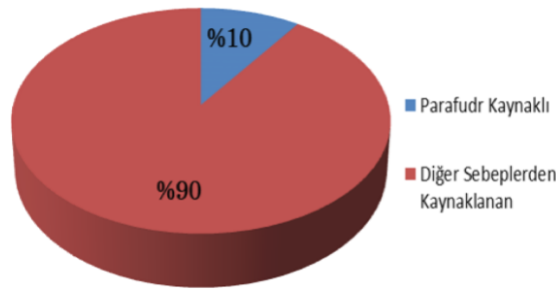
“Fault, Surge Arrester, Type Project, Transformer”

1. Giriş

Elektrik enerjisinin hayatımızda her geçen gün artan önemi gelişmişlik düzeyi göstergelerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır (Yang ve diğ., 2016; Hasançebi ve diğ.,2020). Teknolojinin gelişmesi ile birlikte elektrik enerjisine duyulan taleplerde buna bağlı olarak artmaktadır. Dağıtım hattı seviyesindeki enerji ihtiyaçları sorumlu dağıtım şirketine yapılan başvuru ile kullanım amacı, talep gücü ve şebeke yakınlığı gibi kriterler dikkate alınarak temin edilmektedir (Şen ve Özcan, 2020). Artan talep gücünden ve şebekelerin kısıtlı olmasından kaynaklı olarak taleplerin hepsi alçak gerilim (AG) seviyesi üzerinden karşılanamamaktadır. Bu tip elektrik enerjisi ihtiyacı olan tüketiciler ihtiyaçlarını kendi kurdukları trafo tesislerinden YG seviyesine bağlantı sağlayarak karşılamaktadır (Joseph ve diğ., 2017). Bu tarz trafo tesislerinin en yaygın olanlarından birisi direk tipi trafo tesisleridir.

YG seviyesindeki bu tesislerin kabul edilmesi ilgili dağıtım şirketlerince, TEDAŞ'ın belirlemiş olduğu şartname ve yönetmelikler doğrultusunda gerçekleştirilmektedir. Kabul edilen tip projeler tüm dağıtım şirketlerini kapsamakla birlikte tesis standardizasyonunu beraberinde getirmektedir (Ingole ve diğ., 2017). Şebekeyi genişleten her müstakil trafo muhtemel arıza kaynağı olarak görülmektedir (Shirakawa ve diğ., 2000). Bu bağlamda şebeke üzerinde meydana gelen elektrik arızaları, ihtiyaçlar doğrultusunda revize çalışmalarının da önünü açmıştır. Meydana gelebilecek bu arızalarda can ve mal kayıplarının önlenmesi dağıtım şirketlerinin yapacağı yenilikler ile en az seviyeye gelmesi amaçlanmaktadır. Yapılan bu çalışmada elektrik tesislerinin belirli bir standartta ulusal geçerliliğin bulunmasından dolayı hedeflenen sonuçlar aynı zamanda ulusal uygulanabilirliği de hayata geçirilecektir. Yapılan çalışma sonrasında güvenlik durumu, mevzuatlara uygunluk, maliyet ve elektrik arızalarına karşı oluşmuş olumsuz etkiler pilot uygulama ile hayata geçmesine olanak tanımıştır.

Dağıtım şirketleri ve tüketiciler tarafından elektrik şebekesinde istenmeyen durumların başında tüketiciyi sekteye uğratabilecek elektrik arızaları gelmektedir (Tulaz, 2014). Her yeni kurulan elektrik tesislerinin hedefi sıfır arıza ve kesintisiz enerji sağlanması olsa da uygulamada bu durumun gerçekleşmesi oldukça zordur. Yaşanan elektrik arızalarını minimum seviyeye indirmek, şebekede oluşan kalıcı arızaları önlemek ile mümkün olmaktadır. Bu bakımdan, elektrik arızalarının olası muhtemel nedenlerinin bilinmesi, arıza sonucu meydana gelecek etkilerin azaltılması bakımından önem arz etmektedir (Çiftçi ve diğ., 2017). Çalışma bölgesinde meydana gelen arızaların nedenleri araştırılmış ve parafudr kaynaklı olan arızaların oranı Şekil 1'de gösterilmiştir (Vahidi ve diğ., 2015).



Şekil 1. 2018 yılı Konya ili Ereğli ilçesi YG arıza verileri

Bu arızaların maliyeti tahakkuk zararı ve onarım bedeli olarak iki ana kısımdan oluşmaktadır. Bir bölgedeki tahakkuk zararı aşağıdaki değerlerin bilinmesi ile hesaplanabilir (Bialek, 1999).

- SG: Sözleşme gücü (Kurulu güç x 0.6) (kW)
- KS: Kesinti süresi (Gün)
- TS: Tüketim saati (Tarife grubuna göre EPTHY'de belirtilen saatler)
- BF: Birim fiyatlar (Tarife grupları EPDK birim fiyatları 2018) (krş/kWh)
- AS: Abone Sayısı (adet)

2018 yılı için YG arızalarında Konya Ereğli bölgesinde direk tipi trafo tesisine sahip abonelerin kurulu gücü 105 kW'dır (Küçükşimbül, 2020). Tahakkuk hesabında kullanılan değerler (1) ile ifade edilmiştir.

$$\text{Tahakkuk Zararı (₺)} = \text{SG} \times \text{KS} \times \text{TS} \times \text{BF} \times \text{AS} \quad (1)$$

İncelenen bölge için 2018 yılında parafudr kaynaklı oluşan arızaların tahakkuk zararı;

$$\text{Tahakkuk zararı (₺)} = 105 \times 0.6 \times 3.98 \times 8 \times 0.35 \times 1952 = 1.370.444,54 \text{ ₺ olarak hesaplanmıştır.}$$

Bölgedeki onarım bedeli ise aşağıdaki değerlerin bilinmesi ile hesaplanabilir (Kakilli, 2013).

$$\text{Onarım Bedeli (₺)} = (\text{Malzeme} + \text{Montaj} + \text{Demontaj}) \times \text{OS} \quad (2)$$

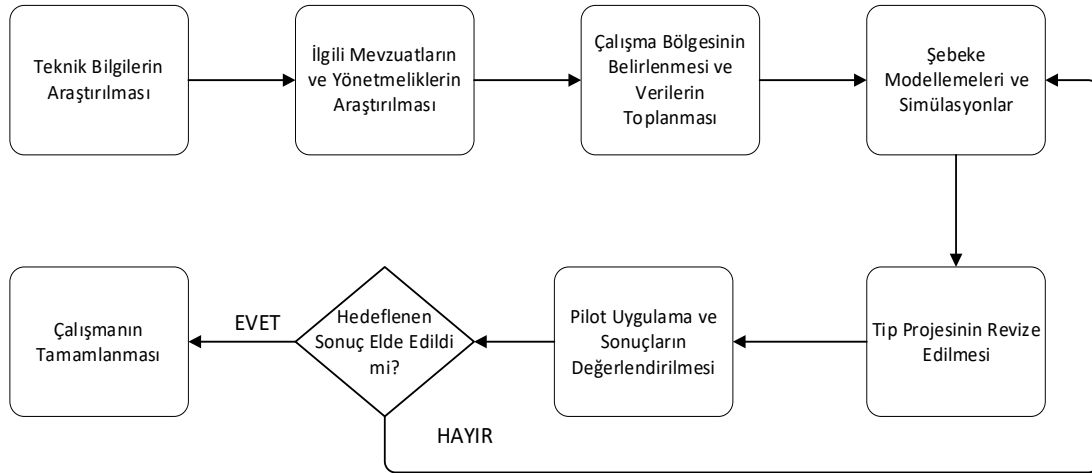
İncelenen bölge için 2018 yılında parafudr kaynaklı oluşan arızaların onarım bedeli;

Onarım Bedeli (₺) = (106,09 + 288,24 + 115,87) x 55 = 28.061 ₺ olarak hesaplanmıştır. Bölgenin 2018 yılında oluşan arızalara karşın dağıtım şebekesine toplam maliyeti 1.398.505,54 ₺ olmuştur. 2019 yılında oluşan arızaların ise %87'si parafudr kaynaklı olarak gerçekleşmiş ve dağıtım şebekesine olan toplam maliyeti 2.024.613,93 ₺ olmuştur.

Veriler incelendiğinde müstakil trafo abone sayısı her geçen gün artmakta ve şebekeyi daha kompleks hale getirmektedir. Artan bu taleplere karşın enerji nakil hatları (ENH) üzerinde yük miktarı sınır değerlere yaklaşmaktadır. Bu durum kimi zaman ENH'ler üzerinde olması gerekenden daha fazla yükü beslemek durumunda kalmaktadır. Buna bağlı olarak şebekelerde arıza sayılarında artışlar görülmektedir. Çalışmada yapılan modellemelerin hayata geçirilmesi ile arızalardan yaşanan maliyetler, işgücü ve zaman kaybı gibi olumsuz faktörlerin önlenmesini sağlayacaktır.

2. Materyal ve Metod

Araştırma bölgesi, direk tipi trafo tesis sayısı yüksek olan Konya ili Ereğli ilçesi seçilmiştir. Arıza durum şebeke modellemesi dpPower programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. DpPower programı ile sahadaki dağıtım hatlarının yapısı ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sahada yapılan tesis ve teçhizat eklemelerini program eş zamanlı olarak güncellemektedir (Dufour ve diğ., 2011). Aynı zamanda günlük üretim ve tüketim güncel endeks değerleri programa aktararak anlık olarak işlenmektedir. Bu sayede programın saha ile olan uyumu en üst düzeydedir. DpPower programının bu üstün özellikleri şebeke modellenmesinde ve analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılması için önemli bir faktördür. Çalışmada izlenen adımlar Şekil 2'de blok diyagramına aktarılmıştır (Gençaydın, 2006).

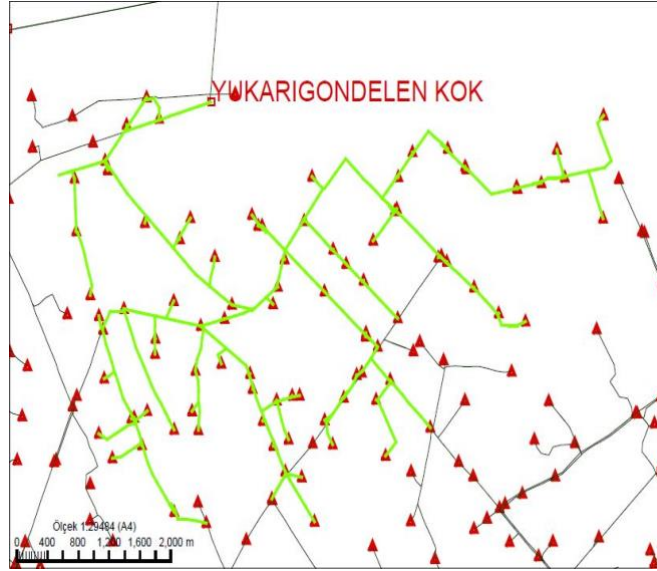


Şekil 2. Çalışmanın blok diyagramı

Şebeke modellemesi ile yapılan çalışmada; istenilen durum, arıza veya bakım durumu ve revize durumu olarak 3 temel başlık incelemiştir. İstenilen durum ve arıza veya bakım durumu en sık karşılaşılan durumlardır. Revize durumu ise tüketici kaynaklı arızaların dağıtım hattına yansımaya olmayacağıdır. Revize durumu sonrasında dağıtım hattından beslenen tüketiciler kesintiden korunmuş olacak ve arıza tespit kolaylığı sağlayacaktır. Bunun yanı sıra modellenme sonrası uygulanan saha çalışmalarında tüketici memnuniyeti artacaktır.

2.1. Elektrik şebekesinde arıza olmaksızın hattın beslendiği

Şebeke üzerinde arıza veya bakım onarım çalışması olmaksızın hattın kesintisiz enerji ile beslendiği durumdur. Şekil 3'te Yukarı Gündelen kesicili ölçü kabine (KÖK) ait hattın ilgili baradan beslediği enerji güzergâhı gösterilmiştir. KÖK binası 89 adet YG tüketicisini arıza olmaksızın kesintisiz olarak beslemektedir. Müstakil trafolu tüketiciler kırmızı üçgenler ile Şekil 3'te belirtilmiştir.

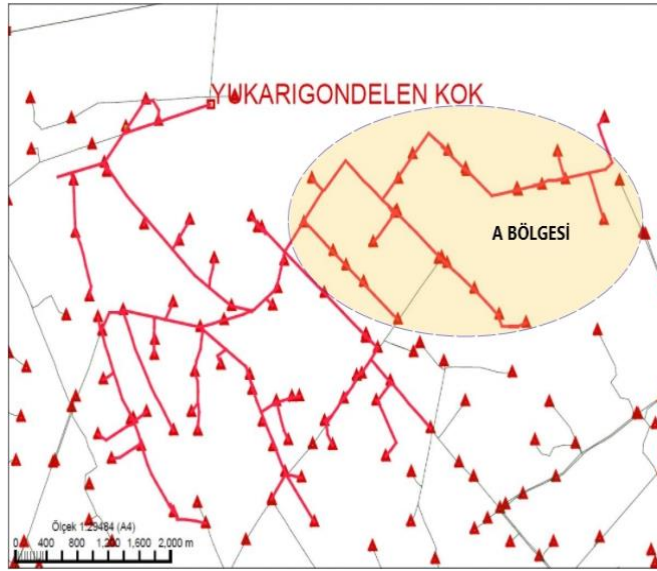


Şekil 3. Hattın enerji olduğu durum

Bu durum elektrik hattında oluşacak olan bir arıza durumunda veya bakım oranım çalışmasında 89 abonenin eş zamanlı olarak enerjisiz kalmasına sebep olacaktır.

2.2. Elektrik şebekesinde arıza veya bakım durum

Elektrik şebekesinde bir arıza veya bakım onarım çalışması olması durumunda Şekil 4'te verilen A bölgesi incelenmiştir. İncelenen bölgede parafudr kaynaklı bir arıza meydana gelmesi durumunda KÖK binasının açmasına neden olan şebeke modellenmiştir. Benzer şekilde bakım onarım esnasında sahada karşılaşılabilecek muhtemel şebeke durumunu göstermektedir.



Şekil 4. Hattın arızalı olduğu durum

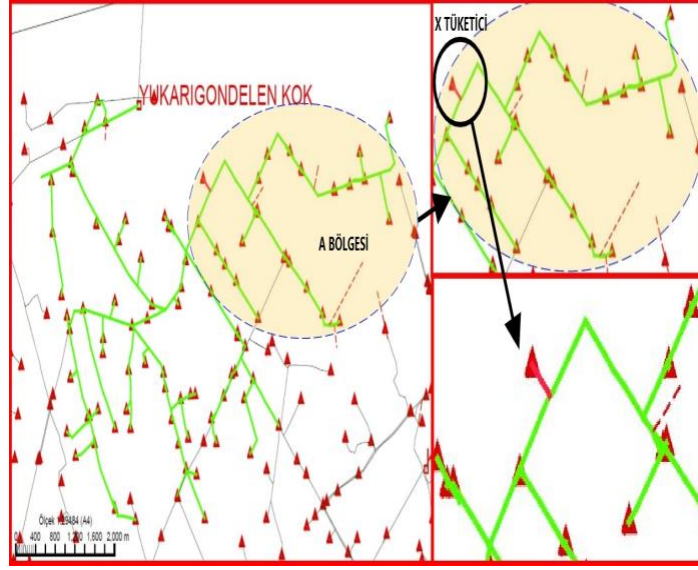
Arıza olması durumunda, arıza noktası tespiti için hattın enerjisiz kalması bu hattan beslenen 89 abonenin kesintiden etkileneceğini göstermiştir. Ayrıca parafudrlar enerji hattı tarafına bağlantı sağlarlar (Akbaba, 2008). Bu bağlamda parafudr kaynaklı arızalarda malzeme değişimi esnasında YG hattı üzerinde bulunan tüm aboneler enerjisiz kalacaktır.

Yapım yılı bakımından 20 yıldan daha eski şebekeler, müstakil trafolu aboneler ile köy ve yayla gibi kırsal yerleşim yerlerini besleyen dağıtım trafoları aynı enerji nakil hattı (ENH) üzerinden branşman olarak beslenmektedir. Bu durumda ENH üzerinde oluşan parafudr arızasında müstakil trafolu tüketicileri etkileyecektir. YG hat üzerinde oluşan bu arıza dağıtım trafolarının da enerjisiz kalmasına sebep olacağı için AG abonelerini de etkileyecektir. Saha sık karşılaşılan bu durum için ENH hatlarının inşa edilmesi, KÖK binalarının inşa

edilmesi gibi yüksek maliyetli çözüm önerileri sunulmaktadır (Şen ve Özcan, 2020). Bu çalışmada yapılan modelleme ile sorunların çözümü daha düşük maliyet ile gerçekleştirilmiş olacaktır.

2.3. Elektrik şebekesinde arıza meydana gelmesi halinde hedeflenen yeni durum

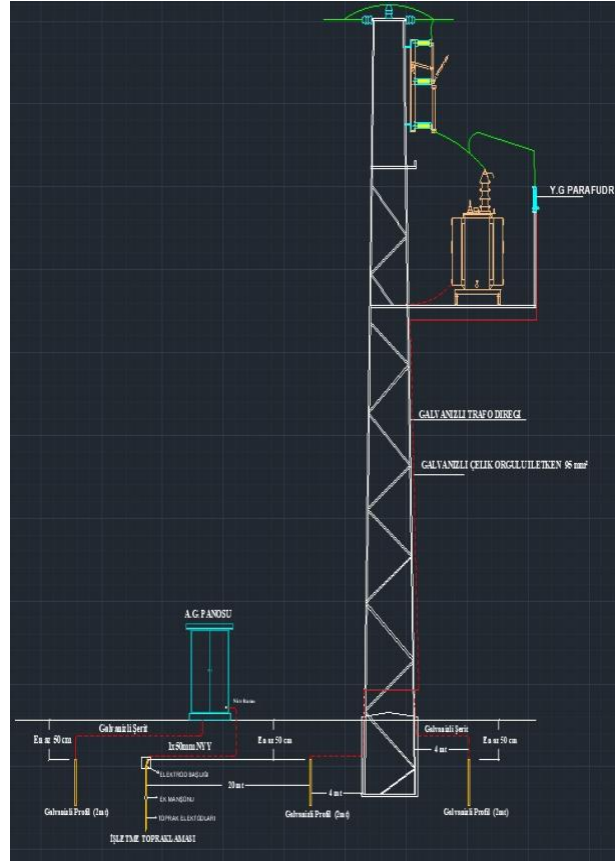
Revize çalışmalarının modellenmesi Şekil 5'te A bölgesinde X tüketicisinde arıza olması durumu için tasarlanmıştır. Bu sayede bölgede arıza durumu tek tüketici ile kısıtlanarak modelleme gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Arıza halinde hedeflenen durum

Yürürlükte ve geçerli olan tip projeye göre direk tipi trafo tesislerinde parafudrların montajı hat tarafına yapılmaktadır. Mevcut durumda parafudr kaynaklı oluşan arızalardan dağıtım şebekesi doğrudan etkilenmektedir. Bunun yanı sıra parafudr üzerinde yapılacak olan bakım onarım çalışmasında hattın enerjisinin kesilmesi zorunludur (Bak ve diğ., 2016; Zhonglei ve diğ., 2012).

Revize çalışması sonrasında hedeflenen durumda parafudr arızası veya bakım onarım çalışmaları şebeke enerjisini etkilemeyecek şekilde arıza noktası sınırlandırılacaktır. Bundan dolayı hat tarafında bulunan parafudrun arıza olması durumunda dağıtım şebekesini etkilemeyecek revize çalışması ile montaj yeri değiştirilmiştir. Bu sayede arıza tüketici bazlı olarak sınırlandırılmış olacaktır. Mevcut projede bulunan parafudrların yeri trafo platformu (balkonu) tarafına taşınmıştır. Revize sonrası parafudr yeri Şekil 6'da Autocad çizimi ile gösterilmiştir.



Şekil 6. Revize sonrası direk tip trafo tesisi tip proje çizimi

Revize sonrasında parafudr kaynaklı arıza sonucu YG sigortasından toprak kaçak akımı akacaktır. Bu durum sigortanın atmasına sebep olacak ve yalnızca ilgili tüketicinin enerjisi kesilecektir. Bu sayede aynı dağıtım hattında enerji alan diğer YG tüketicilerinin enerjisi kalmaması önlenmiştir. Parafudr arızası sonrasında meydana gelen kısa devre akımı YG sigortasını açarak sorunun dağıtım hattına yansımalarını önleyecektir. Bu sayede arızaya sebep olan tüketici tesisin dağıtım şebekesinden ayrılarak arıza noktası tespitinin kolaylıkla bulunması sağlanmıştır. Bu çalışma sayesinde artık tüm ENH dolaşarak arızalı noktanın tespit edilmeye çalışılması bir sorun olmaktan çıkmıştır. Bu sayede arıza noktası tespiti için harcanan zaman, iş gücü kaybı ve yakıt masrafları gibi sorunlar önlenmiş olacaktır.

Geliştirilen bu proje sayesinde bakım ve onarım çalışmalarında sadece ilgili tüketici için çalışma yapılacak ve diğer tüketicilerin enerjisi kalmaları önlenmiş olacaktır. Bu durumda tüketici branşman noktasından aldığı enerji bireysel olarak kesilerek, ENH hattı üzerinde ikinci bir kesintiye sebep olmadan arızalı parafudrun değiştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu sayede kesinti enerji sağlanan tüketicilerin memnuniyetlerinin artması sağlanacaktır.

3. Sonuç ve Tartışmalar

Yapılan bu çalışmada elektrik arızalarının olumsuz etkilerini en aza indirmek için tip projesi planlaması yapılmıştır. Bölgesel verilerin toplanması ve arıza sayılarının incelenmesinden sonra şebeke dpPower programı ile modellenmiştir. Modellenme sonrası oluşan arızalardan çok sayıda tüketicinin etkilendiği ve bakım onarım maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı tip proje revize önerisi yapılmıştır. Bu sayede Konya ili Ereğli ilçesi baz alınarak gerçekleştirilen çalışmada 2018 yılı için 1.370.444,54 ₺, 2019 yılı için ise 2.024.613,93 ₺ olan arıza maliyetleri önlenmiştir. İlgili yönetmeliğe uygun olarak gerçekleştirilen hesaplamalar sonucu tip projesinin revizyon çalışması Şekil 6'da verilen autoCAD programında gerçekleştirilmiştir. Revizyon çalışmasında parafudr yeri, yıldırım düşmesi durumu göz önüne alınarak trafo platformuna taşınmıştır. Yapılan revizyonun sahada gerçekleştirilmesi ile; can ve mal kayıplarını azalacak, aynı hattan beslenen diğer abonelerin kesintiden etkilenmemesini ve arıza noktası tespitinin hızlı bir şekilde yapılması sağlanacak buna bağlı olarak yüksek maliyetli arızalar önlenecek ve müşteri memnuniyetini arttıracaktır.

Referanslar

- Akbaba, S., 2008, *Harmoniklerin Dijital Aşırı Akım Röleleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bak, C., L., Silva, F., F. 2016, “High voltage AC underground cable systems for power transmission – A review of the Danish experience, part 1.” *Electric Power Systems Research*, Cilt. 140, ss. 984-994.
- Bialek, 1999, “Insulation System Protection with Zinc Oxide Surge Arresters”. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Cilt. 15, Sayı. 1, ss. 5-10.
- Çıfci, A., Altundağ, E., Bulut, Ö. & Uysal, H. H. 2017, “Burdur İli Elektrik Dağıtım Şebekesinde Meydana Gelen Arızalara Genel Bir Bakış ve Çözüm Önerileri”. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Özel Sayı 1*, 44-55.
- Dufour, C., Mahseredjian, J., Bélanger J., 2011, "A Combined State-Space Nodal Method for the Simulation of Power System Transients", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Cilt. 26, Sayı. 2, ss. 928-935.
- Gençaydın, E., 2006, *Enerji İletim Hatlarının Nümerik Mesafe Koruma Röleleri ile Korunması*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İstanbul.
- Hasançebi, G., Yeğin, E. M., Karaarslan, K. 2020, “Elektrik Dağıtım Şebekelerinde Kendi Kendini İyileştiren Sistemler” . *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9 (1), 457-465.
- Ingole, D. A., Gohokar, P. D. V. N. 2017, “Voltage Stability Improvement in Multi-bus System Using Static Synchronous Series Compensator” *Energy Procedia*, Cilt. 43, Sayı. 8, 999–1006.
- Joseph, A., Smedley, K., & Mehraeen, S. 2020, “Secure Power Distribution Against Reactive Power Control Malfunction in DER Units”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Cilt. 36, Sayı. 3, ss. 1552-1561.
- Kakilli, A. 2013, “System analysis with the MVA Method for symmetrical three-phase faults”, *TEM Journal*. Cilt. 20, Sayı. 2, ss. 51-56.
- Küçükşümbül, İ., 2020, *Direk Tipi Trafo Tesisleri İçin Tip Proje Uygulamalarının Geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Shirakawa R., Yamada B., Tanaka E., Ejiri R., Watahiki A., and Kondo C., 2000, “Improved Zinc Oxide Surge Arresters Using High Voltage Gradient 300 V/mm, 400 V/mm ZnO Elements”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Cilt. 15, Sayı. 2, ss. 569-574.
- Şen, M., Özcan, M., 2020, “Implementation of Simulation of Possible Short Circuit Fault Situations in Wind Energy Plants By Power Analysis Program”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Ejosat Özel Sayı*, ss. 196-201.
- Şen, M., Özcan, M., 2021, “Maximum wind speed forecasting using historical data and artificial neural networks modeling”, *International Journal of Energy Applications and Technologies*, Cilt. 8, Sayı.1, ss. 6-11.
- Tulaz M.O., 2014, *Optimization of location and number of lightning arresters in 420 kV substations in turkish high voltage electricity system*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Vahidi A., Nasab C, Moghani Y. and Hosseinian M., “Electric Field and Ciltage Distribution on ZnO Surge Arrester”, *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, Tehran, 367-368, 18 Aug 2015.
- Yang, J., Li, G., Wu, D., & Suo, Z., “The impact of distributed wind power generation on voltage stability in distribution systems”, *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, APPEEC, Hong Kong, 426-431, 8-11 Dec 2013.
- Zhonglei, L., Du, B., X., Wang, L., 2012, “The calculation of circulating current for the single-core cables in smart grid”, 2012 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia, China, May, ss. 1–4.



Kauçuk Modifiye Bitüm ve Kompozit Agregata ile Üretilen Asfalt Aşınma Tabakasının Şartname Limitleri Yönüyle Değerlendirilmesi

Evaluation of the Asphalt Wearing Course Produced with Rubber Modified Bitumen and Composite Aggregate in Terms of Specification Limits

Abdulgazi Gedik¹

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 18/10/2021

Kabul/Accepted: 26/04/2022

Çevrimiçi Basım/Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Doğal taş ocaklarından üretilen agregaların tedariki esnasında yaşanan birtakım kısıtlamalar ve zorluklar bitümlü sıcak karışım üretimini olumsuz yönde etkilemektedir. Farklı taş ocaklarından temin edilen agregaların bir arada kullanılmasının hem çevresel açıdan hem de doğal kaynakları daha efektif kullanmak açısından etkili olabileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla, bu çalışmada farklı iki ocaktan temin edilen bazalt ve kalker tipli agreganın kompozit agregata şeklinde asfalt betonu üretimindeki kullanılabilirliği araştırılmıştır. Karışımda kullanılacak performans dereceli hedef bağlayıcıyı (KMB 76-16); saf B50/70 penetrasyon dereceli bitümün optimum miktarda (%10) kauçukla modifikasyonu sonucunda elde edilmiştir. Daha sonra bu bağlayıcı ve %55'i bazalttan %45'i kalkerden oluşan kompozit agreganın karışım tasarımı yapılmıştır. Asfalt aşınma tabakasında kullanılması düşünülen karışımlar Marshall dizayn yöntemine göre üretilmiştir. Kompozit agreganın karışım üzerindeki etkisini daha fazla anlamak için standart Marshall numunelerinin mekanik özellikleri (stabilite ve akma) ve hacimsel parametreleri (agregalar arası boşluk oranı, bağlayıcı ile dolu boşluk oranı, hava boşluk oranı ve hacim özgül ağırlığı) araştırılmıştır. Bu çalışmadaki sonuçlara göre; bazalt ve kalkerden oluşan kompozit agreganın %5.7 oranında kauçuk modifiyeli bitüm ile karıştırılmasıyla elde edilen asfalt betonunun Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) teknik şartnamesinde belirtilen kriterleri sağladığı ve aşınma tabakasında kullanılabileceği kanaatine varılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Bazalt, Kalker, Kompozit Agregata, Kauçuk Modifiyeli Bitüm, Asfalt Aşınma Tabakası”

Abstract

Some restrictions and difficulties during the supply of aggregates from natural stone quarries adversely affect the production of hot bituminous mixture. It is thought that the combined use of aggregates obtained from different quarries may be effective both in terms of the environment and the efficacious use of natural resources. Therefore, this study investigated the incorporation of composite aggregate (basalt and limestone obtained from two different quarries) into asphalt concrete. The target performance graded binder (KMB 76-16) was obtained by modification of pure B50/70 bitumen with optimum amount (10%) of rubber. Then, a mixture design with this binder and composite aggregate (55% basalt and 45% limestone) was made. The mixtures to be used in the asphalt wear layer were produced according to the Marshall method. To further understand the effect of composite aggregate, mechanical properties (stability and flow) and volumetric parameters (voids in mineral aggregate, voids filled with binder, air void and volume specific gravity) of standard Marshall samples were investigated. The results indicate that the asphalt concrete with composite aggregate (basalt and limestone) and 5.7% rubber modified bitumen meets the criteria stated in the Turkish General Directorate of Highways' (KGM) specifications and can be used in the wearing course.

Key Words

“Basalt, Limestone, Composite Aggregate, Rubber Modified Bitumen, Asphalt Wearing Course”

1. Giriş

Asya, Avrupa ve Afrika kıtasının birbirine en fazla yaklaştığı yerde bulunan Türkiye jeopolitik açıdan lojistik bir üs konumundadır. Bölünmüş karayolu ağı, konvansiyonel ve yüksek hızlı demiryolu ağı, hinterlandı geniş limanları ve dünyanın birçok ülkesine uluslararası sefer düzenleyen geniş uçuş filosu ile Türkiye ulaştırma sektöründe lider ülkeler arasında yer almaktadır. Karayolu ulaşımı; sunduğu esneklik nedeniyle gerek yolcu gerekse yük taşımacılığı alanında Türkiye’de ulaştırma sektörleri arasında en çok tercih edilen çeşittir. Karayoluna gösterilen bu talep artışını karşılayabilmek için Türkiye’de son yıllarda bölünmüş yol yapım çalışmalarına ve dolayısıyla karayolu üstyapı imalatlarına büyük bir hız verilmiştir. Karayollarının yapımı, bakımı, onarımı ve işletmesinden sorumlu olan Karayolları Genel Müdürlüğü’nün (KGM) 2021 yılı verilerine göre Türkiye’nin karayolu ağı toplam 68633 kilometre uzunluğunda olup bu yolların 27320 km’si beton asfalt ile 37922 km’si sathi kaplama ile kalanı ise çeşitli üstyapı malzemeleri ile kaplıdır (KGM, 2021).

Bitümlü sıcak karışım; taş ocağında üretilmiş, kırılmış ve elenmiş belirli boyutta ve belirli bir fraksiyondaki kaba agregaya, ince agregaya ve fillerin bitümlü bir bağlayıcı ile sıcak asfalt plentinde karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Pahalı bir imalat olan bu karışımların herhangi bir bakım onarım çalışmasına ihtiyaç duymadan uzun yıllar hizmet verebilmesi için ilgili teknik şartnameler doğrultusunda çok iyi ve sorunsuz bir şekilde hazırlanması gerekmektedir. Kullanılacağı üstyapı tabakasına (aşınma, binder ve bitümlü temel) ve özelliğine bağlı olarak değişmekle birlikte beton asfalt; genel olarak yaklaşık %95 oranında agregaya (kaba ve ince) ve filler, %5 oranında ise asfalt çimentosu içermektedir. Her ne kadar maliyet ve performans anlamında bağlayıcının karışım üzerindeki rolü çok etkin olsa da büyük ölçekte kullanılan kaba ve ince agreganın önemi yadsınamayacak derecede yüksektir.

Türkiye Cumhuriyeti, Ticaret Bakanlığı, Maden Metal ve Orman Ürünleri Dairesi tarafından 2021 yılında hazırlanan Doğal Taşlar Sektör Raporu’na göre Türkiye’de yaklaşık 1500 adet doğal taş ocağı bulunmaktadır (Türkiye Ticaret Bakanlığı, 2021). Ülkemizde bulunan bu ocaklardaki kayaçlar jeolojik yapılarına göre volkanik, tortul ve metamorfik olmak üzere 3 temel grupta kategorize edilmektedir. Başlıca volkanik kayaç tipleri; granit, siyenit, diyorit, bazalt, diyabaz ve gabro tortul kayaç tipleri; kalker, kumtaşı, çört ve tortulu şist metamorfik kayaç tipleri ise gnays, şist, kayağantaşı, kuvarsit, mermer ve serpantindir (Roberts vd., 1996). Bu kayaç tipleri içerisinde ülkemizde asfalt betonu üretiminde en çok kullanılanlar bazalt, kalker ve kumtaşıdır.

Yaygın bir volkanik kayaç tipi olan bazalt; siyah renkte ve kesif yığınlar halinde olup doğada genellikle kütle, damar ve akıntı halinde bulunmaktadır (Wikipedia, 2021). Sert ve yüksek aşınma dirençli bu kayaç, dünyanın çoğu yerinde bol miktarda bulunması itibariyle karayolu ve demiryolu üstyapısında sıkça kullanılmaktadır. Morfolojik olarak veziküler dokuda olan bazalt çok hızlı bir şekilde erimiş kayaların soğuması nedeniyle ince taneli mineral bir doku içermektedir. Kimyasal olarak MgO ve CaO açısından zengin, Na₂O ve K₂O bakımından ise fakir olup genellikle %45-53 oranında SiO₂ içermektedir (USGS, 2018). Bazaltın ortalama yoğunluğu yaklaşık 3.0 t/m³’dür.

Kireç taşı olarak da bilinen kalker; Türkiye’de çok yaygın bir kayaç tipi olup Türkiye coğrafyasının yaklaşık %20’sini kaplamaktadır (Varış, 2019). Yaklaşık %90 oranında kalsiyum karbonat (CaCO₃) içeren kalker az miktarda da magnezyum karbonat (MgCO₃) içermektedir. Beyaz-gri renkte olan kalkerin yoğunluğu poroz yapısına bağlı olarak 1.5 ile 2.7 t/m³ arasında değişmektedir. Uzun ömürlü olması, dış etkenlere karşı yüksek dirençli olması, ucuz ve kolay erişilebilir olması nedeniyle kalker inşaat sektörünün birçok alanında tercih edilmektedir. Ülkemizde özellikle beton ve asfalt üretiminde sıkça kullanılmaktadır.

Diğer bir tortul kayaç tipi olan kumtaşı genellikle boyutu 0.0625 ile 2 mm arasında değişen danelerin doğal bir çimento ile bağlanmasıyla oluşmuştur. Kuvars ve feldispat içerikli olması nedeniyle kumtaşının hava koşullarına karşı direnci yüksektir. Dolayısıyla inşaat sektörünün birçok alanında olduğu gibi bitümlü sıcak karışım üretiminde de kumtaşı yaygın olarak kullanılmaktadır.

Beton asfalt üretiminde kullanılacak agregaların jeolojik olarak aynı kökenli olması her ne kadar çok arzu edilse de bu durum günümüzde bazen pek mümkün olamamaktadır. Bilhassa taş ocağı sayısı ile rezervinin kısıtlı olduğu ve ruhsatlandırma işlemlerinin daha zor olduğu şehirleşme alanları ile taş ocağı-plent-işyeri arasındaki taşıma mesafelerinin fazla olduğu ve ulaşımında diğer zorlukların ve aksamaların yaşandığı metropolitan alanları tek tip agregaya üretimi için pek elverişli değildir. Dolayısıyla ihtiyacın çok fazla olduğu bu tür yerlerde, farklı taş ocaklarından temin edilen farklı menşeli agregaların belli oranlarda bir araya getirilerek bitümlü sıcak karışım üretiminde kullanılması kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında iki farklı ocakta üretilen bazalt ve kalkerin kompozit agregaya şeklinde kauçukla modifiye edilmiş bitümlü birlikte kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu doğrultuda bağlayıcı modifikasyonunda kullanılacak optimum kauçuk oranı belirlendikten sonra asfalt aşınma tabakası dizaynı için kompozit agregalı karışımların bitüm içerikleri ve diğer teknik özellikleri laboratuvarında tespit edilmiştir. Daha sonra mekanik (stabilite ve akma) ve hacimsel (boşluk oranları ve yoğunluk) parametreleri hesaplanan bu karışımların ilgili teknik şartnamelere uygunluğu araştırılmıştır.

2. Literatür Taraması

Önceki çalışmalarda farklı kayaç tiplerinin kombine olarak kullanımının bitümlü mastik seviyesinde, agregaya seviyesinde ve bitümlü sıcak karışım seviyesindeki etkileri araştırılmıştır.

Mastik seviyesinde yapılan bir çalışmada; bazalt + sönmüş kireç ve bazalt + uçucu külün mineral filler olarak kullanımı yaşlanma ve kırılma mekaniği açısından incelenmiştir (Das&Singh, 2019). Sönmüş kireç ve uçucu külün farklı özellikleri (yapısı, yüzey dokusu, mineralojisi ve etkileşim kapasitesi) bitümlü mastiklerin performansını değişik şekilde etkilemekle birlikte sönmüş kirecin bazaltla birlikte kullanımı uçucu külün bazaltla birlikte kullanımına nazaran mastiğin yaşlanma ve kırılma direncinde daha fazla artışa yol açmıştır.

Maiah ve Al-Khateeb (2012) bazalt ve kalkerin birlikte kullanımının Superpave agregası özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu çalışma toplam agregadaki bazalt oranının hem iri hem de ince agregalar için özgül ağırlık ve absorpsiyon değişikliği üzerinde kaydedeğer bir fark oluşturmadığını göstermiştir. Ancak bazalt miktarındaki artış, yassı ve uzun dane miktarı ile Los Angeles aşınma miktarında önemli bir düşüşe yol açarken kaba agregası açısallığı ve kum eşdeğerliliğinde büyük bir artışa yol açmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada nihai agregası karışımındaki bazalt miktarının çok etkili olduğu ve bazaltın kalker ile birlikte kullanımının beton asfalt özellikleri üzerinde önemli değişiklikler doğuracağı kanaatine varılmıştır.

Sönmez vd. (2009) tarafından İstanbul bölgesinde yapılan bir araştırmada bazalt, kalker, kumtaşı ve doğal kumdan oluşan kompozit agregalar beton asfalt üretiminde kullanılmıştır. Bu araştırmada kaba agregası bazalt olan bitümlü sıcak karışımın bağlayıcı miktarının daha az; yoğunluğunun ve bitümlü dolu boşluk yüzdesinin ise daha yüksek olduğu görülmüştür. Kaba agregası kalker olan karışımlarda ise hava boşluğu, Marshall stabilitesi ve akma değerinin bazalt içerikli karışımlardakine nazaran daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Kumtaşı ile yapılan karışımlara ait hava boşluğu bazalt ve kalkerli karışımlara göre daha yüksek iken Marshall stabilitesi ve akma değerinin gerek bazalt gerekse kalker içerikli karışımlardan daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Özet olarak; bu çalışma ile İstanbul gibi büyük şehirlerde kısıtlı rezerv ve artan ihtiyaç nedeniyle farklı menşeli agregaların beton asfalt imalatında birlikte kullanılmasının önemi vurgulanmıştır.

Cao vd. (2013) bazalt ve kalkerden yapılan taş mastik asfaltın (TMA) yüksek sıcaklık özelliklerini incelemiştir. Kaba ve ince bazalt agregalı TMA (B-TMA), kaba ve ince kalker agregalı TMA (K-TMA) ile kaba bazalt agregası ve ince kalker agregalı TMA (BK-TMA) olmak üzere 3 farklı tipte karışım hazırlanmıştır. Eğilme sünme testi sonuçları doğrultusunda kurulan Burger modeline göre yüksek sıcaklıkta en iyi performansı saf bazalt içerikli TMA (B-TMA) sergilemiş olup onu BK-TMA ve K-TMA izlemiştir. Eğilme sünme oranına göre yapılan varyans analizi B-TMA ve BK-TMA'nın yüksek sıcaklık davranışı arasındaki farkın istatistiksel olarak önemli olduğunu göstermişken; K-TMA ve BK-TMA arasında ise önemli bir farkın olmadığını göstermiştir. TMA'lardaki bazalt miktarını azaltmayı hedefleyen bir başka çalışmada Iskender (2013) kaba agregası tamamıyla bazalt, ince agregası ve mineral fillerini bazalt + kalkerden oluşan 4 farklı fraksiyondaki TMA'larda tekerlek izi performansını ölçmüştür. Laboratoire Central des et Chausées (LCPC) tekerlek izi ölçüm cihazı ile yapılan sonuçlara göre TMA'larda kalkerin ince agregası veya filler olarak miktarının artırılması tekerlek izi dayanımında sadece ihmal edilecek düzeyde (%0.24 - %0.41) düşüşlere neden olmuştur.

Kong vd. (2017) bazalt, kalker ve andezit agregalarından oluşan farklı kombinasyonlardaki kompozit agregaların bitümlü temel tabakasında (BTT) kullanılabilirliğini hacimsel ve mekanik açıdan araştırmıştır. Yapılan bu çalışmaya göre; saf kalkerin kaba ve ince agregası olarak kullanımı BTT'nin boşluk oranını efektif bir şekilde azaltırken; bazalt + kalker içerikli BTT'de kalker oranının artması boşluk oranının azalmasında önemli ölçüde etkili olabilmektedir. Ancak bazalt + andezitten yapılan BTT'de andezit oranının artması karışımın hacimsel özelliklerinde herhangi bir değişikliğe yol açmamıştır. Marshall stabilite testi, 4 nokta bükülme testi ve donma-çözülme yarıma testi; alkali kaba agregası kullanımının BTT'nin mekaniksel özelliklerinde iyileşmeler sağladığını; bazalt ile kalkerin birlikte kullanımının ise BTT'nin direncini büyük ölçüde artırdığını ortaya koymuştur.

Kalkerden yapılan ve böylece %30 daha az maliyetli poroz asfalt beton, bazaltla yapılanına göre hemen hemen aynı derecede fonksiyonel olsa da daha iyi bir performans sergileyememiştir. Zhou vd. (2014) tarafından yapılan çalışmaya göre kalkerli poroz asfaltın performansını arttırmak için düşük yassılık oranlı ve düşük ufalanma değerli kübik şekilli agregaların kullanılması gerekmektedir. Ayrıca kalker içerikli poroz asfalt için Marshall üretim sıcaklığının 155°C, sıkıştırma darbe sayısının ise 35 olması önerilmiştir.

3. Modifiye Bağlayıcı Hazırlama ve Yöntemi

TÜPRAŞ Batman rafinerisinden temin edilen B50/70 penetrasyon dereceli geleneksel asfalt çimentosu bu deneysel çalışmada temel bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Bağlayıcı modifikasyonunda modifiye edici ajan olarak seçilen kauçuk, saf bağlayıcının ağırlıkça üç farklı yüzdesi oranında (%8, %10 ve %12) kullanılmıştır. Bu kauçuk oranları ile modifiye edilmiş bitümlere, ülkemizde ve dünyada yaygın olarak uygulanan bağlayıcı deneyleri tatbik edilmiştir ve bu bağlayıcıların Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) tarafından KMB 76-16 için belirtilen kriterlere uygunluğu araştırılmıştır.

400 gram ağırlığındaki saf B50/70 penetrasyonlu bitüm fırında akıcı hale gelene kadar 160°C sabit sıcaklıkta 1 saat ısıtılmıştır. %8, %10 ve %12 oranında ilave edilecek kauçuk miktarları hassas dijital terazide ölçülerek hazırlanmıştır. Daha sonra kauçuk, geleneksel bağlayıcıya homojen dağılım sağlayacak şekilde eklenmiştir ve modifiye bitüm numuneleri elektromekanik bir blendirde 165°C sabit sıcaklıkta ve 1000 dakika/devir sabit karıştırma hızında hazırlanmıştır. Karıştırma işlemi esnasında ortaya çıkabilecek herhangi bir buharlaşmayı, oksitlenmeyi ve yaşlanmayı asgari düzeyde tutabilmek için ve ayrıca sabit ısı bir karıştırma ortamı elde edebilmek için karışım süresince elektromekanik blendirin üzeri bir kapak ile kapatılmıştır. Böylece karışımın ortam havasıyla olan teması minimum

düze indirgenmiştir. Karıştırma işleminden sonra elde edilen numuneler ağzları sıkıca kapatılan cam şişelerde gün ışığından ve ısıdan etkilenmeyecek şekilde kapalı bir ortamda muhafaza edilmiştir.

Bitümlü sıcak karışımlarda hem kısa sürede hem de uzun sürede yaşlanma görülmektedir. Kısa vadede yaşlanma daha çok karışımın asfalt plentinde üretilmesi, işyerine taşınması ve serilip sıkıştırılması esnasında oluşurken; uzun vadede yaşlanma hizmete açılmış yollardaki kaplamaların gerek trafik yüklerine gerekse çevresel faktörlere maruz kalması nedeniyle oluşmaktadır (Huang, 2008). Karışımdaki bağlayıcının yaşlanması, oksidatif etkenlere maruz kalan bitümdeki çeşitli uçucu bileşenlerin bozulması ve diğer bileşenlere dönüşmesi nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bağlayıcının ısıtılması ve asfalt plentinde sıcak agregayla karışımı esnasındaki oksidasyon ve buharlaşma kaynaklı yaşlanmayı laboratuvar ortamında simüle etmek için bir takım kısa vadeli yaşlandırma deneyleri bulunmaktadır. Bu çalışmadaki numuneler, TS EN 12607-1 standartları (8 adet şişeye yerleştirilmiş 35 gram ağırlığındaki her bir bağlayıcının 85 dakika 163°C'de 15±0.2 devir/dakika hızla döndürülerek ısıtılması) doğrultusunda uygulanan döner ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) ile kısa vadede yaşlandırılmıştır. Hizmete açılmış asfalt kaplamalı bir yolun servis ömrü süresince bağlayıcısının maruz kalacağı uzun süreli yaşlanmayı laboratuvar ortamında simüle etmek için çeşitli uzun vadeli yaşlandırma deneyleri bulunmaktadır. Bunlar içinde en yaygın olarak kullanılan basınçlı yaşlandırma kabı (PAV), bu çalışmada daha önceden RTFOT ile yaşlandırılmış numunelere uygulanmıştır. PAV ile uzun vadede yaşlandırma, TS EN 14769 standartları doğrultusunda 10 tane 3.2 mm film kalınlığına sahip 50 gram ağırlığındaki bağlayıcının 100°C'de 2.1 MPa basınca 20 saat maruz bırakılması ile gerçekleştirilmiştir.

4. Bağlayıcı Deneyleri

Kauçuk ile modifiye edilmiş bağlayıcılara; orijinal durumda, RTFOT ile yaşlandırıldıktan sonra ve RTFOT+PAV ile yaşlandırıldıktan sonra hem geleneksel hem de yeni nesil performans deneyleri uygulanmıştır.

4.1. Taze bağlayıcı deneyleri

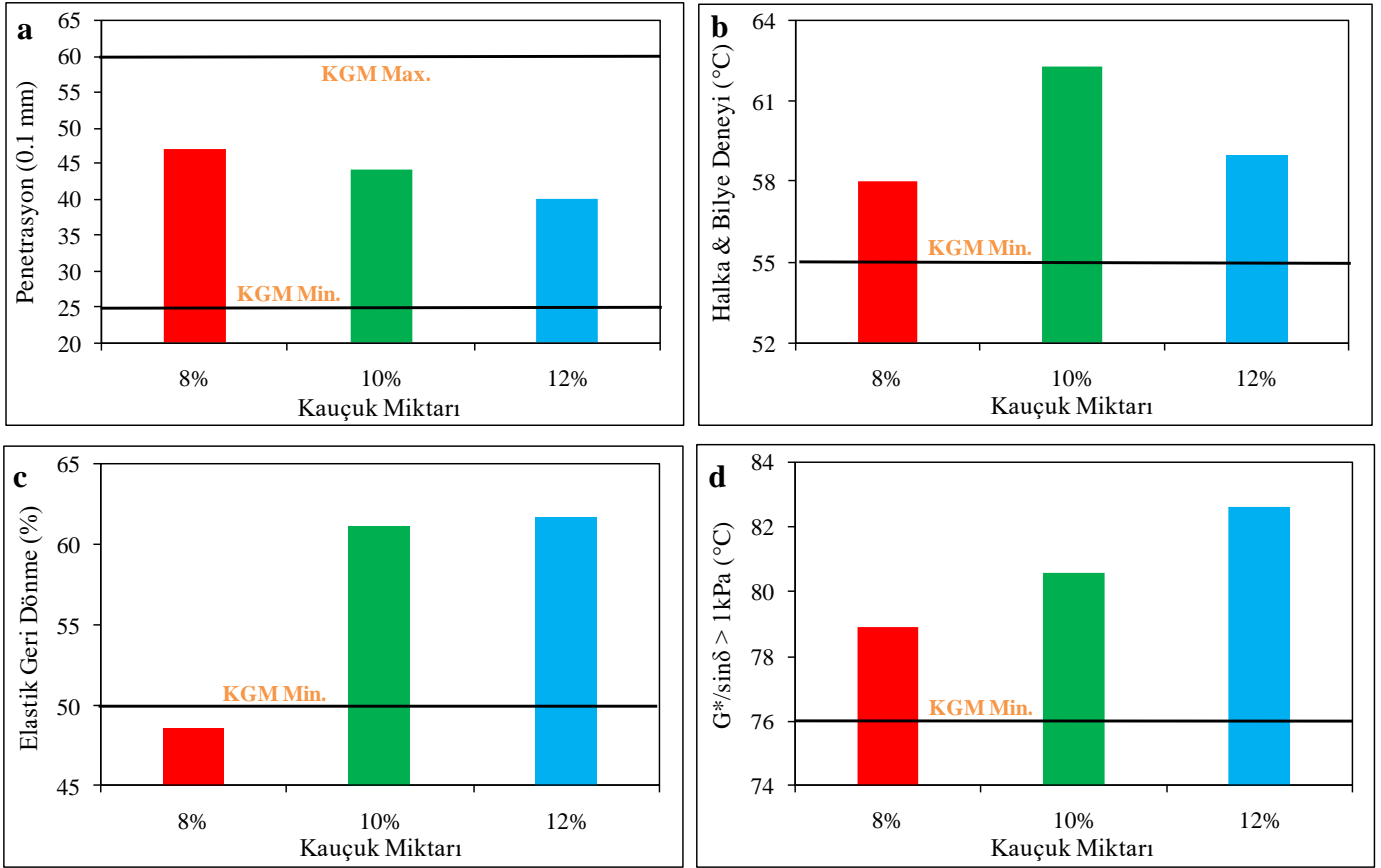
Orijinal numunelerin standart özelliklerini tayin etmek için parlama noktası, özgül ağırlık, penetrasyon testi, halka & bilye deneyi ve elastik geri dönme testi; viskoelastik performansını tayin etmek için Dinamik Kesme Reometresi (DSR) testi tatbik edilmiştir.

TS EN ISO 2592 ve TS EN 15326 standartlarına göre uygulanan parlama noktası ve özgül ağırlık deneyi; modifiye edilmiş her bir bağlayıcının kauçuk oranından bağımsız olarak 240°C'nin üzerinde bir parlama noktasına ve 1.04 özgül ağırlığa sahip olduğunu göstermiştir. KTŞ, KMB 76-16 bağlayıcı sınıfı için özgül ağırlık değerinin 1.0 ile 1.1 arasında olmasını; parlama noktasının ise en az 220°C olmasını şart koşmaktadır ki bu çalışmadaki %8, %10 ve %12 kauçuk içeren her bir bağlayıcı bu iki şartı da yerine getirmektedir.

TS EN 1426 standartlarına göre 5 saniye süresince 100 gram ağırlığındaki standart bir iğnenin 25°C'de su banyosundaki %8, %10 ve %12 kauçuklu modifiye bağlayıcılara batma derinliği olarak okunan penetrasyon değerleri Şekil 1 (a)'da gösterilmiştir. Penetrasyon okumalarının artan kauçuk miktarı ile uyumlu bir şekilde azaldığı, bir başka deyişle bağlayıcı kıvamının arttığı görülmektedir. %8 kauçuk içeren modifiye bağlayıcının penetrasyonu 47 d-mm iken, kauçuk oranının ilave %2 oranında artırılması penetrasyonda 3 ve 7 d-mm'lik düşüşe yol açmıştır (10% ve 12% kauçuk içeren bağlayıcılar için sırayla 44 d-mm ve 40 d-mm). Şekil 1 (a)'dan da anlaşılacağı üzere KTŞ tarafından KMB 76-16 bağlayıcı için belirlenen alt ve üst penetrasyon sınır değeri 25 d-mm ve 60 d-mm olup bu çalışmadaki her bir KMB için okunan penetrasyon derecesi bu limit değerler içinde kalmaktadır.

Yumuşama noktası deneyi olarak da bilinen halka & bilye testi bağlayıcı viskozitesinin indirekt bir ölçümüdür. Bitümlü bağlayıcıların özellikle yüksek sıcaklıklardaki direnci hakkında fikir veren bu test; saf su veya gliserin banyosunda ısıtılmakta olan numunenin yumuşayarak 3.5 gram ağırlığındaki standart çelik bilyeleri artık taşıyamaz hale geldiği andaki sıcaklığı belirlemektedir. Bu çalışmada TS EN 1427 standartları doğrultusunda yapılan teste ait sonuçlar Şekil 1 (b)'de verilmektedir. Artan kauçuk oranı ile yumuşama noktası değerinde düzenli bir değişimin olmadığı görülmektedir. %8, %10 ve %12 kauçuk içeren KMB'nin yumuşama noktası sırasıyla 58°C, 62.3°C ve 59°C'dir. Elde edilen her bir değer KTŞ tarafından KMB 76-16 için belirlenen alt değer şartını ($\geq 55^\circ\text{C}$) yerine getirebilmekle birlikte %10 kauçuklu bağlayıcının yüksek sıcaklıklara karşı daha az duyarlı olacağı anlaşılmaktadır. Bu çalışmadaki sonuçlara benzer şekilde Radziszewski vd. (2004) yumuşama noktasının kauçuk modifikasyonu ile 65°C'ye kadar yükselebileceğini göstermiştir.

Vizkoelastik davranış sergileyen ve termoplastik bir ürün olan asfalt çimentosu; yüklemenin miktarına, süresine ve sıcaklığına bağlı olarak tekrarlayan trafik yükleri altında farklı özellikler sergileyebilmektedir. Yüksek yüklenme hızında deformasyona uğrayan bağlayıcı, üzerindeki yük kaldırıldığında elastik davranış göstererek yüklenmeden önceki ilk haline geri gelebilmektedir. Bağlayıcının bu elastik özelliği, malzemenin yorulma direncinin ölçülmesi ve herhangi bir çatlak ya da bozulma olmaksızın büyük ölçekli basınçları ne kadar sönümleyebileceğinin bir göstergesidir. Yapısal özelliği itibarıyla kauçuk, bağlayıcı ile birlikte kullanılması durumunda bitüme önemli miktarda elastik özellik katabilmektedir. Bu çalışmadaki KMB'lere TS EN 13398 standartlarında yapılan elastik geri dönme test sonuçları Şekil 1 (c)'de gösterilmektedir. %8 kauçuk içerikli KMB; KTŞ tarafından belirlenen minimum elastik geri dönme şartını (≥ 55) sağlayamazken kauçuk miktarının artırılması KMB 76-16 için hedeflenen elastik özelliği kazandırabilmektedir. %10 ve %12 kauçuklu KMB için elastik geri dönme %61.1 ve %61.7 olup bu iki bağlayıcı arasındaki fark ihmal edilecek kadar azdır. Geçmişteki bir çalışmada kauçuğun bitüme eklenmesiyle elastik geri dönüşün %5-10'dan yaklaşık %75'e kadar artabileceği gösterilmiştir (Pilat vd., 2000).



Şekil 1. Taze Numunelere Ait (a) Penetrasyon; (b) Halka & Bilye Deneyi; (c) Elastik Geri Dönme; (d) DSR Yenilme Sıcaklığı.

Servise açılmasıyla birlikte saf bağlayıcı içeren asfalt kaplamalı yollarda kısa bir süre sonra tekerlek izi bozulmaları sıkça görülmektedir. Tekrarlayan trafik yükleri bu tür üstyapılarda ilave konsolidasyonlara, bu da özellikle ağır tonajlı taşıtların seyrettiği sağ şeritte oluklanmalara neden olmaktadır. Sürüş konforunu ve güvenliğini önemli ölçüde azaltan tekerlek izi, esnek üstyapılı yollarda görülen ciddi bir kalıcı deformasyon türüdür. Serme-sıkıştırma kalitesi, kaplama kalınlığı, karışım tasarımı, agrega çeşidi ve dokusu gibi birçok etken tekerlek izi oluşumunda rol oynasa da bitümlü bağlayıcının çeşidi, performans derecesi ve miktarı büyük önem arz etmektedir (Bahia&Anderson, 1995a; Roberts vd., 1996; Zaniewski&Pumphrey, 2004). Artan sıcaklıklarda beton asfalttaki bağlayıcının daha akışkan hale geldiği göz önünde bulundurulduğunda, tekerlek izi oluşumunu engellemek için bağlayıcının bilhassa yüksek sıcaklıklardaki reolojik davranışının incelenmesi gerekmektedir. DSR olarak da bilinen Dinamik Kesme Reometresi testi; birçok malzemenin araştırma, geliştirme ve kalite kontrolünde kullanıldığı gibi modifiye bitümlü bağlayıcıların performansını belirlemek için de kullanılmaktadır. 1993'den günümüze dek Superpave tarafından kullanılan DSR; asfalt çimentosunun hem katı halde hem de erimiş haldeki reolojik davranışlarını anlamak ve karakterize etmek için tüm dünyada sıkça uygulanan bir deneydir. Bu deney genel olarak 10 ile 150°C arasında uygulanmakta olup bitümlü bağlayıcının istenen sıcaklıklardaki kompleks modülünü (G^*) ve faz açısını (δ) ölçmektedir. Bu iki verinin kullanılmasıyla tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) hesaplanmaktadır. Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP) tarafından geliştirilen ve ülkemizde KGM tarafından da kullanılan bu parametrenin; orijinal bitümler için 1.59Hz frekansında yapılan DSR testinde en az 1.0 kPa olması istenmektedir. Bu şartın sağlandığı yenilme sıcaklıkları Şekil 1 (d)'de gösterilmektedir. KTS, KMB 76-16 için sınır değer en az 76°C olmasını şart koşmakta olup bu çalışmadaki kauçuk ile modifiye edilmiş her bir bitümün bu şartı yerine getirdiği görülmektedir (%8, %10 ve %12 kauçuk içerikli KMB'ler için yenilme sıcaklıkları sırasıyla 78.9°C, 80.6°C ve 82.6°C'dir).

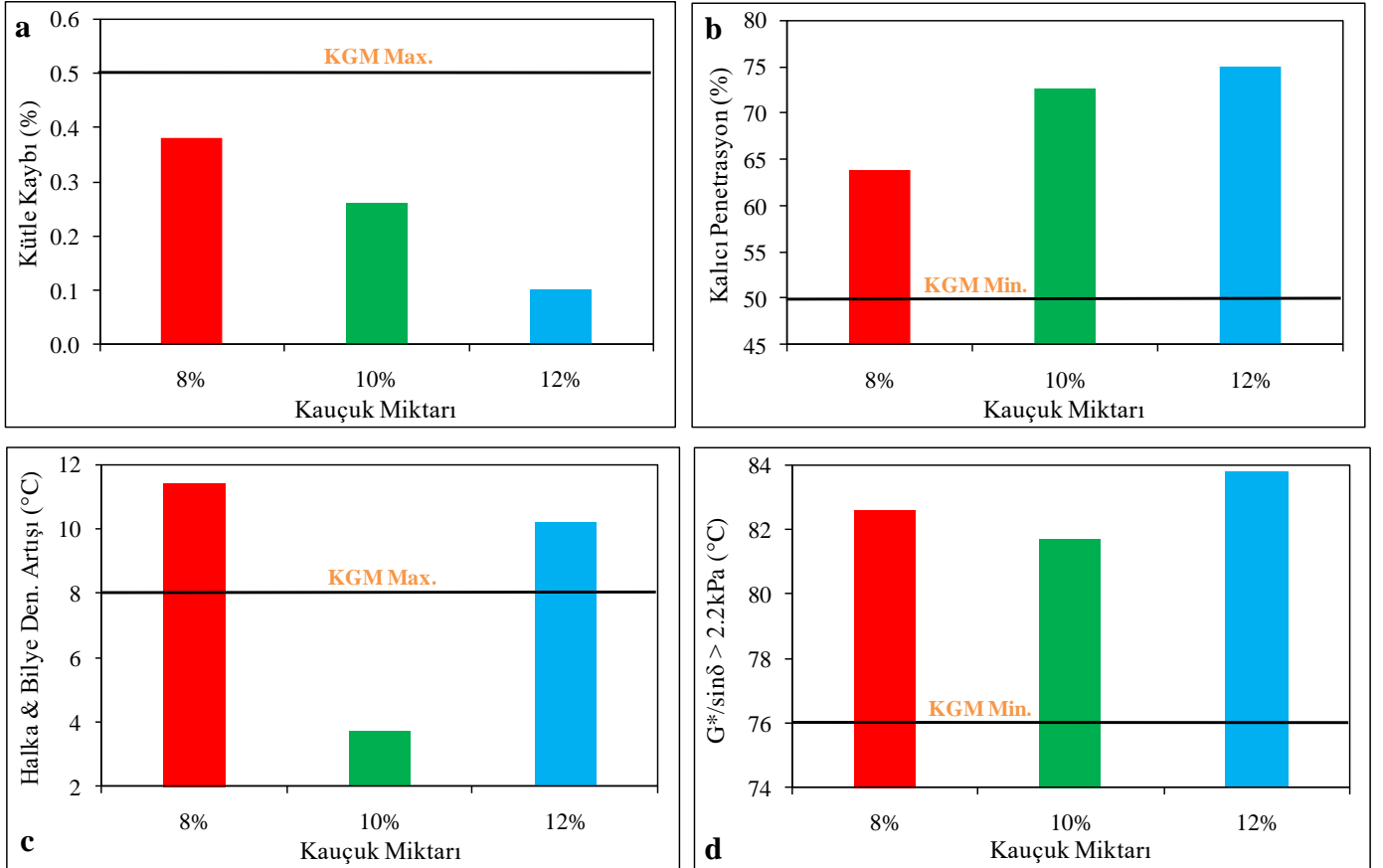
4.2. RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcı deneyleri

Beton asfalt üretimi ve serme-sıkıştırma işlemleri sırasında bağlayıcıda meydana gelebilecek olası kütle kaybı RTFOT deneyi esnasındaki kütle değişimi ile öngörülebilmektedir. Bu çalışmadaki numunelerde kısa vadede yaşlandırma işlemi nedeniyle meydana gelen kütle kaybı Şekil 2 (a)'da gösterilmiştir. Kauçuk miktarının artırılması bitümün içindeki hafif ve uçucu maddelerin yaşlanmaya bağlı kaybını azaltmaktadır. %8, %10 ve %12 kauçuk içeren numunelerde sırasıyla %0.38, %0.26 ve %0.1 kütle kaybı görülmüş olup bu değerlerin her biri KTS tarafından belirlenen maksimum değer (%0.5) altında kalmaktadır.

Yaşlanma nedeniyle bağlayıcıların kıvamındaki artış, bitümün maruz kaldığı ısı ve karıştırma süresine bağlı olarak değişmekte olup ilk penetrasyon değerlerinde 30, 40 veya 50 d-mm'ye kadar düşüşler görülebilmektedir. Ancak diğer uluslararası şartnamelerde de

belirtildiği üzere KTŞ yaşlanma sonrası kalıcı penetrasyon oranının en az %50 olmasını şart koşmaktadır. Şekil 2 (b)'de de görüleceği üzere bu çalışmadaki nihai penetrasyon değerleri artan kauçuk değeri ile artmakta olup (%8, %10 ve %12 kauçuk için %63.8, %72.7 ve %75) alt limit şartını yerine getirmektedir.

Kısa vadede yaşlandırma Şekil 2 (c)'de de görüleceği üzere; düşük (%8) ve yüksek (%12) miktarda kauçuklu bağlayıcıların halka & bilye değerinde önemli bir artışa (11.4 ve 10.2°C) yol açarken orta düzeyde (%10) kauçuklu bağlayıcılarda nispeten daha az bir artışa (3.7°C) neden olmuştur. KTŞ, RTFOT yaşlandırması sonrasında KMB 76-16 bitüm sınıfı için yumuşama noktasındaki artışın en fazla 8°C; azalmanın ise en fazla 2°C olmasını şart koşmaktadır. İstenen limit değerlerini bu çalışmada sadece %10 kauçuk ile modifiye edilmiş bağlayıcı sağlayabilmektedir.



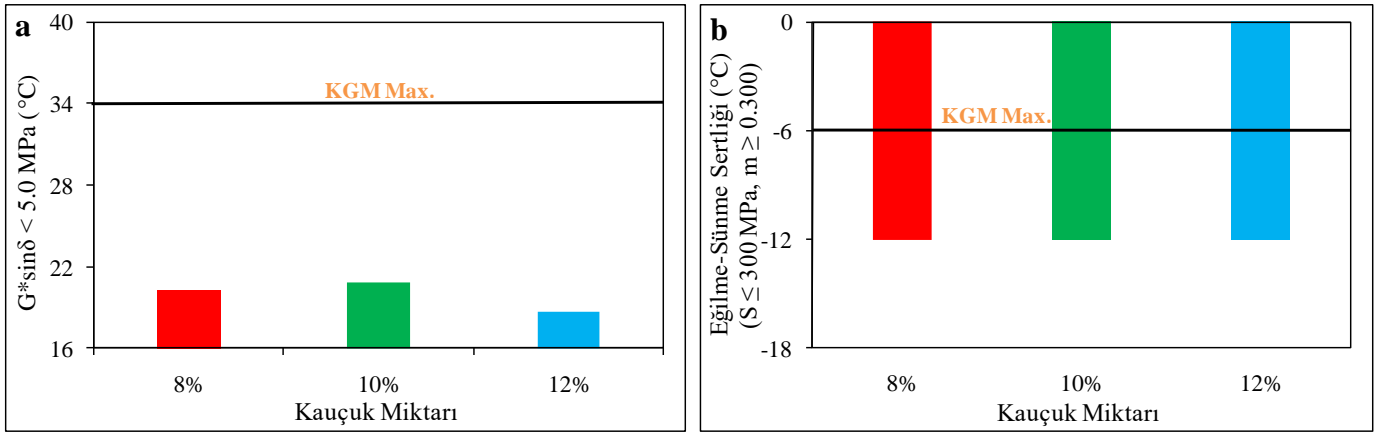
Şekil 2. RTFOT ile Yaşlandırılmış Numunelere Ait (a) Kütle Kaybı; (b) Kalıcı Penetrasyon; (c) Halka & Bilye Deneyindeki Artış; (d) DSR Yenilme Sıcaklığı.

Tekrarlanan ağır tonajlı trafik yükü altındaki asfalt çimentosu sıcak iklimli bölgelerde viskoz davranış sergileyebilmektedir. Özellikle yüksek servis sıcaklıklarında asfalt kaplamadaki bağlayıcının karışım içindeki boşluklara geçmesiyle tekerlek izi deformasyonunda artışlar görülebilmektedir. Bu artışları engellemek/minimize etmek için SHRP, tekerlek izi parametresinin ($G^*/\sin\delta$) kısa vadede yaşlandırılmış bağlayıcılar için 1.59Hz frekansta uygulanan DSR testinde 2.2 kPa'dan büyük olmasını istemektedir. KGM tarafından da kabul edilen bu şartın yerine geldiği minimum yenilme sıcaklıkları Şekil 2 (d)'de gösterilmektedir. %8, %10 ve %12 kauçuk içeren RTFOT ile yaşlandırılmış numunelerin yenilme sıcaklıkları sırayla 82.6°C, 81.7°C ve 83.8°C olup bu değerlerin her biri KTŞ'de KMB 76-16 için belirlenen minimum şartı (76°C) yerine getirmektedir. Ayrıca Kalabinska vd. (1999) kauçuk ile modifiye edilmiş bağlayıcıların yaklaşık 90°C'ye kadar geniş bir viskoelastisite sıcaklık aralığına sahip olabileceğini belirtmiştir.

4.3. RTFOT+PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcı deneyleri

Timsah sırtı çatlaması olarak da bilinen yorulma çatlaması trafiğe açılmış asfalt kaplamalı yollarda sıkça görülen bir bozulma türüdür. Çevresel faktörler, kaplama kalınlığı, trafik dingil yükleri, karışım dizaynı gibi birçok etken yorulma çatlaması üzerinde rol oynarken beton asfalttaki uzun vadede yaşlanmış bağlayıcının rolü de yadsınamayacak boyuttadır. Öngörülen hizmet süresi boyunca asfalt kaplamalı yollarda bu tür bozulmaların önüne geçebilmek için SHRP; 1.59Hz frekansında tatbik edilen DSR deneyinde RTFOT+PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcının yorulma parametresinin ($G^*/\sin\delta$) 5000 kPa'dan az olmasını istemektedir. KGM tarafından da benimsenen bu şartın sağlandığı yenilme sıcaklıkları Şekil 3 (a)'da gösterilmiştir. Yorulma çatlağı parametresinin en fazla 5000 kPa olduğu sıcaklıklar %8, %10 ve %12 kauçuk içerikli bağlayıcılar için sırasıyla 20.3°C, 20.8°C ve 18.7°C olup bu değerler KTŞ'de KMB 76-16 bitümü için belirlenen yenilme sıcaklığı şartını ($\leq 34^\circ\text{C}$) yerine getirmektedir.

Trafik yüklerine ilaveten olumsuz çevre koşulları asfalt karışımlarda çeşitli bozulmalara yol açabilmektedir. Soğuk havalarda düşük sıcaklıklara maruz kalan asfalt kaplamalar büzülmelemektedir. Büzülme nedeniyle oluşan çekme gerilmesinin büyüklüğü, bitümlü bağlayıcının sertliğine, deformasyona karşı direncine ve kalıcı akma yoluyla enerjiyi dağıtma yeteneğine bağlıdır. Ancak herhangi bir noktada meydana gelen çekme gerilmesi çekme mukavemetini aşarsa, asfalt tabakalardaki çatlak ilerlemesi kaçınılmaz olacaktır. Bu tür çatlaklar, öncelikle tek bir düşük sıcaklık siklusu sırasında meydana gelir, ancak ilerleyen zamanlarda birkaç düşük sıcaklık siklusunda da gelişebilmektedir. Bağlayıcı kıvamının düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlamlardaki rolü büyüktür. Düşük sıcaklıklarda sert kıvamlı bağlayıcılar yumuşak kıvamlı bağlayıcılara nazaran daha yüksek çatlama eğilimine sahiptir. Bu nedenle soğuk iklimli bölgelerde hizmet sunacak kaplamalar için hem daha yumuşak hem de sertleşmeye daha az meyilli bir bağlayıcı kullanılması tavsiye edilmektedir. SHRP, bağlayıcının sertliğini ölçmek ve termal çatlama potansiyelini değerlendirmek için Kiriş Eğilme Reometresi (BBR) testini geliştirmiştir (Bahia&Anderson, 1995b; Roberts vd., 1996; Zaniewski&Pumphrey, 2004). Bu test ile asfalt bağlayıcıların sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m-değeri) ölçülmektedir. Sünme sertliği; bağlayıcının sabit bir yükü karşı direncinin bir ölçümü, sünme oranı ise yük uygulandıkça bağlayıcı sertliğinin farklılaşmasının bir ölçümüdür (Read&Whiteoak, 2003). Yüksek sünme sertliği asfalt katmanlarının kırılma bir şekilde davranmasına yol açarken yüksek bir sünme oranı bağlayıcının hızlı değişen sertliği nedeniyle enerjiyi dağıtmaya daha yatkın olacağı anlamına gelmektedir.



Şekil 3. RTFOT+PAV ile Yaşlandırılmış Numunelere Ait (a) DSR Yenilme Sıcaklığı; (b) BBR Yenilme Sıcaklığı.

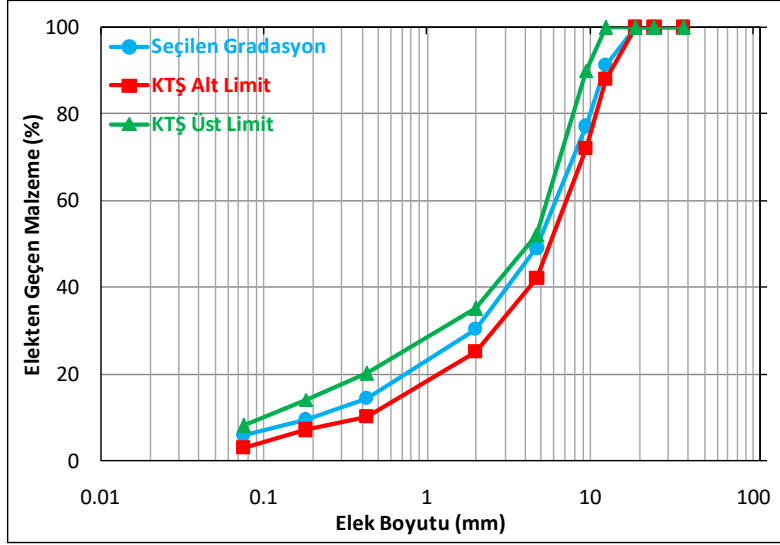
Bu çalışmada kauçukla modifiye edilmiş bağlayıcıların düşük sıcaklıklarda meydana gelebilecek çatlaklara karşı direncini tayin etmek için BBR testi uygulanmıştır ve rijitlik ile sünme özellikleri ölçülmüştür. RTFOT+PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcı ile hazırlanan standart boyuttaki kiriş numunelerine TS EN 14771'de belirtilen şartlarda BBR testi uygulanmıştır. 4 dakika sabit yük uygulanan kirişlere ait zaman-deformasyon ve zaman-sünme sertliği şekilleri çizilmiştir. Bu şekillerde 60 saniye sonunda sünme sertliğinin (S) en fazla 300 MPa olduğu ve sünme oranının (m-değeri) en az 0.300 olduğu yenilme sıcaklıkları tespit edilmiştir. Şekil 3 (b)'den de anlaşılacağı gibi kauçuk içeriğinden bağımsız olarak bu koşulların yerine geldiği sıcaklık her bir bağlayıcı için -12°C olup bu değer KTŞ'de KMB 76-16 bitümü için istenen BBR yenilme sıcaklığı şartını ($\leq -6^{\circ}\text{C}$) sağlamaktadır. Ayrıca Gawel vd. (2011) kauçuk modifikasyonu ile saf bitümün kırılma noktası sıcaklığının %7-10 oranında düşebileceğini belirtmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada uygulanan geleneksel ve yeni nesil performans deneyi sonuçlarına göre; %8 kauçuk ile modifiye edilen bağlayıcının "Elastik Geri Dönme" değeri ve RTFOT ile yaşlandırdıktan sonra "Yumuşama Noktasındaki Artma" değerinin hedef bitüm olarak seçilen KMB 76-16 kriterlerine uygun olmadığı görülmüştür. %12 kauçuk içerikli asfalt çimentosunun ise RTFOT yaşlandırması sonrasındaki "Yumuşama Noktasındaki Artış" değeri şartname limitleri dışında kalmaktadır. Batman rafinerisinden temin edilen geleneksel saf B50/70 bağlayıcısının %10 kauçuk ile modifiye edilmesi halinde gerek orijinal halde gerek kısa vadede yaşlandırma sonrasında, gerekse kısa+uzun vadede yaşlandırma sonrasında KMB 76-16 için KTŞ'de belirtilen tüm şartları yerine getirdiği tespit edilmiştir. Hem kazandırdığı performans açısından hem de ekonomik olarak nispeten daha az maliyetli olması nedeniyle bu çalışmada %10 oranında kauçuk kullanımı B50/70 bitüm modifikasyonu için uygun görülmüştür. Ayrıca %12 kauçukla yapılacak modifikasyona nazaran %10 modifiyer ajan kullanımı daha az kauçuk tüketimini dolayısıyla homojen bir KMB üretimi için karıştırma sırasında daha az enerji tüketimini ve daha az zararlı gaz emisyonunu, bağlayıcı fazı ile kauçuk arasındaki uyumun artmasını ve depo stabilite probleminin azalmasını sağlayacaktır.

5. Bitümlü Sıcak Karışım Tasarımı

Marshall dizaynı, Hveem metodu ve Superpave yöntemi, asfalt betonu tasarımı için sıkça kullanılmaktadır. İlk olarak 1939 yılında Mississippi Karayolu Departmanı'nda çalışan Bruce Marshall tarafından bulunan Marshall karışım dizaynı daha sonra Amerika Birleşik Devletleri Ordusu tarafından birtakım iyileştirmeler yapılarak geliştirilmiştir (White, 1985). Bu deneysel çalışmada da asfalt aşınma tabakasında kullanılacak bitümlü sıcak karışım tasarımı için TS 3720'de ayrıntılı olarak belirtilen Marshall dizayn yöntemi uygulanmıştır. Tasarımda; Malatya İli, Setrek taşocağında üretilen bazalt kökenli 16-12 mm ve 12-5 mm dane boyutlu agregalar ile

Malatya İli, Kürecik taşocağında üretilen kalker kökenli 5-0 mm boyutlu agregalar kullanılmıştır. 12-16 mm dane boyutlu agregalardan %17, 12-5 mm dane boyutlu agregalardan %38 olmak üzere toplam %55 oranında bazalt; 5-0 mm boyutundaki agregalardan toplam %45 oranında kalker kullanılmıştır. Şekil 4’de de görüleceği üzere bu çalışmada seçilen kompozit agreganın gradasyon eğrisi KTŞ’de aşınma tabakası için belirtilen minimum ve maksimum gradasyon eğrileri içerisinde kalmaktadır.



Şekil 4. Gradasyon Eğrileri.

Seçilen gradasyona göre kullanılacak kaba ve ince agregalar ile mineral fillere tatbik edilen testler ve sonuçları, %10 kauçuk ile modifiye edilmiş B50/70 penetrasyon dereceli asfalt çimentosunun temel özellikleri ve beton asfaltın efektif özgül ağırlığı aşağıda Tablo 1’de özet olarak verilmiştir.

Tablo 1. Agregata (Kaba ve İnce), Mineral Filler, Bağlayıcı ve Karışımın Özellikleri.

Özellik	Birim	Sonuç	Deney Metodu
Kaba Agregata			
Los Angeles aşınma kaybı	%	23	TS EN 1097-2
Yassılık indeksi	%	21	BS 812
Magnezyum sülfat don kaybı	%	2.2	TS EN 1367-2
Soyulma mukavemeti	%	75-80	KTŞ Kısım 403 Ek-A
Hacim özgül ağırlığı	-	2.697	TS EN 1097-6
Zahiri özgül ağırlığı	-	2.815	TS EN 1097-6
Absorpsiyonu	%	1.55	TS EN 1097-6
İnce Agregata			
Hacim özgül ağırlığı	-	2.711	TS EN 1097-6
Zahiri özgül ağırlığı	-	2.747	TS EN 1097-6
Absorpsiyonu	%	0.49	TS EN 1097-6
Filler			
Zahiri özgül ağırlığı	-	2.720	TS EN 1097-6
Taze Bağlayıcı (B50/70 Bitüm + %10 Kauçuk)			
Özgül ağırlığı	-	1.04	TS EN 15326
Penetrasyonu (25°C)	d-mm	44	TS EN 1426
Yumuşama noktası	°C	62.3	TS EN 1427
Elastik geri dönme (25°C)	%	61.1	TS EN 13398
Parlama noktası	°C	240+	TS EN ISO 2592
DSR yenilme sıcaklığı	°C	80.6	TS EN 14770
Bitümlü Sıcak Karışım			
Efektif özgül ağırlığı (deneyle)	-	2.744	ASTM D2041
Efektif özgül ağırlığı (hesapla)	-	2.742	ASTM D2041

Bazalt ve kalkerden oluşan kompozit agreganın seçilen gradasyonda KMB 76-16 ile karışım üretilmesi durumunda kullanılması gereken optimal bitüm miktarını belirlemek için standart Marshall numuneleri hazırlanmıştır. Beklenen optimum bitüm oranının %0.5 ve %1.0 üstünde ve altında olmak üzere %0.5'lik artışlarla bu çalışmada 6 farklı bağlayıcı oranı (%4.5, %5, %5.5, %6, %6.5 ve %7) test edilmiştir. Her bir bitüm oranı için 3 adet aynı numune (toplam 6x3=18) hazırlanmıştır. Daha önce etüvde ayrı ayrı kaplarda 165°C'de ısıtılmış kompozit agreg, filler ve bağlayıcı homojen bir karışım elde edilecek şekilde bir kapta karıştırılmıştır. Daha sonra ısı kaybı olmayacak şekilde karışım hızlıca standart kalıplara yerleştirilmiştir. Karışım 45.72 cm yükseklikten düşüş yapan 4.536 kg ağırlığındaki otomatik bir kompaktörle her yüzüne 75 darbe vurularak sıkıştırılmıştır. Kod verilen numuneler kalıpla birlikte soğuduktan sonra dikkatli bir şekilde herhangi bir örselenme olmadan kriko ile kalıptan çıkarılmıştır.

Farklı bağlayıcı oranında hazırlanan 10.16 cm çapında ve 6.35 cm yüksekliğindeki standart numunelerin stabilite, akma, agregalar arası boşluk oranı (VMA), bağlayıcı ile dolu boşluk oranı (VFB), hava boşluk oranı ve hacim özgül ağırlığı belirlenmiş olup her bir parametrenin artan bitüm yüzdesine göre değişim grafikleri çizilmiştir.

Stabilite ve akma değerini ölçmek için hazırlanan numunelere ASTM D1559 standartları doğrultusunda 60°C sıcaklıkta 5.08 cm/dk sabit deformasyon hızı ile yükleme yapılmıştır. Bu yük altındaki numunelerin kırılma anındaki dayanım gücünü gösteren stabilite değerleri Şekil 5 (a)'da gösterilmiştir. Artan bağlayıcı ile stabilitenin düzenli değişmediği, ilk başta arttığı, %6.5 oranında zirve yaptığı ve daha sonra düşüş eğilimine geçtiği görülmektedir. Ancak bu çalışmadaki her bir karışım KTŞ tarafından istenen minimum stabilite şartını (min. 900 kg) sağlayabilmektedir. Tüm numuneler içerisinde %6.5 bağlayıcı karışım her ne kadar laboratuvar ortamında en yüksek dayanım gücüne (1346 kg) sahip olsa da bu durumun karışımın sahadaki gerçek stabilitesini birebir yansıtmayacağı unutulmamalıdır.

Kırılma anındaki düşey deformasyon değerini ifade eden akma; asfalt karışımların dingil yükleri altındaki elastik ve plastik davranışı hususunda önemli bir fikir vermektedir. Bu çalışmadaki numunelerin farklı bağlayıcı yüzdelilerindeki akma değerleri Şekil 5 (b)'de gösterilmiştir. Bitüm miktarı arttıkça karışımların akma değerinin dolayısıyla plastik özelliğinin yükseldiği anlaşılmaktadır. Yüksek akma değeri kalıcı şekil değiştirmelerine karşı daha hassas olacak plastik karışımları işaret ederken düşük akma değeri prematüre çatlaklara yol açabilecek düşük hava boşluğunu işaret etmektedir. Bu nedenle KTŞ aşınma tabakası için dizayn edilecek asfalt karışımların en az 2 mm en fazla ise 4 mm akma değerli olmasını şart koşmaktadır. Bu çalışmada %4.5, %5, %5.5, %6 ve %6.5 oranında bitüm içeren karışımların akma değerleri sırayla 3.07, 3.13, 3.31, 3.42 ve 3.79 mm olup sadece %7 bağlayıcı içerikli karışımlar istenen şartı yerine getirememektedir (4.30 mm).

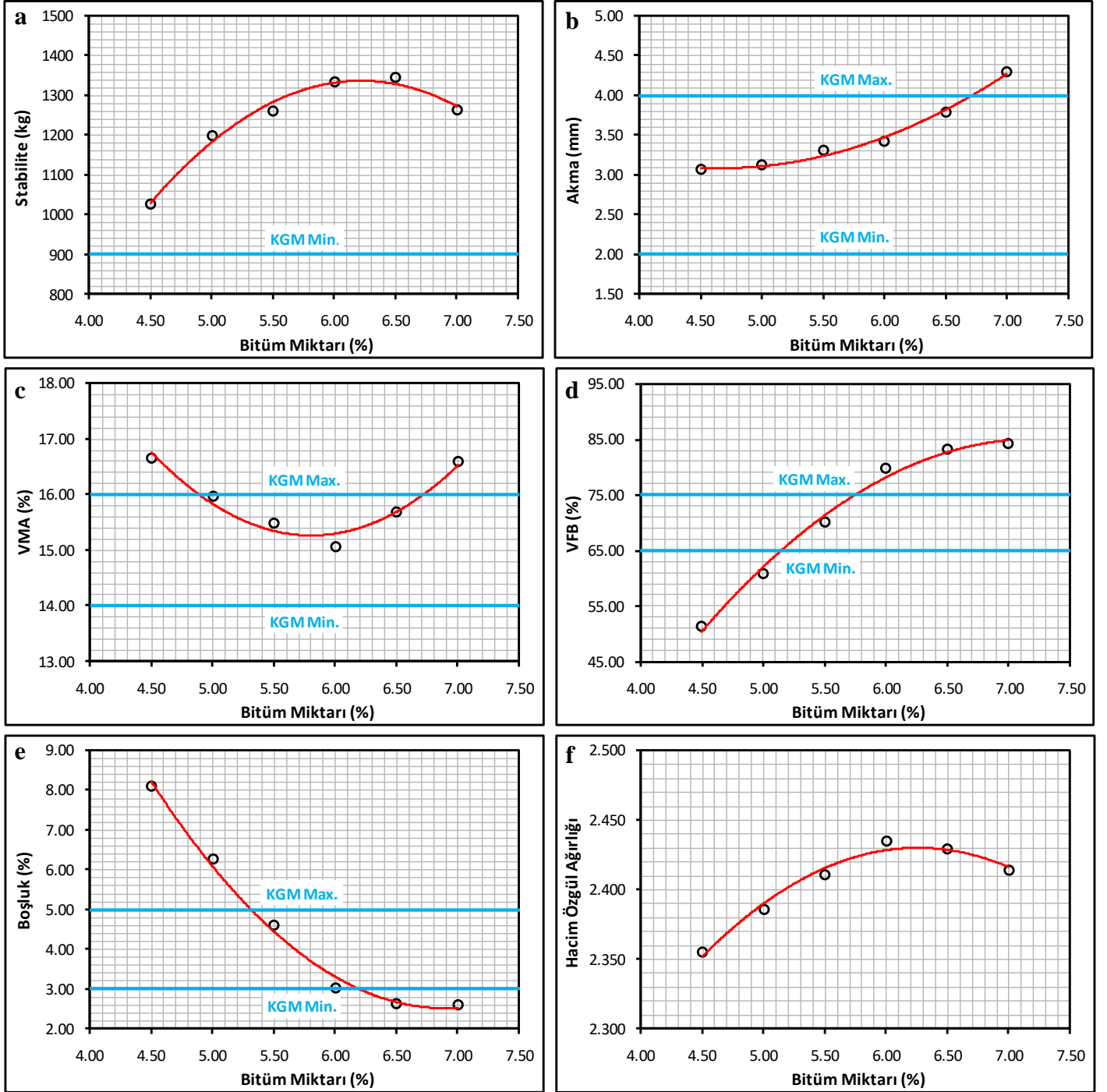
Numunenin toplam hacminin bir yüzdesi olarak da bilinen VMA karışımdaki hava boşluğu ve efektif bitümlü bağlayıcı miktarını ifade etmektedir. Bir başka deyişle VMA sıkıştırılmış bir karışımdaki agreg daneleri arasındaki intergranuler hava boşluğundan ibarettir. VMA değerinin düşük olması; münferit agreg parçalarını istenen düzeyde kaplayabilecek bağlayıcı için karışımda yeterli alanın bulunmadığı anlamına gelmektedir. Ayrıca düşük VMA'lı karışımlar bitümlü bağlayıcı miktarındaki küçük değişimlere karşı çok hassastır. VMA'nın çok yüksek olması ise karışımın stabilitesinin düşük olmasına yol açacaktır. Bu nedenle tasarım esnasında optimum VMA değerinin sağlanması asfalt karışımda kumaya veya düşük stabiliteye yol açmayacak düzeyde bir bağlayıcı film kalınlığı elde edilmesi açısından büyük önem arz etmektedir. KTŞ asfalt aşınma tabakası için üretilecek asfalt betonundaki VMA'nın en az %14 en fazla ise %16 olmasını şart koşmaktadır. Bu çalışmada %4.5 ile %7 arasında değişen bağlayıcı oranlarına göre elde edilen VMA değerleri Şekil 5 (c)'de gösterilmiştir. VMA'nın artan bitüm oranıyla ilk başta azaldığı daha sonra ters bir çan eğrisi çizerek arttığı görülmektedir. %4.5, %5, %5.5, %6, %6.5 ve %7 bağlayıcı içeren karışımların VMA'ları sırasıyla %16.65, %15.98, %15.48, %15.07, %15.68 ve %16.59 olup bitüm miktarının en düşük (%4.5) ve en yüksek (%7) olduğu oranlarda KTŞ tarafından belirlenen üst sınır değeri aşılmaktadır.

VMA'nın asfalt çimentosu ile doldurulan hacminin yüzdesi olarak da ifade edilen VFB esasında efektif bağlayıcı oranının hacimsel karşılığıdır. VFB karışımın boşluk oranı ile ters orantılıdır. Bir başka deyişle hava oranı azaldıkça artan VFB bir nevi hava boşluğunun sigortası niteliğindedir. Bu sayede VFB; düşük boşluklu karışımların ağır trafik yükleri altında oluklanma potansiyelini dolayısıyla kalıcı deformasyon oluşma riskini azaltabilmektedir. Bu çalışmadaki numunelere ait VFB değerleri Şekil 5 (d)'de gösterilmiştir. Bağlayıcı miktarındaki her 0.5%'lik artış VFB değerini eğrisel bir şekilde arttırmıştır. Servis ömrü süresince herhangi bir kalıcı deformasyon ve kuma görülmeden aşınma tabakasının iyi bir performans gösterebilmesi için karışımın VFB değerinin KTŞ'de %65 ile %75 arasında olması istenmektedir. Ancak bu çalışma, bazalt ve kalkerden oluşan kompozit agreganın sadece %5.5 oranında KMB 76-16 ile kullanılması durumunda bu şartın yerine getirebileceğini göstermiştir.

Sıkıştırılmış bir asfalt kaplamadaki bağlayıcı ile kaplanmış agreg daneleri arasındaki küçük hava paketlerinin toplam hacmi karışımın boşluk oranı olarak ifade edilmektedir. Stabilite, permabilite ve durabilite ile yakından ilişkili olan hava boşluğu miktarı karışımın saha performansı açısından çok önemlidir. Normal boyutlu agregalar ile hazırlanmış bir karışımda hava boşluğunun az olması; yüksek sıcaklıklarda tekrarlayan ağır dingil yükleri altında bitümün kaplama yüzeyine çıkmasına yani terlemesine sebep olabilmektedir. Diğer taraftan yüksek hava boşluğu ise asfalt betonunun suya karşı daha geçirgen olmasına neden olacaktır. Bu nedenle KTŞ'ye göre asfalt aşınma tabakasında kullanılacak bitümlü karışımdaki hava oranının %3 ile %5 arasında olması gerekmektedir. VFB değerlerine ait grafiğin tersine Şekil 5 (e)'de de görüleceği üzere bu çalışmadaki numunelerin hava boşlukları artan bağlayıcı miktarı ile hemen hemen doğrusal bir şekilde azalmaktadır. KTŞ'deki üst sınır değerin üzerinde hava boşluğu içeren %4.5 ve %5 bağlayıcı karışımlar daha

geçirgen olacağından suya ve havaya karşı daha az dirençli olacaktır. %6.5 ve %7 bitüm oranında ise yeterli bir hava boşluğu elde edilemeyeceğinden sıcak bölgesi iklimlerde kullanılması halinde bu karışımlarda asfalt kusması kuvvetle muhtemel olacaktır.

Karışımların değişen bağlayıcı içeriklerine karşılık gelen hacim özgül ağırlıkları Şekil 5 (f)'de verilmiştir. Artan bitüm oranı ile hacim özgül ağırlığının çan eğrisi şeklinde ilk başta arttığı, %6 oranında pik yaptığı ve daha sonra düşüş eğilimine geçtiği anlaşılmaktadır. Bu çalışmada %4.5, %5, %5.5, %6, %6.5 ve %7 bağlayıcı kullanılması halinde 2.355, 2.386, 2.411, 2.435, 2.429 ve 2.414 hacim özgül ağırlıklı karışımlar elde edilmiş olup KTSŞ'de bu hacimsel parametre için herhangi bir alt ve üst sınır değer belirtilmemiştir.



Şekil 5. (a) Stabilite; (b) Akma; (c) VMA; (d) VFB; (e) Boşluk; (f) Hacim Özgül Ağırlığı.

Elde edilen bu mekanik ve hacimsel parametrelere göre; karışımın %4.5 bağlayıcı içermesi durumunda aşınma tabakası için istenen VMA, VFB ve hava boşluğu şartını, %5 ve %6.5 bağlayıcı oranında VFB ve hava boşluğu şartını, %6 bağlayıcı oranında sadece VFB şartını, %7 bağlayıcı oranında ise akma, VMA, VFB ve hava boşluğu şartını yerine getiremediği anlaşılmıştır.

Marshall metoduna göre yapılan dizayn neticesinde; %55'i bazalt %45'i ise kalkerden oluşan kompozit agreganın asfalt aşınma tabakasında kullanılması halinde agregaya göre ağırlıkça %5.7 oranında (100 gram kuru agrega +5.7 gram bitüm) KMB 76-16 bağlayıcıya ihtiyaç duyulacaktır. Bulunan bu optimum bitüm yüzdesi KTŞ'de belirtilen maksimum ve minimum değerlerin arasında kalmaktadır (%4- %7).

6. Sonuçlar

Karayolu üstyapı imalatlarında kullanılan agregaların çok büyük bir kısmı doğal taş ocaklarından temin edilmektedir. Günümüzde taş ocaklarının ruhsatlandırma işleminde yaşanan aksaklıklar ve gecikmeler, çevresel açıdan birçok olumsuz etkilerinin olması, yerleşim yerine yakın yerlerde işletilmesinin istenmemesi ve tek tip agrega temin edebilecek taş ocaklarının rezervinde ve sayısındaki azalmalar ile buna bağlı olarak agrega maliyetinde yaşanan artışlar çözüm noktasında yeni arayışları beraberinde getirmiştir. Hal böyle olunca, bu çalışmada farklı iki ocaktan temin edilen bazalt ve kalker kökenli agreganın kompozit agrega olarak beton asfalt üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Bağlayıcı olarak kullanılması hedeflenen KMB 76-16 performans dereceli bitüm; B50/70 penetrasyonlu asfalt çimentosunun %10 kauçuk ile modifikasyonu sonucu elde edilmiştir. Daha sonra bu bağlayıcı ile %55'i bazalttan %45'i ise kalkerden oluşan kompozit agrega Marshall tasarımı yöntemine göre karıştırılarak aşınma tabakası dizaynı yapılmıştır. Sonuç olarak; %5.7 oranındaki KMB 76-16 bağlayıcısı ve kompozit agregayla üretilen bitümlü sıcak karışımın; KTŞ'de aşınma tabakası için istenen mekanik ve hacimsel şartları sağladığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın, yeterli nitelikteki agregalarla birlikte daha düşük standarttaki agregaların ve/veya geri dönüştürülen atık agregaların sınırlı miktarda asfalt kaplamalarda kullanımını inceleyecek yeni araştırma projelerine ve yeni bilimsel çalışmalara ışık tutabileceği düşünülmektedir. Kompozit agrega içeren bu kaplamaların çeşitli asfalt dizayn yöntemleriyle incelenmesine ilaveten performans testleri yönüyle de (nem hasarı, termal çatlama, yorulma çatlama, oluklanma vb.) değerlendirilmesi yeni araştırmalara konu olabilecektir.

Bölgesel kalkınma programlarına ve kalkınma ajanslarına katkı sağlayabilmek amacıyla bir sonraki çalışmada farklı taş ocaklarından temin edilen farklı tipteki kayaçlardan oluşan kompozit agreganın ılık asfalt üretimindeki kullanılabilirliği araştırılacaktır.

Referanslar

- Bahia, H. U. & Anderson, D. A. (1995a). The development of the bending beam rheometer; Basics and critical evaluation of the rheometer, *Physical Properties of Asphalt Cement Binders: ASTM STP 1241*, John C. Hardin, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA., pp. 28-50.
- Bahia, H. U. & Anderson, D. A. (1995b). Strategic highway research program binder rheological parameters: Background and comparison with conventional properties. *Transportation Research Record 1488*, TRB, National Research Council, Washington, DC, pp. 32-39
- Cao, W. D., Feng, Z. G., Liu, S. T., & Ren, P. (2013). Experimental research on high temperature creep property of stone matrix asphalt mixtures using basalt and limestone aggregates. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 43(2), 70-75, DOI: 10.6040/j.issn.1672-3691.0.2012.331.
- Das, A. & Singh, D. (2019). Influence of basalt, hydrated lime, and fly-ash fillers on aging behavior of asphalt mastic using essential and plastic work of fracture. *Journal of Testing and Evaluation* 47, No. 5, 3576-3593, <https://doi.org/10.1520/JTE20180147>.
- Gaweł, I., Piłat, J., Radziszewski, P., Kowalski, K. J., & Król, J. B. (2011). Rubber modified bitumen, *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, 72-97, <https://doi.org/10.1533/9780857093721.1.72>.
- Huang, S. C. (2008). Rubber concentrations on rheology of aged asphalts binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20:3(221), 221–229. [doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:3\(221\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:3(221)).
- Iskender, E. (2013). Rutting evaluation of stone mastic asphalt for basalt and basalt–limestone aggregate combinations. *Composites Part B: Engineering*, 54, 255-264, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.05.019>.
- Kalabińska, M., Piłat, J., & Radziszewski, P. (1999). Rheological properties of Polish binders, no. 085, Eurobitume Workshop, Luxembourg.
- KGM. (2021). Karayolları Genel Müdürlüğü, Yol ağı bilgileri, <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi.aspx>.

- Kong, D., Xiao, Y., Wu, S., Tang, N., Ling, J., & Wang, F. (2017). Comparative evaluation of designing asphalt treated base mixture with composite aggregate types. *Construction and Building Materials*, 156, 819-827, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.020>.
- Maiah, H. & Al-Khateeb, G. (2012). Effect of basalt and limestone aggregate combinations on Superpave aggregate properties, Proceedings of the 5th Jordanian International Civil Engineering Conference (JICEC), Jordan Engineers Association (JEA), Amman, Jordan, January 17-19.
- Piłat, J., Radziszewski, P., & Kalabińska, M. (2000). The analysis of visco-elastic properties of mineral–asphalt mixes with lime and rubber powder, 2nd Euroasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona, Spain, 648–654.
- Radziszewski, P., Piłat, J., & Plewa, A. (2004). Influence of amount of crumb rubber of used car tires and heating time on rubber-asphalt properties, Proceedings of the 19th International Conference on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia, PA, S3C.
- Read, J. & Whiteoak, D. (2003). *The Shell bitumen handbook* (5th ed.). Shell Bitumen, Surrey, UK.
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (1996). *Hot mix asphalt materials, mixture design and construction*, second edition, NAPA Research and Education Foundation, Lanham, MD.
- Sönmez, İ., Yılmaz, M., & Tuğrul, A. (2009). Farklı agregave üretim prosesleri ile üretilen asfalt karışımlarının özelliklerinin karşılaştırılması, V. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, İstanbul, Türkiye, pp. 299-308.
- Türkiye Ticaret Bakanlığı. (2021). *Doğal Taşlar Sektör Raporu*, İhracat Genel Müdürlüğü, Maden, Metal ve Orman Ürünleri Dairesi, Türkiye.
- USGS. (2018). *Volkan Tehlikeleri Programı*. ABD Jeoloji Araştırması. Erişim tarihi: 8 Şubat 2018.
- Variş, Ç. (2019). *Türkiye Fiziki, Beşeri ve Ekonomik Coğrafyası*.
- White, T. D. (1985). Marshall procedures for design and quality control of asphalt mixtures. In *association of asphalt paving technologists proc.* (Vol. 54).
- Wikipedia. (2021). Bazalt. Erişim tarihi: 12 Ekim 2021, https://tr.wikipedia.org/wiki/Bazalt#cite_note-1.
- Zaniewski, J. P. & Pumphrey, M. E. (2004). Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol. *Asphalt Technology Program*, Department of Civil and Environmental Engineering, Morgantown, West Virginia.
- Zhou, C. H., Liu, S. H., & Yuan, Q. (2014). Experience of replacing basalt aggregate by limestones in porous asphalt concrete. In *Advanced Materials Research* (Vol. 1025, pp. 749-754). Trans Tech Publications Ltd, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1025-1026.749.



Investigation of Nevşehir Perlite Aggregate in Terms of Alkali Silica Reaction

Osman Şimşek¹, İlhami Demir^{2*}, Özer Sevim²

¹Department of Civil Engineering, Gazi University, 06560 Ankara, TURKEY.

²Department of Civil Engineering, Kırıkkale University, 71451 Kırıkkale, TURKEY.

Başyuru/Received: 22/10/2021

Kabul / Accepted: 30/03/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Abstract

The alkali silica reaction (ASR) is a highly complex chemical reaction that adversely affects the durability of reinforced concrete elements today. Alkali silica gel is formed in the pores in the concrete when sufficient moisture is reached as a result of the combination of the alkalis in the cement and the amount of reactive silica in the aggregate. With this formation, alkali silica reaction begins. As a result of the water absorption of alkali silica gels, the internal stresses of the concrete increase and it causes damage by creating capillary cracks in the concrete. In this study, the effect of perlite aggregate obtained from Nevşehir region on alkali silica reaction was investigated. In this regard, accelerated mortar bar test (ASTM C 1260) method was carried out. Mixtures were prepared by replacing the crushed limestone aggregate with the perlite aggregate at 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 and 70 wt.% ratios. The length change values of these samples at 7, 14 and 28 days were measured. It was observed that the perlite aggregate substituted for the limestone aggregate in the mortar bars increased the alkali silica reaction.

Key Words

“Alkali silica reaction, perlite aggregate, accelerated mortar bar test method, The length changes”

1. Introduction

Concrete, which is one of the most important factors keeping the structure alive in reinforced concrete structures, is a widely used building material. After the reinforced concrete structure is made, it must be protected against external factors. These external factors can be environmental factors such as climate changes, freeze-thaw effect, reinforcement corrosion and chemical factors such as alkali silica reaction and sulfate effect.

ASR starts when alkali oxides ($\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$) in the cement and reactive silica (SiO_2) in the aggregate enter into a chemical reaction to form alkali silica gel with high water absorption capacity. Alkaline silica gels formed as a result of alkali silica reaction have high water absorption capacity. As a result of water absorption, it increases the internal stress of the concrete and causes damage by creating capillary cracks in the concrete (Demir et al. 2018; Demir et al. 2020; Pan et al. 2012; Thomas et al. 2006; Bazant & Steffens, 2000; Ramlochan et al. 2000). It is stated that substitution of reactive aggregates such as perlite, dazite, jibs, andesite, andesite tuff, which can be used as concrete aggregate, with aggregates such as limestone (non-reactive) in terms of alkali-silica reaction may also cause damage (Vivian, 1951; Gökçe & Şimşek, 2010).

There are many studies on the relationship between material design and ASR for concrete. In these studies, it was stated that protection can be provided from the damages caused by ASR with the use of mineral additives and the effects of low porosity w/c (water/cement) ratio (Esteves et al. 2012; Shehata & Thomas, 2002). There are several approaches to the prevention of ASR. Primarily, the removal of one or more of the factors causing the reaction such as moisture, reactive silica and alkali can be considered as a precaution. In addition, the damage of the reaction can be reduced by using mineral and chemical additives. These are materials such as lithium-based salts, silica fume as mineral additives, Blast furnace slag (BFS), Fly ash (FA) and rice husk ash (Massazza, 1993; Swamy, 1986; Bouzoubaâ et al. 2001; Demir & Sevim, 2017; Demir & Arslan, 2013; ASTM C618-19, 2019). Pozzolans, which are used as mineral additives, reduce the pH level by keeping the lime in the cement mortar. Lowering the pH value reduces the solubility of silica and prevents the formation of alkaline silica gel. There is always CaO in the gel structure. The absence of CaO indicates that the gel will not form. It can be said that pozzolans prevent gel formation by binding CaO (Thomas et al. 2011; Sata et al. 2007; Hasparyk et al. 2000; Ravina & Mehta, 1986; Saha et al. 2018).

In the study in which the pessimal reactive aggregate ratio of the Perlite Aggregate was examined by different methods, it was aimed to determine the reactive aggregate ratio, which gives the maximum length change of the perlite aggregate. For this purpose, the properties of Ankara Çubuk perlite aggregate in different proportions with Ankara Hasanoğlan limestone aggregate regarding alkali-silica reaction (ASR) are determined. It was determined according to ASTM C 1260 to determine the ASR on samples where perlite, limestone and both were used together. The mixtures were prepared by replacing the limestone aggregate with the perlite aggregate at the ratios of 0, 10, 20, 30, 40, 50 and 100 by weight. Samples containing 40% perlite aggregate underwent the highest change in length and were determined as the pessimal reactive aggregate ratio of perlite aggregate (Gökçe & Şimşek, 2010).

In this study, the effect of perlite aggregate (Nevşehir-Acıgöl) on alkali silica reaction was investigated. In this context, accelerated mortar bar test (ASTM C 1260) method tests were carried out. To form the mixtures, perlite aggregate was prepared by replacing 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 and 70 percent by weight of crushed limestone aggregate. The 7-, 14- and 28-days length change values of these samples were measured and compared.

2. Experimental Program

2.1. Materials

In this study, perlite aggregate was crushed and sized and grouped and taken from the plant in Nevşehir, Acıgöl. Crushed Limestone (CL) aggregate was obtained from Ankara Hasanoğlan region. Chemical and physical properties of aggregates and CEM I 42.5 R type Portland cement are given in Table 1.

Table 1. Physical and Chemical Properties of the Materials

Compound%	Perlite	Limestone	Cement
SiO ₂	72.4	0.58	20.02
Al ₂ O ₃	12.02	0.21	6.05
Fe ₂ O ₃	0.77	0.48	2.94
CaO	0.39	57.4	60.41
MgO	0.18	0.84	2.12
SO ₃	4.2	-	3.05
Na ₂ O	3.5	0.094	0.17
K ₂ O	3.2	0.032	0.61
TiO ₂	0.01	0.01	-
MnO	0.007	0.009	-
Loss of Ignition	2.40	39.05	3.05
Total	98.06	98.69	98.52
Na ₂ O+0.658×K ₂ O			0.57

2.2. Methods

Experimental studies were performed according to the ASTM C 1260 Accelerated Mortar Bar Test Method (ASTM C1260-21, 2021). The experimental method used is summarized in Table 2.

Table 2. ASTM C 1260 test method

Method	ASTM C 1260
Sample	25×25×285 mm mortar bar
Water/cement ratio	0.47
Sand/cement ratio	2.25
Curing conditions	80°C 1 N NaOH solution
Test duration	14 days
Examination of the results	Detrimental zone>0.2% 0.2%>controlled zone>0.1% 0.1%>non-detrimental zone

ASTM C 1260 Accelerated mortar bar test method is a short-term test method that gives results in 16 days. The aggregate, prepared according to the gradation given in ASTM C 1260, was 2.25 times the cement amount and the water/cement ratio was 0.47, and 25×25×285 mm sized mortar bars were prepared (Table 3). After the prepared samples were poured into the molds, they were removed from the mold after being kept in the mold for 24 hours. The removed samples were kept in 1 N NaOH solution at 80 °C for 24 hours. After this period, the first reading of the samples was made and the 7-, 14- and 28-days length change values of the samples were read by keeping them in NaOH solution at 80 °C, and the experiment was concluded (ASTM C1260-21, 2021). Aggregate mixture amounts of cementitious composite mortar bars are given Table 3. Here, CL stands for crushed limestone and NP represents total perlite ratio in aggregate mixture for gradation given in ASTM C 1260. Note that the following aggregate amounts have been corrected according to its water content and water absorption ratio.

Table 3. Aggregate mixture amounts of cementitious composite mortar bars (g)

Mixture	Sieve, mm									
	2.36-4.75		1.18-2.36		0.60-1.18		0.30-0.60		0.15-0.30	
	10%		25%		25%		25%		15%	
	Perlite	CL	Perlite	CL	Perlite	CL	Perlite	CL	Perlite	CL
NP 0	-	100	-	250	-	250	-	250	-	150
NP 10	9	90	22	225	22	225	22	225	13	135
NP 20	17	80	44	200	44	200	44	200	26	120
NP 30	26	70	65	175	65	175	65	175	39	105
NP 40	35	60	87	150	87	150	87	150	52	90
NP 50	44	50	107	125	107	125	107	125	66	75
NP 60	52	40	131	100	131	100	131	100	78	60
NP 70	61	30	153	75	153	75	153	75	92	45

Chemical analysis of perlite aggregate was carried out according to ASTM C 289 (ASTM C-289-07, 2007). For the chemical analysis method, the samples taken from the material remaining between 0.250 mm (No: 50) and 0.125 mm (No: 100) sieves of the perlite aggregate, whose reactivity will be determined, were washed under running distilled water to get rid of dust and fine particles, and the washed material was 105 ± It was dried in an oven at 5 °C.

From the sieved, washed, and dried samples, 3 samples of 25 grams were taken with an electronic scale and put into the reaction vessel. 25 ml of 1 N NaOH solution was added to each of these vessels. 1 N NaOH solution was prepared by adding 40 g of sodium hydroxide to 900 ml of distilled water, and this solution was named sodium hydroxide solution. Only 25 ml of 1 N NaOH solution was placed in the fourth container without sample, and this container was used as a reference container.

Sample containers were placed in a constant water bath at 80 ± 1 °C and kept for 24 hours. At the end of this period, the samples were removed from the water bath, cooled to 30 °C, and filtered into a dry container by opening the lids. After mixing to ensure homogeneity,

10 ml was drawn with the help of a pipette and a 200 ml balloon was taken into a jug and made up to 200 ml with distilled water. This solution was used for the determination of dissolved silica and alkali reduction.

3. Results and Discussion

The results of the chemical analysis test and accelerated mortar bar, which were carried out to determine the alkali silica reaction in the samples obtained by substituting perlite aggregate (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 and 70%) from Nevşehir Acıgöl region and limestone aggregate obtained from Ankara Hasanoglan region, are evaluated below.

3.1. Alkali silica reactivity by chemical analysis method

The chemical analysis results of Alkali Silica Reactivity on perlite aggregate taken from Nevşehir region are given in Table 4.

Table 4. Chemical analysis results

Aggregate	Sc (millimole/liter)			Rc (millimole/liter)		
	Minimum	Maximum	Number of Samples	Minimum	Maximum	Number of Samples
Perlite (Nevşehir)	112	120	3	65	72	3

According to ASTM C-289 "Chemical Determination of Alkaline Silica Reactivity", the alkali reduction (Rc) and dissolved silica (Sc) values were determined with the help of the graphic in Figure 1, the location of the perlite aggregate. It is seen that the perlite aggregate obtained from the Nevşehir region is located in Region III, where it is defined as "Harmful aggregates" specified in the standards in terms of ASR.

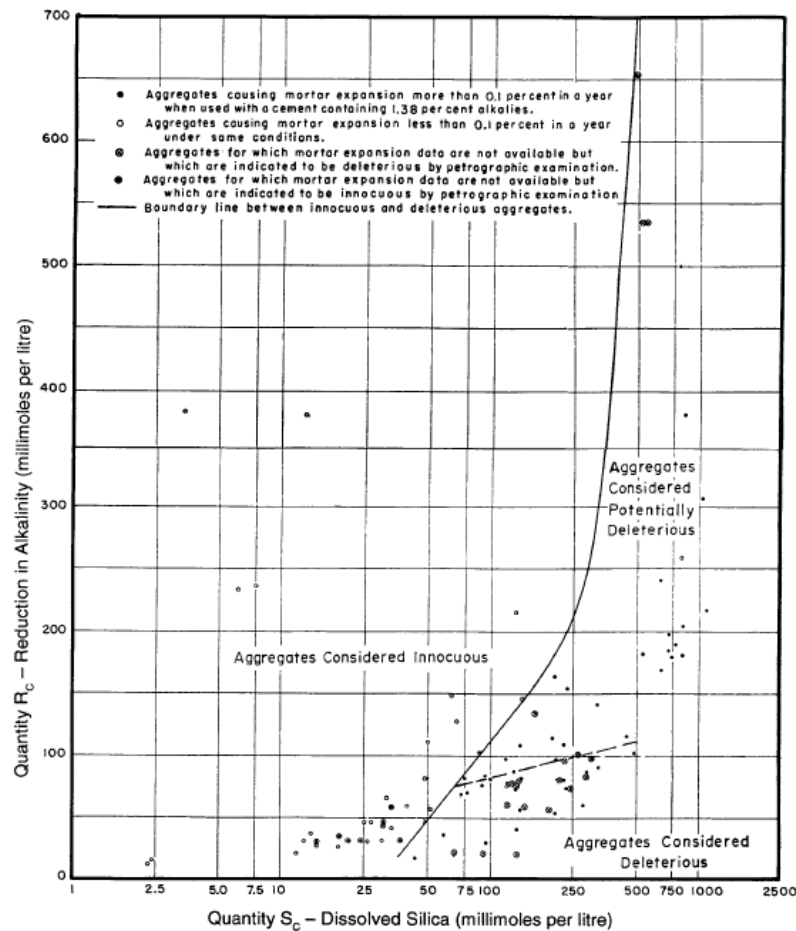


Figure 1. Classification of perlite aggregate using ASTM C 289 chart

3.2. ASTM C 1260 accelerated mortar bar test

In order to determine the ASR effect according to ASTM C 1260, which is the accelerated mortar bar test method, the 7- and 14-day length change (%) test results of the mortar sticks are given in comparison. The length changes obtained within the scope of the study are shown Figure 2.

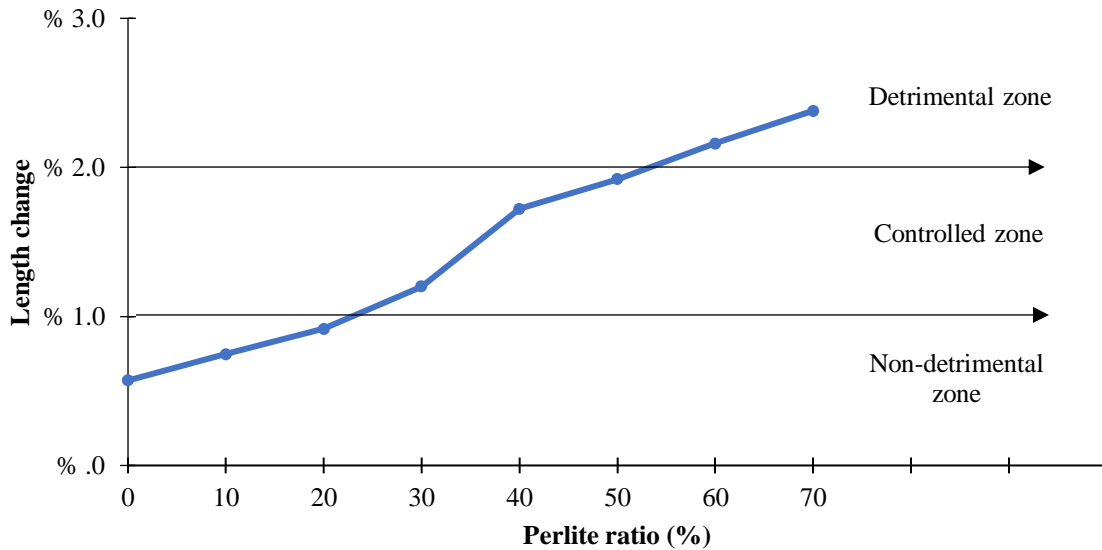


Figure 2. 7-day length change according to ASTM C 1260 of mortar bars with perlite aggregate additive

According to the values in Figure 2 and the interpretation made for 7-day length changes according to ASTM 1260; The lowest length change was observed in the NP0 mortar bar, which was produced entirely with limestone aggregate. The 7-day NP10 mortar bar ASR was found to be in the non-detrimental zone. On the other hand, NP20 was in the ASR non-detrimental zone according to the 7-day accelerated mortar bar. 7-day-old NP30, NP40 and NP50 mortar bars were found to be in the ASR controlled zone. 7-day NP60 and NP70 mortar bars were found to be in the detrimental zone in terms of ASR effect.

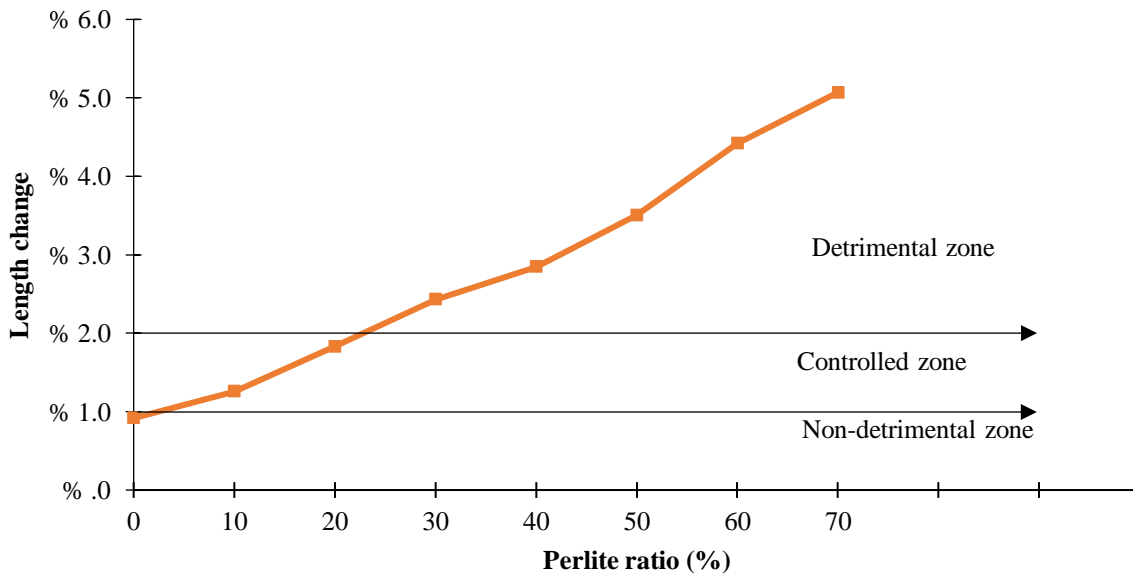


Figure 3. 14-day length change according to ASTM C 1260 of mortar bars with perlite aggregate additive

According to the values in Figure 3 and the interpretation made for 14-day length change according to ASTM 1260; The lowest length change ratio was observed in the NP0 mortar bar, which was produced entirely with limestone aggregate, which is called the control sample. As a result of the readings, the control samples (NP0) were qualified as harmless in terms of ASR according to ASTM C 1260. 14-day NP10 was found to be in the controlled zone (acceptable harmful zone) for ASR, and NP20 was also found to be in controlled

zone for ASR. It was determined that the 14-day-old NP30, NP40, NP50, NP60 and NP70 mortar bar were in the detrimental zone in terms of ASR effect.

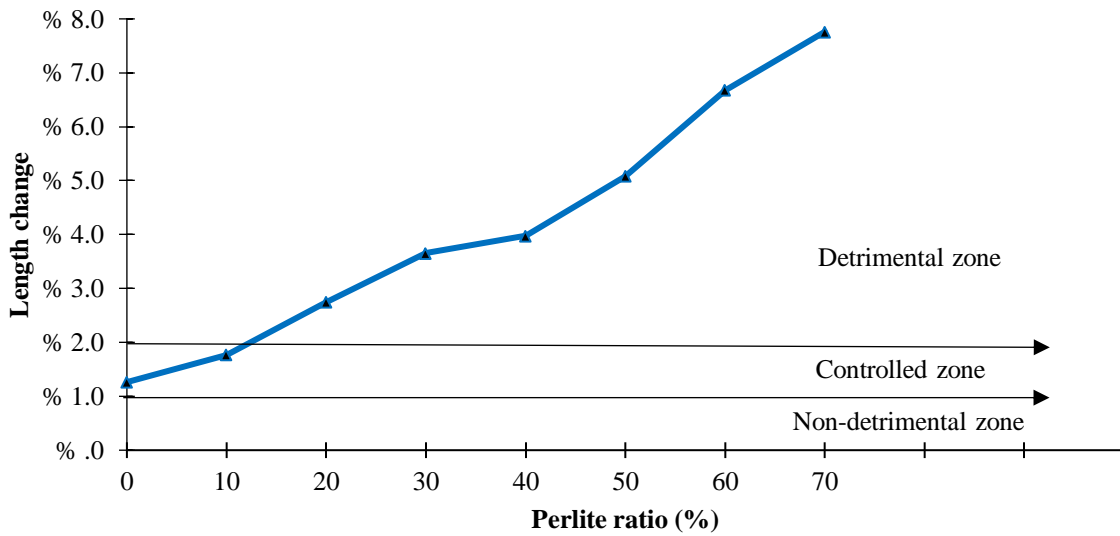


Figure 4. 28-day length change according to ASTM C 1260 of mortar bars with perlite aggregate additive

Although the experimental test method was 14 days old, in order to give an idea, an additional 28-day length change values were obtained. According to the values in Figure 4 and the interpretation made for daily length change according to ASTM 1260; As a result of the readings, it was seen that the control samples were in the acceptable harmful zone (controlled zone) in terms of 28-day NP10 ASR. Mortar bars NP20, NP30, NP40, NP50, NP60 and NP70 were found to be in the detrimental zone in terms of ASR effect.

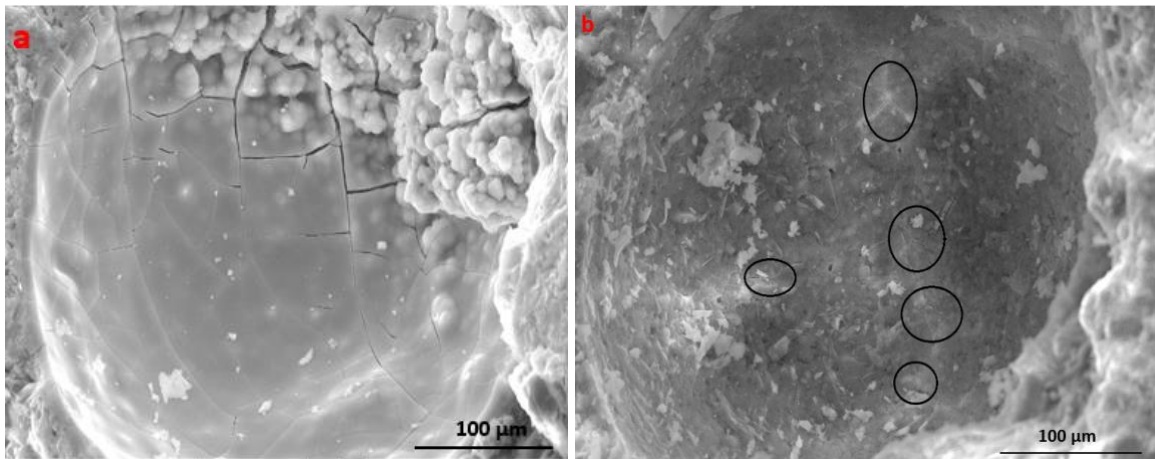


Figure 5. 1000× SEM image of the samples having 20% (a) and 0% (b) perlite replacement

Figure 5 (b) shows very small ASR cracks in the circled images, while large ASR expansions in the form of popcorn are seen next to very large ASR cracks in the samples replaced with 20% Perlite instead of aggregate. This shows that the ASR expansion is greater in the sample having perlite aggregates. The ASR was usually in the form of fractures and shrinkage cracks during the SEM study. Usually in a porous structure, cracks start and spread around the voids. The crack map in the SEM image and the gel reveals the presence of ASR. These voids are thought to be formed because of expansion of gel. The ASR products usually formed in and around aggregate cracks.

As a result, in this section, the lowest length change was observed in NP10 mortar bars produced entirely from limestone, while the highest length change was observed in NP70 perlite aggregate mortar bars replaced by 70% instead of limestone. In this case, the acceptable limit value of optimum perlite aggregate use for ASR was determined as 20% for 7 and 14 days, and 10% for 28 days.

4. Conclusion

In this study, the ASR effect that can be seen in the buildings was carried out to see the harmony of limestone and perlite aggregate. However, as the amount of perlite aggregate increased, the ASR effect increased. In the study, perlite aggregate was substituted for limestone aggregate at the rate of 10-70%. The results were discussed comparatively and ranked according to the findings obtained from the experimental studies,

- It has been observed that the perlite aggregate substitution made to the mortars produced with limestone increases the alkali silica reaction.
- According to ASTM C 1260; Perlite aggregate substitution up to 20% in 7- and 14-day mortar bars was found to be non-detrimental in terms of ASR.
- As a result of the experimental studies carried out according to ASTM C 1260, the greatest length change was observed in mortar bars with perlite aggregate substituted at the rate of 70%, while the lowest length change rate of 0% (mortar bars with limestone aggregate without perlite aggregate substituted) was obtained in mortar bars with perlite aggregate replacement.

As a result, it was observed that perlite substituted for the aggregate in the mortar bars increased the alkali silica reaction. In both chemical and rapid mortar bar method, perlite aggregate obtained from Nevşehir region is in the "harmful aggregate" class. This shows that two different experimental studies confirm each other. In the ASR effect, the optimum rate of perlite replacement for 7- and 14-days limestone was found to be 20%.

References

- ASTM C1260-21. (2021) Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (Mortar-bar method), West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM C289-07. (2007) Standard test method for potential alkali-silica reactivity of aggregates (chemical method), West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM C618-19. (2019). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete, West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Bažant, Z.P., & Steffens, A. (2000). Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete. *Cement and concrete research*, 30(3), 419-428.
- Bouzoubaâ, N., Zhang, M.H., & Malhotra, V.M. (2001). Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash, *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1393-1402.
- Demir, İ., & Arslan, M. (2013). The mechanical and microstructural properties of Li₂SO₄, LiNO₃, Li₂CO₃ and LiBr added mortars exposed to alkali-silica reaction, *Construction and Building Materials*, 42, 64-77.
- Demir, İ., & Sevim, Ö. (2017) Effect of sulfate on cement mortars containing Li₂SO₄, LiNO₃, Li₂CO₃ and LiBr, *Construction and Building Materials*, 156, 46-55.
- Demir, İ., Sevim, Ö., & Kalkan, İ. (2018). Microstructural properties of lithium-added cement mortars subjected to alkali-silica reactions, *Sadhana*, 43(7), 1-10.
- Demir, İ., Sivrikaya, B., Sevim, O., & Baran, M. (2020). A study on ASR mitigation by optimized particle size distribution. *Construction and Building Materials*, 261, 120492.
- Esteves, T.C., Rajamma, R., Soares, D., Silva, A.S., Ferreira, V.M., & Labrincha, J.A. (2012). Use of biomass fly ash for mitigation of alkali-silica reaction of cement mortars, *Construction and Building Materials*, 26(1), 687-693.
- Gökçe, H.S., & Şimşek, O. (2010). Perlit agregasının pesimum reaktif agrega oranının farklı yöntemlerle incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(4), 839- 846.
- Hasparyk, N.P., Monteiro, P.J., & Carasek, H. (2000). Effect of silica fume and rice husk ash on alkali-silica reaction, *ACI Material Journal*, 97(4), 486-492.
- Massazza, F. (1993). Pozzolanic cements, *Cement and Concrete Composites*, 15(4), 185- 214.

- Pan, J.W., Feng, Y.T., Wang, J.T., Sun, Q.C., Zhang, C.H., & Owen, D.R.J. (2012). Modeling of alkali-silica reaction in concrete: a review. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 6(1), 1-18.
- Ramlochan, T., Thomas, M., & Gruber, K.A. (2000). The effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete. *Cement and concrete research*, 30(3), 339-344.
- Ravina, D., & Mehta, P.K. (1986). Compressive strength of flow cement/high fly ash concrete, *Cement and Concrete Research*, 18, 571-583.
- Saha, A.K., Khan, M.N.N., Sarker, P.K., Shaikh, F.A., & Pramanik, A. (2018). The ASR mechanism of reactive aggregates in concrete and its mitigation by fly ash: A critical review, *Construction and Building Materials*, 171, 743-758.
- Sata, V. Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2007). Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete, *Construction and Building Materials*, 21(7), 1589-1598.
- Shehata, M.H., & Thomas, M.D.A. (2002). Use of ternary blends containing silica fume and fly ash to suppress expansion due to alkali-silica reaction in concrete, *Cement and Concrete Research*, 32(3), 341-349.
- Swamy, R.N. (1986). *Cement Replacement Materials*. London: Surrey University Press.
- Thomas, M., Dunster, A., Nixon, P., & Blackwell, B. (2011). Effect of fly ash on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction – exposure site studies, *Cement and Concrete Composites*, 33(3), 359-367.
- Thomas, M., Fournier, B., Folliard, K., Ideker, J., & Shehata, M. (2006). Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research*, 36(10), 1842-1856.
- Vivian, H.E. (1951). Studies in Cement-Aggregate reaction, XIX: The Effect On Mortar Expansion of the Particle Size of the Reactive Component in the Aggregate, *Australian Journal of Applied Science*, 2, 108-113.



Farklı Soğuk Derz Birleşim Detaylarına Sahip Betonarme Kirişlerin Eğilme Davranışları

Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams with Different Cold Joint Details

Süleyman Kamil Akın¹, Saruhan Kartal*², Abdullah Müsevitöglü¹, Ahmad Javid Zia¹,
Sadrettin Sancioğlu¹

¹KTO Karatay Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42020 Konya, TÜRKİYE
²Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 29/10/2021 **Kabul / Accepted:** 04/04/2022 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/07/2022
Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Mevcut çalışmada betonarme kirişlerde soğuk derz tipi birleşimin kiriş eğilme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda toplam yedi adet kirişin dört nokta eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kirişler 150 mm genişliğe, 300 mm yüksekliğe ve 3000 mm uzunluğa sahiptir. Soğuk derzler üç farklı yöntem ile oluşturulmuştur. Bunlardan ilk ikisi kirişin tam ortasında yani sabit moment bölgesinde yatayla 45° ve 90° açı yapacak şekilde iken, sonuncusu ise kiriş yarı yüksekliği seviyesinde kiriş uzunluğu boyunca devam etmektedir. Tüm soğuk derz birleşimleri betonun 24 saatlik arayla iki ayrı dökümü neticesinde elde edilmiştir. Farklı tipte soğuk derz birleşimine sahip betonarme kirişlerin eğilme davranışlarının net şekilde belirlenmesi için çalışmada tek dökümden üretilmiş bir referans kirişe de yer verilmiştir. Ayrıca soğuk derz birleşimlerinde aderans artırıcı harç kullanımının kirişlerin eğilme davranışları üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Bu amaçla farklı derz tipleri için her numuneden birbirinin aynı iki adet üretilmiş ve birer numunede ikinci beton dökümünden önce soğuk derz birleşim yüzeylerine aderans artırıcı harç "MasterBrace ADH 1420" uygulanmıştır. Yatayla 90° açılı numunelerde ilk çatlama soğuk derz düzlemi üzerinde gerçekleşmiştir. Buna bağlı olarak rijitlik, akma yükü ve enerji sönümleme kapasitesi diğer numunelere göre daha düşük çıkmıştır. Bu tip soğuk derz birleşiminde aderans artırıcı harç kullanımı önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler

"Soğuk derz, betonarme kiriş, eğilme davranışı, aderans artırıcı harç"

Abstract

In the present study, the effects of cold joint type on bending behavior of reinforced concrete (RC) beams were investigated. Within this scope, four point bending tests of a total of seven beams were carried out. These beams have a width of 150 mm, a height of 300 mm and a length of 3000 mm. Cold joints were formed by three different methods. While the first two of them are in the middle of the beam, that is, at an angle of 45° and 90° with the horizontal in the constant moment region, the last one continues along the beam length at the level of the beam half height. All cold joints were obtained as a result of two separate batches of concrete with 24-hour intervals. In order to clearly reveal the bending behavior of reinforced concrete beams with different types of cold joints, a reference beam produced from a monolithic batching was also included in the study. In addition, the effects of the adherence enhancer mortar usage in cold joints on the bending behavior of RC beams were also investigated. For this purpose, two identical specimens of each sample were produced for different joint types and adherence enhancer mortar "MasterBrace ADH 1420" was applied to the cold joint surfaces before the second concrete batching in one specimen. The first cracking occurred on the cold joint plane in the specimens at an angle 90° with the horizontal. Accordingly, the stiffness, yielding load and energy absorption capacity were lower than the other specimens. It is recommended to use adherence enhancer mortar in this type of cold joint.

Key Words

"Cold joint, reinforced concrete beam, flexural behaviour, adherence enhancer mortar"

1. Giriş

Beton dökümünde dikkat edilmesi gereken birçok husus bulunmaktadır. Döküm öncesi uygun bir planlama yapılmalı ve gerekli hazırlıklar tamamlanmalıdır. Teorik olarak bir yapıda betonun monolitik olarak döküldüğü varsayılmakta ve tüm statik hesaplamalar buna göre yapılmaktadır. Ancak tüm yapı betonunun tek seferde dökülememesi, çok sayıda süreksizliğe yani soğuk derz tipi bağlantı oluşumuna neden olmaktadır. Bu bağlantıda donatı sürekliliğini korurken, iki beton yüzeyinin farklı zamanlarda sertleşmesi nedeniyle betonun dayanımı ve dayanıklılığı olumsuz yönde etkilenmekte ve yüzeyler arasında yeterli kenetlenme gerçekleşmemektedir.

Betonarme taşıyıcı yapı elemanlarında soğuk derz oluşumu, kimi zaman planlı, kimi zaman ise kontrol dışı olarak meydana gelmektedir. Büyük hacimli projelerde gün bitiminde beton dökümünün bitmemesi, kütle betonlarında hidrasyon ısısı kontrolünün sağlanabilmesi, büyük kirişli/kirişsiz döşemelerde mevcut kalıp stokunun tekrarlı kullanılabilmesi amacıyla meydana gelen soğuk derzler planlı olarak oluşturulmaktadır. Ayrıca kat kolonları ayrı, kat döşeme ve kirişleri ayrı dökülen yapılarda meydana gelen soğuk derzler de planlı soğuk derze örnek olup her yeni katta tekrar etmektedir. Bunun yanı sıra beton sevkiyatındaki aksamalar, kalıpların patlaması, beton yerleşiminin yeterli bir şekilde sağlanamaması gibi nedenlerden ötürü de planlanmayan soğuk derzler meydana gelmektedir.

Literatürde bu konu ile ilgili çok başlıca çalışmalar aşağıda özetlenmiştir. Rathi ve Kolase (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada soğuk derz birleşiminde yüzey açısı, süre etkisi ve priz geciktirici (şeker kullanarak) etkisi araştırılmıştır. Soğuk derzler (45° ve 90°), küp numune kalıplarının öncelikle yarı seviyelerine kadar betonla doldurulması ve ardından diğer yarısının farklı süreler (45,75,120 ve 180 dakika) geçtikten sonra dökülmesi ile elde edilmiştir. İki döküm arasındaki süre artışının dayanımdaki azalmaya sebep olduğu ve priz geciktirici katkının soğuk derze sahip numunelerin dayanımını artırdığı tespit edilmiştir. Kadyrov ve Yazıcıoğlu (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, soğuk derz birleşim yüzeyi açısının ve soğuk derz oluşum süresinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla prizma ve silindir numunelerin tam orta kısmında yatayla 45° ve 90° açılara sahip olan soğuk derzler iki beton dökümü arasında farklı süreler (2,3, 4 ve 6 saat) uygulanarak oluşturulmuştur. Sürenin artmasıyla betonun doğrudan çekme ve eğilme dayanımlarının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca yatayla 45° açılı soğuk derze sahip numunelerin, 90° açılara sahip olanlara göre daha yüksek dayanıma sahip olduğu ifade edilmiştir. Roy ve Laskar (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, soğuk derze sahip (üst kolonun daha sonradan dökülerek) dış kolon-kiriş birleşim deney elemanlarının sismik davranışı araştırılmıştır. Soğuk derze sahip numunelerin enerji sönümleme kapasitelerinde ve süneklik değerlerinde önemli ölçüde düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca ilk çatlağın soğuk derz düzlemi üzerinde olduğu testler sırasında gözlemlenmiştir. Öztürk (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada derzlerin, tarihi iki yapının sismik davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ünlü (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada silindir, küp ve kare prizma numunelerde soğuk derz varlığının beton mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İki beton dökümü arasında 24 saatlik sürenin geçmesiyle üç farklı tipte soğuk derz (numunelerin orta noktalarında yatayla 45° ve 90° açı yapacak şekilde, eleman boyunca eksenli yönde numune yarı yüksekliğince uzanan) oluşturulmuştur. En yüksek ve en düşük eğilme dayanımlarının sırasıyla numune yarı yüksekliğince uzanan ve yatayla 90° açılara sahip soğuk derzli numunelere ait olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca aderans artırıcı kullanımının betonun mekanik özellikleri üzerindeki olumlu etkisi gözlemlenmiştir. Ölmez (2019) soğuk derzin olduğu düzlem açısının, geometrisinin ve soğuk derz oluşumuna sebep olan sürenin parametreler olarak belirlendiği çalışmada bu parametrelerin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu amaçla farklı ebatlarda küp ve prizma numunelerin; tek eksenli basınç, dört noktalı eğilme, yarmada çekme, doğrudan çekme ve rezonans frekansı deneylerini gerçekleştirmiştir. Turan (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, soğuk derze sahip (yatayla 0° , 45° ve 90° açı yapan) kare prizma numunelerin eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca aderans artırıcı ve derz çivisi kullanımının betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırılırken, hasar durumu akustik emisyon yöntemi ile takip edilmiştir. Aymak (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, dış kolon kiriş birleşiminde, kirişin alt ve üst yüzünde (kiriş ile kolonların birleştikleri yüzeylerde) iki adet soğuk derz oluşturularak çevrimsel yüklem altında test edilmiştir. Bu sayede birleşim bölgesinde soğuk derz bağlantı varlığının birleşimin davranışı üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Soğuk derz varlığının enerji sönümleme kapasitesini düşürdüğü ve hasar durumunu olumsuz yönde etkilediği sonuçlarına ulaşılmıştır. Laskar ve diğ. (2020) alkali aktivasyonlu ve soğuk derze (kiriş boyunca uzanan ve kiriş orta noktasında yatayla 90° açı yapan) sahip 2 metre uzunluklu betonarme kirişlerin eğilme testlerini gerçekleştirmiştir. Ayrıca bu numunelere ait sonlu eleman yöntemi ile analizler de yapılmıştır. Udoh (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, betonda soğuk derz oluşumunun beton basınç dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu doğrultuda silindir deney numunelerinde üç farklı tipte (yatay, düşey ve çapraz düzlemlere sahip) soğuk derz oluşturulmuştur. En yüksek ve en düşük beton basınç dayanımının sırasıyla yatay ve düşey düzlemde oluşturulmuş soğuk derze sahip numuneler ait olduğu ifade edilmiştir. Vanlalruata ve Marthong (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı beton karışımına ve farklı beton döküm süresi nedeniyle meydana gelen soğuk derze (yatayla 45° açı yapan) sahip olan 0.7 metre uzunluğundaki betonarme kirişlerin eğilme davranışları araştırılmıştır. Eğilme dayanımının, sünekliğin ve enerji sönümleme kapasitesinin soğuk derze sahip olan numunelerde azaldığı tespit edilmiştir. Kara (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, betonda farklı sürelerde (0, 30, 120 ve 180 dakika) soğuk derz oluşumunun betonun mekanik özellikleri (basınç, silindir yarma, çekip çıkarma, eğilme) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda küp, prizma, silindir numuneler beton yarı yüksekliğince dökülerek soğuk derzlerin oluşumu sağlanmıştır. Ayrıca kurutma-ıslatma, donma-çözülme ve yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan soğuk derz birleşimine sahip betonlarda durabilite özellikleri araştırılmıştır.

Literatürde yer alan çalışmalardan birkaçı dışında test edilen deney numuneleri küçük ebatlı ve donatısız betondan (küp-silindir-prizma) üretilmiştir. Roy ve Laskar (2017) ile Aymak (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda büyük ölçekli kiriş kolon birleşimlerinin sismik davranışı irdelenmiştir. Ayrıca, Vanlalruata ve Marthong (2021) büyük ebatlı soğuk derz birleşimine sahip kiriş eğilme testlerinin literatürdeki eksikliğine dikkat çekmektedir. Mevcut çalışmada farklı soğuk derz birleşim detaylarına sahip,

büyük ölçekli, aderans artırıcı harç kullanılan/kullanılmayan betonarme kirişlerin eğilme davranışları incelenmiştir. Deney numunelerinin yük deformasyon ilişkileri, rijitlikleri ve soğuk derz bağlantı çalışma mekanizmaları araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metod

2.1. Malzeme mekanik özellikleri

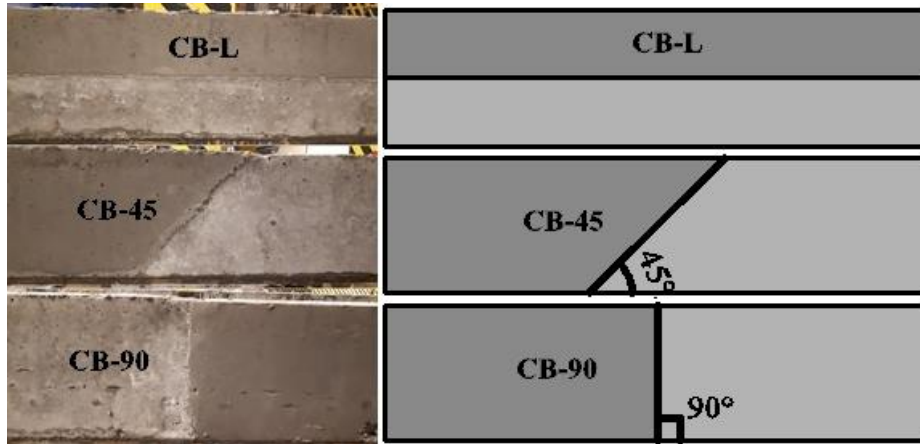
Çalışmada kullanılan donatıların tamamı S420 sınıfı olup bunlara ait mekanik özellikler aksel çekme testleri neticesinde belirlenmiş ve Tablo 1’de verilmiştir. Beton basınç dayanımı için ise 150×150×150 mm ebatlı küp numunelerin aksel basınç testi gerçekleştirilmiştir. Soğuk derze sahip olan tüm deney elemanlarında betonun ilk ve ikinci dökümüne ait ortalama basınç dayanımları sırasıyla 37.9 ve 39.3 MPa olarak tespit edilmiştir. Analitik çalışmada bu iki dayanımın ortalaması olan 38.6 MPa kullanılmıştır.

Tablo 1. Çelik donatı mekanik özellikleri

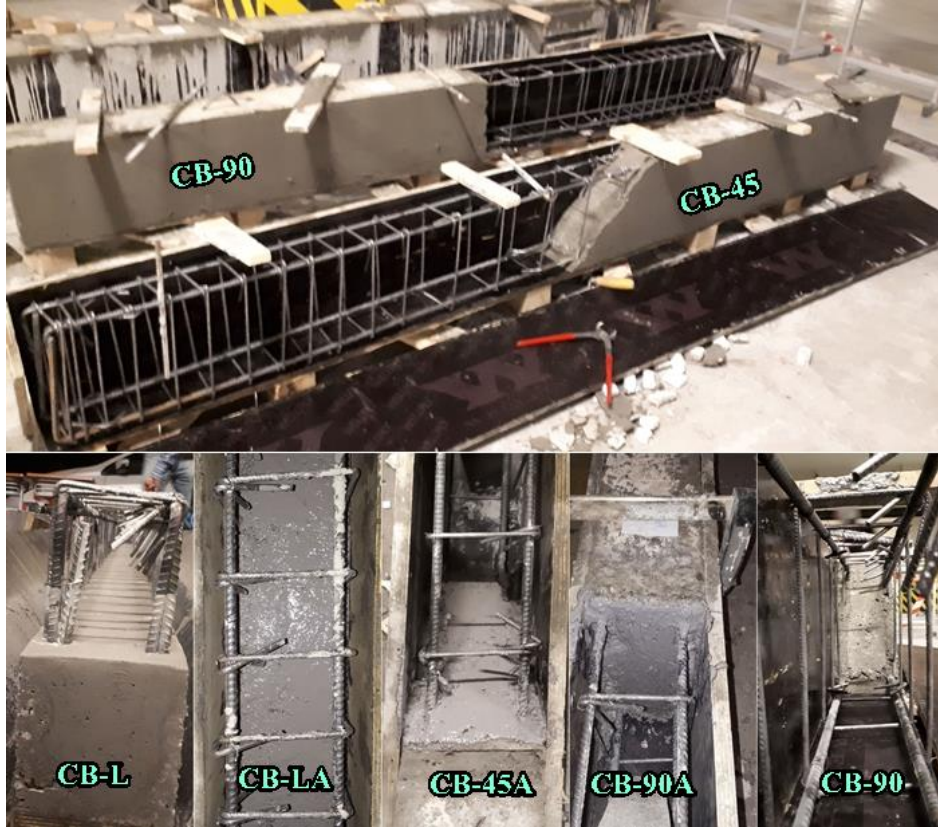
Çap (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)
φ12	446	571
φ10	472	588
φ6	478	593

2.2. Deney elemanları

Çalışmada yedi adet betonarme kiriş yer almaktadır. Bunlardan ilki monolitik olarak dökülmüş olan referans numunesi diğerleri ise betonun 24 saat ara ile iki farklı dökümü neticesinde üretilmiş soğuk derz birleşimine sahip olan kirişlerden oluşmaktadır. Çalışmada üç farklı soğuk derz tipi tasarlanmıştır. Bunlardan ilki betonun kalıba kiriş boyunca yarı yükseklikte dökülmesi ve ikinci dökümde diğer yarı yüksekliğin tamamlanması ile meydana getirilmiştir. Yani soğuk derz düzlemi kiriş boyunca uzanmaktadır. Diğer ikisinde ise soğuk derz düzlemi sabit moment bölgesinde yatayla 45° ve 90° açı yapacak şekilde meydana getirilmiştir (Şekil 1). Farklı soğuk derz birleşim detayına sahip deney elemanlarından ikişer adet üretilerek aderans artırıcı etkisinin gözlemlenmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda “MasterBrace ADH 1420” isimli epoksi esaslı, iki bileşenli, eski betonun yeni betona aderansında kullanılan montaj harcı tercih edilmiştir. Bu harç, mevcut soğuk derz tiplerine sahip kirişlerden birer adetine uygulanmıştır. Şekil 2’de aderans artırıcı harcın kullanıldığı/kullanılmadığı numunelere ve numunelerin ikinci döküm öncesi durumlarına yer verilmiştir.



Şekil 1. Soğuk derz tipleri



Şekil 2. Aderans artırıcı harç kullanılan ve kullanılmayan numuneler

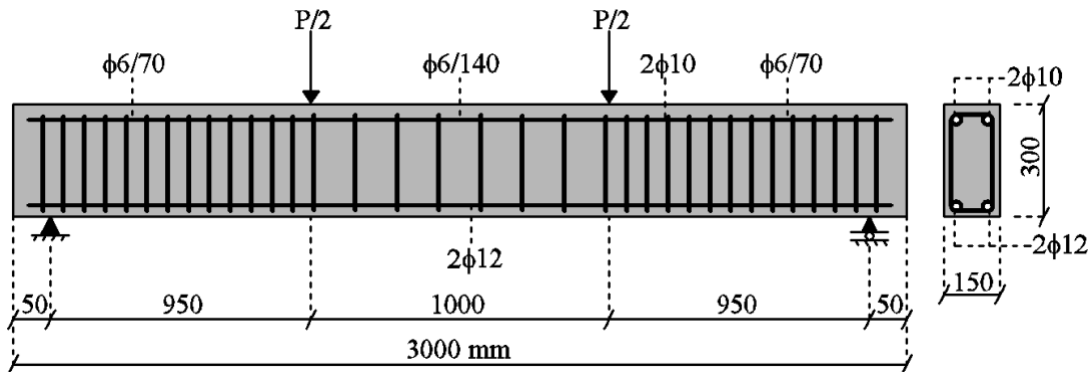
Çalışmada yer alan tüm deney elemanları 150×300 mm dikdörtgen en kesite, 2900 mm net açıklığa ve toplam 3000 mm uzunluğa sahiptir. Deney numuneleri ile ilgili isimlendirme ve diğer detaylar Tablo 2’de sunulmuştur. Numunelerin isimlendirilmesinde RB referans kirişi, CB ise soğuk derz birleşimi mevcut kirişi göstermektedir. L harfi soğuk derz düzleminin kiriş boyunca olduğunu, 45 ve 90 numaraları ise kiriş orta noktasından geçen ve sırasıyla soğuk derz düzleminin yatay ile yaptığı açının 45° ve 90° olduğunu ifade etmektedir. A harfi ise soğuk derz birleşimine sahip kirişlerde aderans artırıcı harcın mevcut olduğunu göstermektedir.

Tablo 2. Deney elemanı detayları

Kiriş	Soğuk Derz Birleşim Tipi	Aderans Artırıcı Harç
RB	-	-
CB-L	Kiriş yarı yüksekliğince kiriş boyunca uzanan	-
CB-45	Yatay ile 45° açı yapan-kiriş orta noktasında	-
CB-90	Yatay ile 90° açı yapan-kiriş orta noktasında	-
CB-LA	Kiriş yarı yüksekliğince kiriş boyunca uzanan	Mevcut
CB-45A	Yatay ile 45° açı yapan-kiriş orta noktasında	Mevcut
CB-90A	Yatay ile 90° açı yapan-kiriş orta noktasında	Mevcut

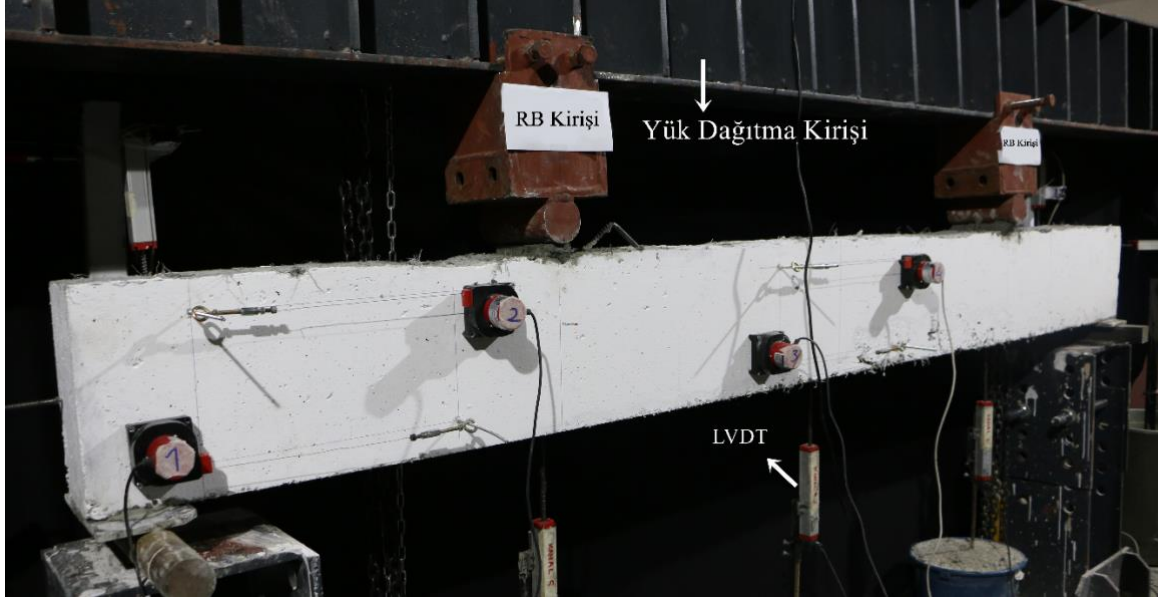
2.3. Donatı detayı ve test düzeneği

Çalışmada yer alan tüm deney elemanları aynı donatı şemasına sahiptir. Çekme ve basınç bölgelerinde sırasıyla ikişer adet 12 ve 10 mm çaplı çelik donatı yer almaktadır. Çekme donatılarının etkili derinliği 284 mm iken, basınç donatılarının merkezi ile beton en dış basınç lifi arasındaki mesafe 15 mm’dir. Tüm numunelerde 6 mm çaplı S420 sınıfı çift kollu etriyeler kullanılmıştır. Etriyeler kesme bölgelerinde 70 mm aralıklarla, sabit moment bölgesinde ise 140 mm aralıklarla yerleştirilmiştir (Şekil 3). Çalışmada denge altı donatılı tasarımı temsil edecek kesit donatı detayı kullanılmıştır.



Şekil 3. Kiriş donatı düzeni

Tüm deneysel çalışma Karatay Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bütün kirişler basit mesnetli olup iki nokta yükleme altında test edilmiştir. Yük sisteme, manuel pompa ve hidrolik kriko vasıtasıyla aktarılmıştır. Yükleme I-kesitli dağıtma kirişi üzerine sabitlenen ve kiriş orta noktasına 500'er mm uzaklıklarda bulunan iki silindire aktarılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Deformasyonlar ise iki yük noktası ve kiriş orta noktası üzerinden olmak üzere üç noktadan LVDT'ler yardımıyla ölçülmüştür.



Şekil 4. Kiriş test düzeneği

3. Analitik Çalışma

Çalışmada analitik hesapların gerçekleştirilebilmesi için beton, çelik çekme ve basınç donatıları için malzeme modelleri kullanılmıştır. Beton için Todeschini (1964) beton modeli, çelik çekme donatısı için pekleşmenin göz ardı edilmediği üç doğrusal bölgeden oluşan donatı modeli (Denklem 1), çelik basınç donatısı için ise elasto plastik donatı modeli kullanılmıştır. Çelik çekme donatısı için kullanılan modelde; ε_{st} , ε_y , ε_{sh} , ε_u sırasıyla donatının çekme, akma, pekleşmeye başlama ve kopma birim deformasyonlarını ifade etmektedir. Bu modelde, ε_{sh} değeri 0.005'tir. $f(\varepsilon_{st})$ ve f_y sırasıyla çekme donatısının birim deformasyona bağlı olarak değişen ve akma anındaki gerilmesini göstermektedir. E_s donatının başlangıç elastisite modülü değerini, E_{s1} ise pekleşmeden sonraki elastisite modülünü ifade etmektedir. Çalışmada E_s için 200 GPa, E_{s1} için ise 1.379 GPa değeri kullanılmıştır.

$$f(\varepsilon_{st}) = \begin{cases} 0 \leq \varepsilon_{st} < \varepsilon_y & E_s \cdot \varepsilon_{st} \\ \varepsilon_y \leq \varepsilon_{st} < \varepsilon_{sh} & \rightarrow f_y \\ \varepsilon_{sh} \leq \varepsilon_{st} < \varepsilon_u & f_y + E_{s1} \cdot (\varepsilon_{st} - \varepsilon_{sh}) \end{cases} \quad (1)$$

Kirişlerin eğilme momenti kapasiteleri hesaplanırken malzeme modellerinin yanı sıra üç temel varsayım dikkate alınmıştır. İlk eğilme öncesindeki düzlem kesitlerin eğilme sonrasında da düzlem olarak kalması, ikincisi çekme bölgesinde yer alan betonun katkısının ihmal edilmesi, üçüncüsü ise donatılar ile beton arasında tam aderans kabulünün yapılmış olmasıdır. Tüm deney elemanlarının teorik taşıma gücü kapasitesi 66.14 kN olarak hesaplanmıştır.

3.1. 45° Açığa sahip soğuk derz çalışma prensibi

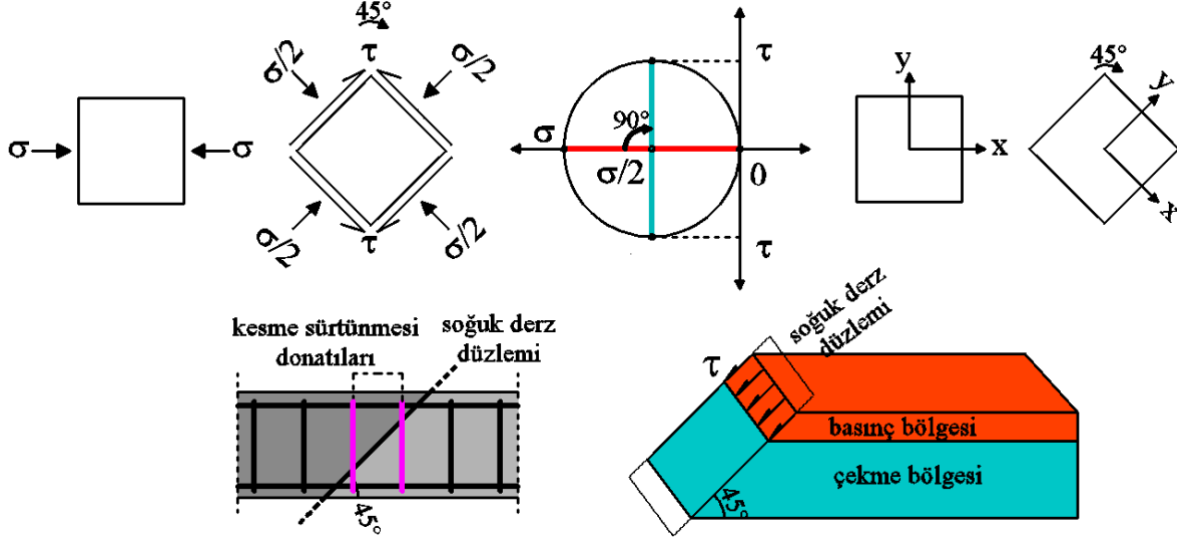
Bu tip soğuk derz uygulamasında birleşim bölgesi tam kesit ortasına denk gelmekte (sabit moment bölgesi) ve yatayla 45° açı yapmaktadır. Kesme tesirinin bulunmadığı bu bölgede eğilme etkisi nedeni ile çekme ve basınç gerilmeleri oluşmaktadır. ACI 318-19 (2019) Bölüm 11.6'da, kesme sürtünmesi donatısı ile kesme düzlemi arasında açı bulunması durumunda kesme dayanımının (V_n) Denklem 2 ile hesaplanması önerilmektedir. Bu ifadede betonun ve kesme sürtünmesi donatısının katkıları yer almaktadır. A_{vf} kesme sürtünme donatısı kesit alanını, f_y bu donatının akma mukavemetini, α (45°) soğuk derz düzlemi ile donatı arasındaki açığı ve A_c sürtünme beton kesit alanını ifade etmektedir. Yönetmelik normal dayanımlı betonlar için $K_f=2.8$ MPa olarak alınmasını önermektedir. Taşıma gücü anında çekme bölgesinde yer alan betonun tamamen çatladığı varsayımına dayanarak buranın sürtünme kesme dayanımına katkısı ihmal edilmiştir. Öyleyse, soğuk derz düzlemi içerisinde yer alan iki adet çift kollu etriye ile basınç derinliğince (c) beton kesiti çatlamamış olduğundan bu iki bileşen sürtünme kesmesine katkı vermektedir (Şekil 5). Buna göre sürtünme beton kesit alanı Denklem 3'e göre hesaplanmıştır. b kiriş genişliğini ifade etmektedir. Denklem 2'ye göre kirişin sürtünme kesme dayanımı (V_n) 74.81 kN'dur.

Taşıma gücü anında, eşdeğer dikdörtgen basınç bloğu varsayımına göre kiriş basınç bölgesinde beton basınç dayanımının %85'ine ($\sigma=0.85f_c=32.81$ MPa) karşılık gelen uniform bir basınç gerilmesi mevcuttur. Bu basınç gerilmesi soğuk derz düzlemi üzerinde kayma gerilmesine sebep olmakta ve bu kayma gerilmesi Mohr dairesine göre basınç gerilmesinin yarısı kadardır ($\tau= \sigma/2=16.41$

MPa). Kaymaya sebep olan kuvvet ise kayma gerilmesinin (τ) sürtünme beton kesit alanı ile çarpılması neticesinde 70.30 kN olarak hesaplanmaktadır. Bu tip birleşimde sürtünme kesme dayanımının soğuk derz düzlemi boyunca kaymaya neden olan kuvvetten daha büyük olması sebebi ile birleşim güvenli bir biçimde kapasiteye ulaşmıştır.

$$V_n = A_f \cdot f_y \cdot (0.8 \sin \alpha + \cos \alpha) + A_c \cdot K_1 \cdot \sin^2 \alpha \quad (2)$$

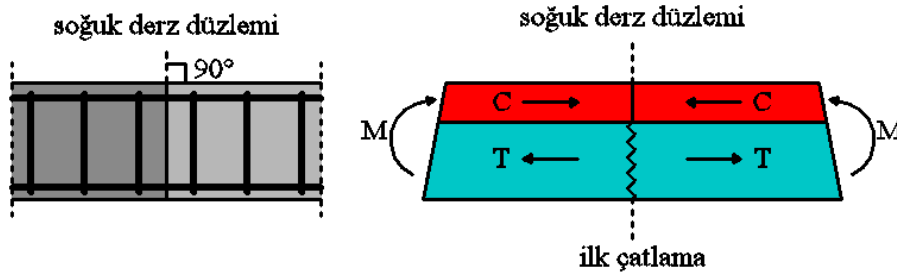
$$A_c = \frac{b \cdot c}{\cos \alpha} \quad (3)$$



Şekil 5. Soğuk derz düzlemi (Yatayla 45°) üzerinde oluşan gerilmeler ile buna karşı koyan donatı ve beton detayları

3.2. 90° Açıya sahip soğuk derz çalışma prensibi

Bu tip birleşimde, soğuk derz birleşim yüzeyi üzerinde herhangi bir kayma gerilmesi meydana gelmemektedir. İki yük noktası arasında salt eğilme kaynaklı oluşan eğilme çatlakları ile soğuk derz birleşim yüzeyi birbirine paraleldir. Bu sebeple en zayıf kesit olan soğuk derz birleşimi üzerinde ilk çatlama meydana gelmiştir. Bu da diğer birleşimlere kıyasla rijitliğin ve eğilme momenti kapasitesinin daha fazla düşmesine sebep olmuştur. Kesitte eğilme momentinden kaynaklı basınç ve çekme tesirleri meydana gelmektedir. Çekme gerilmelerinin artmasıyla soğuk derz düzlemi üzerindeki çatlaklar basınç derinliğine kadar ilerlemiştir. Ancak beton ezilene kadar mevcut basınç kuvveti, birleşimin güvenli bir şekilde tutulmasını sağlamıştır (Şekil 6).



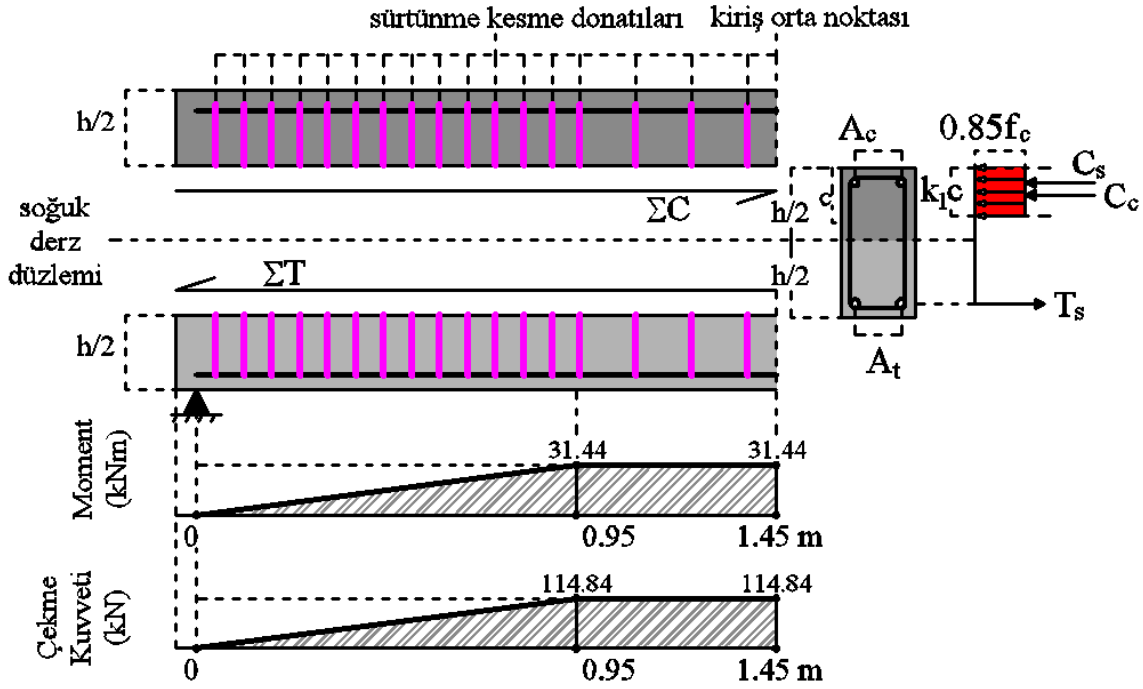
Şekil 6. Soğuk derz düzlemi (Yatayla 90°) üzerinde oluşan kuvvetler ve çalışma prensibi

3.3. Kiriş Boyunca Soğuk Derz Çalışma Prensibi

Bu tip birleşimde kayma yüzeyi kesit boyunca kiriş yüksekliğinin yarısı seviyesinde meydana gelmektedir. Taşıma gücü anında beton basınç derinliği (c), kiriş yarı yüksekliğinden daha küçük olduğundan soğuk derz düzleminin üzerinde yer almaktadır. Bu sebeple kesitte kaymaya sebep olan tesirler kiriş alt kısmında yer alan çekme kuvvetleri ile kiriş üst tarafında yer alan basınç gerilmelerinden kaynaklanmaktadır. Buna bağlı olarak kiriş boyunca çekme (ΣT) ya da basınç kuvvetlerinin (ΣC) toplamı bize kaymaya sebep olacak olan toplam kuvveti vermektedir. Analitik hesaplamalar yapılırken kiriş orta noktasından ikiye bölerek sol yarım kısmı hesaba katılmıştır (Şekil 9). Analitik modeller yardımıyla mesnet noktasından kiriş orta noktasına kadar tüm kesitlerde moment değerlerine karşılık gelen çekme kuvvetleri elde edilmiş ve Şekil 9'da grafiğine yer verilmiştir. Denklem 4 yardımı ile de mesnet noktasından kiriş orta noktasına kadar olan çekme kuvvetlerinin toplamı $\Sigma T = 114.19$ kN olarak elde edilmiştir.

Soğuk derz düzleminde kaymayı engelleyecek olan toplam 17 adet çift kollu etriye ile kiriş boyunca tutunmaya çalışan beton yüzeyleri mevcuttur (Şekil 7). Denklem 2'de, $\alpha = 90^\circ$ ve $A_c = b \cdot (L/2)$ ifadeleri yerlerine yazılarak sürtünme kesme dayanımı $V_n = 976.60$ kN olarak elde edilmiştir. Burada $L/2$ kiriş net açıklığının yarı uzunluğu olup 1450 mm'dir. Bu birleşim tipinde soğuk

derz birleşim yüzeyi oldukça büyük olduğundan sürtünme kesme dayanımı kaymaya sebep olan kuvvetlerden çok büyük çıkmıştır. Yani kesit güvenli olarak yükleri taşımıştır.

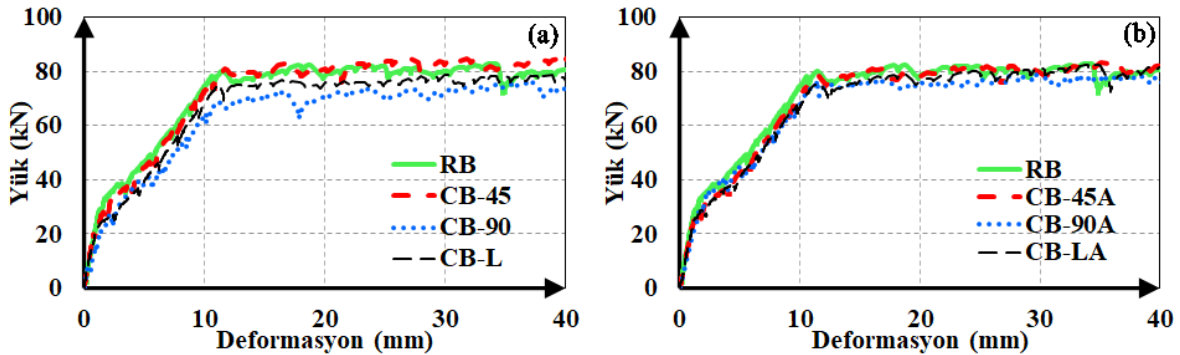


Şekil 7. Soğuk derz düzlemi (kiriş boyunca) üzerinde kaymaya ve buna karşı koyan kuvvetlerin detayları

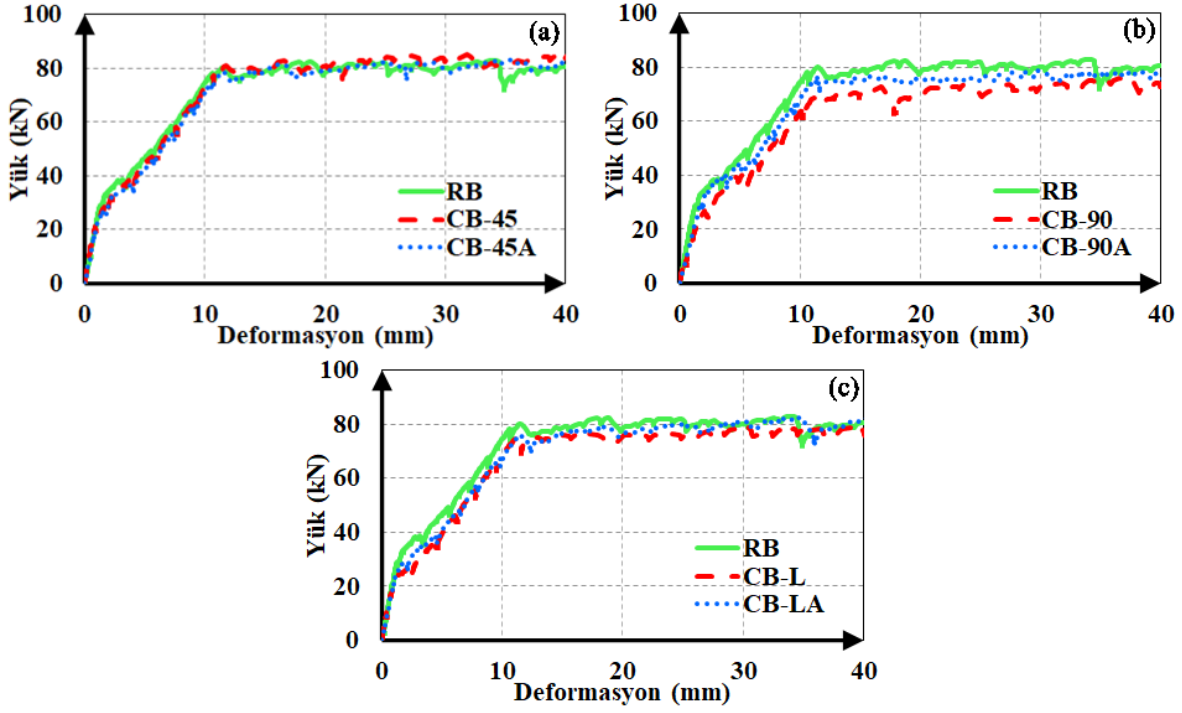
$$\int_0^{L/2} T_s(x) \cdot dx \quad (4)$$

4. Bulgular ve Tartışma

Bölüm 3'te yer alan hesaplamalara göre deney numunelerinin kesme sürtünme dayanımlarının yeterli olduğu sonucu tüm deney elemanlarının teorik eğilme kapasitesini (66.14 kN) aşması ile doğrulanmıştır. Yani tüm numunelerde çekme kırılması meydana gelmiştir. Kirişlerin deneysel yük-deformasyon eğrileri iki farklı gruplama yapılarak verilmiştir. İlk gruplama da aderans artırıcı harcın kullanıldığı/kullanılmadığı tüm numuneler referans kirişi ile ayrı ayrı sunulmuştur (Şekil 8). Şekil 8.a'da referans kirişi ile aderans artırıcı harc kullanılmayan, Şekil 8.b'de ise referans kirişi ile aderans artırıcı harc kullanılarak hazırlanan soğuk derz sahip numunelerin yük deformasyon grafiklerine yer verilmiştir. İkinci gruplama da ise aynı tip soğuk derz sahip numuneler referans kirişi ile ayrı ayrı sunulmuştur (Şekil 9). Yatayla 45° açı yapacak şekilde soğuk derz sahip numuneler Şekil 9.a'da, yatayla 90° açı yapacak şekilde soğuk derz sahip numuneler Şekil 9.b'de ve kiriş boyunca uzanan soğuk derz tipine sahip numunelere doğrultusuna paralel uzanan soğuk derz tipine sahip deney numuneleri Şekil 9.c'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Referans deney numunesi ile (a) aderans artırıcı harc kullanılmayan, (b) aderans artırıcı harc kullanılan deney numunelerine ait yük deformasyon grafikleri



Şekil 9. Referans deney numunesi ile (a) yatayla 45°, (b) yatayla 90°, (c) kiriş boyuna doğrultusuna paralel uzanan soğuk derz tipine sahip deney numunelerine ait yük deformasyon grafikleri

Çalışmada tüm numunelere ait ilk çatlama ve akma yükleri, enerji sönmleme kapasitesi ve süneklik değerlerine Tablo 3'te yer verilmiştir. İlk çatlama ve akma yükü değerleri ile rijitlik değişiminin daha iyi gözlemlenebilmesi açısından yük deformasyon eğrileri 16 mm deformasyon değeri ile sınırlandırılarak Şekil 10'da gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 10.d'de tüm parametrelerin referans numunesine göre değişimi grafik ile de ifade edilmiştir.

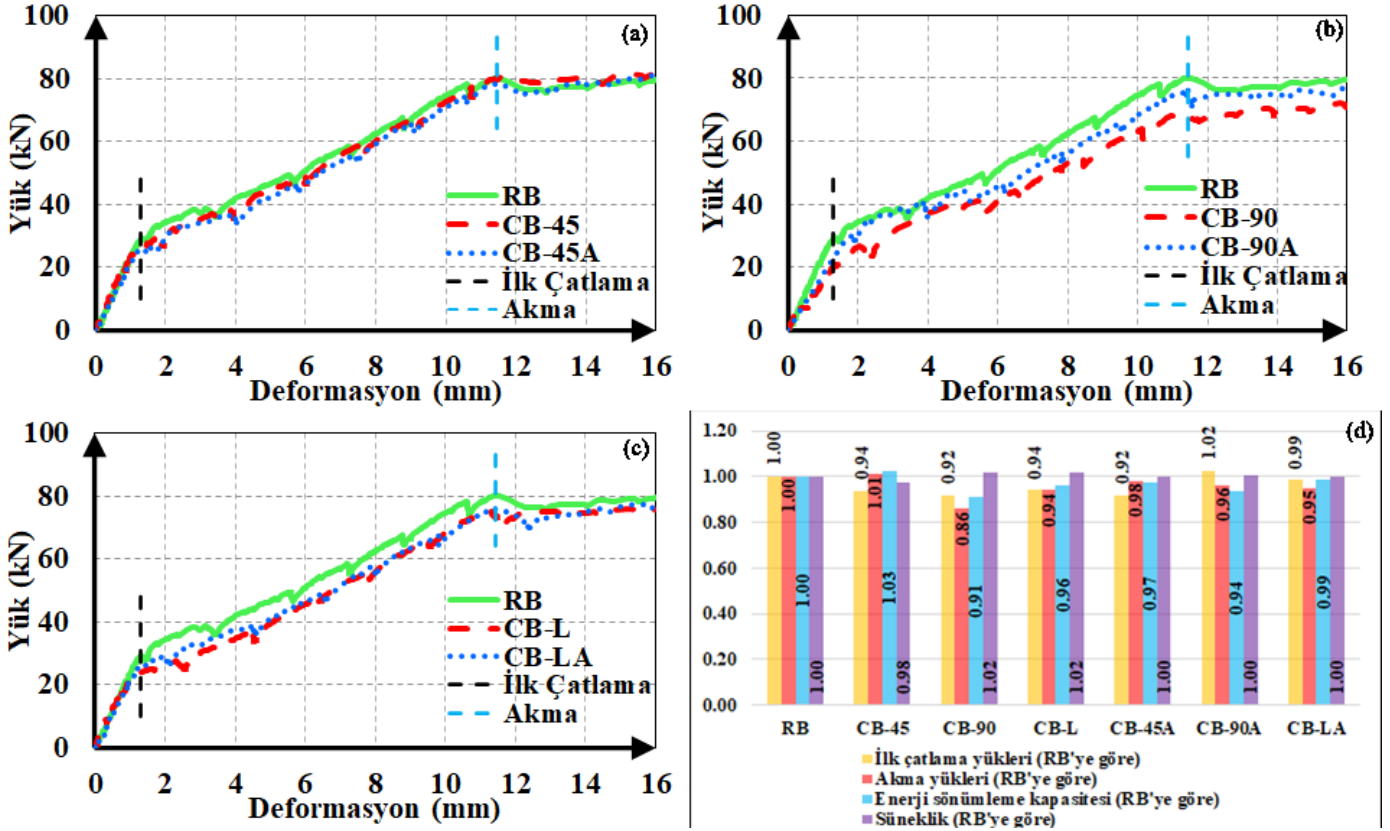
Tablo 3. Deney elemanlarının ilk çatlama-akma yükleri, enerji sönmleme kapasiteleri ve süneklik değerleri

Numune	İlk Çatlama Yükü (kN)	RB'ye göre (%)	Akma Yükü (kN)	RB'ye göre (%)	Enerji Sönmleme Kapasitesi (kJ)	RB'ye göre (%)	Süneklik	RB'ye göre (%)
RB	29.27	100.00	80.03	100.00	11.66	100.00	12.66	100.00
CB-45	27.46	93.82	81.06	101.29	11.98	102.74	12.37	97.70
CB-90	26.83	91.66	68.82	85.99	10.62	91.08	12.89	101.78
CB-L	27.53	94.06	75.26	94.04	11.21	96.14	12.88	101.69
CB-45A	26.93	92.01	78.45	98.03	11.34	97.26	12.63	99.74
CB-90A	29.97	102.39	77.12	96.36	10.93	93.74	12.71	100.35
CB-LA	28.84	98.53	75.92	94.86	11.51	98.71	12.62	99.65

Deney numunelerinin ilk çatlama yükleri arasında önemli farklılıklar bulunmamaktadır. Ancak soğuk derzin ilk çatlama yükü üzerinde etkileri araştırılmak istendiğinde sabit moment bölgesinde yatayla 90° açı yapan numunelerde ilk çatlak, Roy ve Laskar (2017)'ın çalışmasında gerçekleştiği gibi tam derz düzlemi üzerinde meydana gelmiştir. Bunun sebebi sabit moment bölgesinde bu derzin eğilme çatlağı yönüne paralel olarak uzanması ve bu bölgedeki en zayıf kesiti temsil etmiş olmasıdır. Bu nedenle aderans artırıcı kullanılmayan CB-90 numunesinde referans numunesine göre yaklaşık %8.5'lük maksimum fark ile en düşük ilk çatlama yükü tespit edilmiştir. CB-45 numunesinde ise referans numunesine göre yaklaşık %6'lık bir farkla ilk çatlamanın meydana geldiği tespit edilmiştir. Ancak aderans artırıcı harcın etkisiyle ilk çatlama yükünde meydana gelen düşüş telafi edilebilmiştir (CB-90A). Özellikle yatayla 90°'lik açı yapan soğuk derz birleşimine sahip olan CB-90A elemanında, aderans artırıcı harç kullanımı ile ilk çatlamanın derz düzlemi üzerinde oluşması engellenememiş ancak ilk çatlama yükü üzerindeki olumlu etkisi (CB-90'a göre yaklaşık %10'luk bir artış) gözlemlenmiştir.

Yük deformasyon eğrilerinden de anlaşılacağı üzere ilk çatlama meydana gelene kadar rijitlikler birbirine oldukça yakındır. İlk çatlama sonrasında referans numune (RB kirişi) ile diğer numuneler arasındaki yük deformasyon eğrileri arasındaki uyum ve akma yüklerinin arasındaki farkın aderans artırıcı kullanımına bağlı olduğu Şekil 8'den görülebilmektedir. Aderans artırıcı harç kullanılmayan CB-90 numunesinin referans kirişe göre, akma yükü yaklaşık %14 daha az (Tablo 3-Şekil 10.d) ve ilk çatlama sonrası rijitliği yaklaşık %9'luk maksimum farkla daha düşüktür. Bu tip soğuk derz birleşime sahip numunelerde dayanımın daha düşük olduğu Ünlü (2018) tarafından da belirtilmiştir. Harcın kullanılmadığı diğer numunelerden CB-L numunesi ise referans numuneye göre akma yükünde yaklaşık %6'lık bir kayıp görülmektedir. Harç kullanılan numunelerin akma yükleri ise referans numuneye göre oldukça yakındır. Özellikle harç kullanılan CB-90A numunesinde, CB-90'a göre akma yükü daha yüksek (RB kirişinin %96'sı) ve rijitlikteki azalış önemli ölçüde telafi edilebilmiştir.

Deney numunelerinin süneklik değerleri nihai deformasyon değerlerinin akma anındaki deformasyon değerlerine oranı ile elde edilmiştir. Denge altı donatılı olarak tasarlanmış ve çekme kırılması neticesinde taşıma gücüne ulaşmış olan tüm deney elemanlarının süneklik değerleri birbirine oldukça yakındır (Şekil 10.d). Enerji sönmleme kapasiteleri bakımından ise referans numuneye göre büyük farklılıklar söz konusu değildir. Aderans artırıcı harç kullanılmayan numuneler içerisinde en fazla sönmleme kapasitesi ve en yüksek akma yükü CB-45 numunesine ait olduğu tespit edilmiştir. En zayıf yapısal performans ise CB-90 numunesi sahiptir. Bu numune (CB-90) diğer parametrelerde olduğu gibi yaklaşık %9'luk maksimum farkla referans numuneye göre daha az enerji sönmleme kapasitesine sahiptir. Bunun temel nedeni bu numunedeki ilk çatlağın en erken, rijitlikteki kaybın en büyük ve akma yükünün en düşük olmasıdır. Aderans artırıcı harç kullanımı ile genel olarak numunelerin enerji sönmleme kapasiteleri artış eğilimindedir.



Şekil 10. (a) Yatayla 45°, (b) yatayla 90°, (c) kiriş boyuna doğrultusuna paralel uzanan soğuk derz tipine sahip deney numunelerine ait ilk çatlama ve akma yükü seviyeleri yük deformasyon grafikleri, (d) referans deney numunesine göre ilk çatlama-akma yükü, enerji sönmleme ve süneklik kapasiteleri

5. Sonuçlar

Mevcut çalışmada, betonarme kirişlerde farklı tipte soğuk derz oluşumunun ve bu birleşim üzerinde aderans artırıcı harç kullanımının kiriş eğilme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada biri monolitik olmak üzere toplam yedi adet kirişin iki nokta yükleme testi gerçekleştirilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Tüm deney numunelerinin sürtünme kesme dayanımı yeterlidir. Tüm numuneler sünek davranış göstererek eğilme taşıma gücüne ulaşmıştır.
- Monolitik döküm ve soğuk derz birleşimine sahip olan elemanların ilk çatlama yükleri arasındaki farklılık oldukça azdır. Yalnızca soğuk derz düzlemi eğilme çatlağına paralel olan numunelerde (CB-90 ve CB-90A) ilk çatlama sabit moment bölgesindeki en zayıf kesit olan soğuk derz düzlemi üzerinde meydana gelmiş ve düzlem boyunca ilerlemiştir. Deney elemanları içerisinde referans elemana göre en düşük ilk çatlama yükü, CB-90 numunesinde yaklaşık %8.5'luk bir farkla gerçekleşmiştir. Aderans artırıcı harç kullanımı ile ilk çatlama yükünde en fazla %10'luk bir artış tespit edilmiştir (CB-90 ile CB-90A).
- İlk çatlama sonrasında harç kullanılmayan elemanlarda kullanılanlara göre rijitliklerde daha büyük düşüşler gözlemlenmiştir. Referans numuneye göre, rijitlikteki yaklaşık %9'luk en büyük düşüş CB-90 numunesinde gerçekleşmiştir.
- Deney elemanları arasında referans elemana göre en düşük akma yükleri sırasıyla yaklaşık %14'lük ve %6'luk farklarla CB-90 ve CB-L numunesinde gerçekleşmiştir. Bu durumun temel sebebi aderans artırıcı harç kullanılmayan numunelerde ilk çatlama sonrası rijitlikteki daha büyük düşüş etkili olmuştur. Aderans artırıcı harç kullanılmasıyla birlikte akma yükü değerleri referans numuneye çok yakın olarak elde edilmiştir.
- Aderans artırıcı harç kullanılan/kullanılmayan soğuk derz birleşimine sahip numunelerden CB-90 numunesi haricinde enerji sönmleme kapasitelerinin referans numuneye oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, rijitlikteki daha

fazla kayıptan ve daha düşük yük seviyesinde akmanın gerçekleşmesinden kaynaklanmıştır. Ancak genel olarak harç kullanılan numunelerin enerji sönmülme kapasiteleri az da olsa artış eğilimindedir.

- Aderans artırıcı harç kullanılsın ya da kullanılsın, giriş boyunca uzanan ve sabit moment bölgesinde yatayla 45° açı yapan soğuk derz birleşimlerinin kullanılmasının yapısal olarak bir sakınca tespit edilmemiştir.
- Giriş orta noktasında yatayla 90° açı yapan elemanlarda ilk çatlağın soğuk derz üzerinde oluşması ve bu düzlem üzerinde ilerlemesi nedeniyle, diğer elemanlardan daha düşük yapısal performans gözlemlenmiştir. Bu tip birleşimde aderans artırıcı harç kullanımı önerilmektedir.

Referanslar

ACI Committee 318. ACI 318M-19 (2019): Building Code Requirements for Structural Concrete; American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA.

Aymak, İ. (2020). *Betonarme yapılarda oluşan soğuk derzlerin birleşim bölgelerinin dayanımına ve sınırlılığına olan etkisinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye.

Kadyrov, N., & Yazıcıoğlu, S. (2016). Soğuk derzin betonun eğilme ve doğrudan çekme dayanımı üzerindeki etkisinin araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 19(3), 203-210.

Kara, İ. B. (2021). Experimental Investigation of the Effect of Cold Joint on Strength and Durability of Concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(11), 10397-10408.

Laskar, S. M., Reja, H., & Talukdar, S. (2020). Behaviour of cold jointed and layered Portland cement-alkali-activated reinforced concrete beams. *Asian Journal of Civil Engineering*, 21(7), 1193-1204.

Ozturk, B. (2017). Seismic behavior of two monumental buildings in historical Cappadocia region of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(7), 3103-3123.

Ölmez, Ö. (2019). *Döküm süresi ve birleşim geometrisinin betondaki soğuk derz oluşumuna etkisinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, DÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, Türkiye.

Rathi, V. R., & Kolase, P. K. (2013). Effect of cold joint on strength of concrete. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(9), 4671-4679.

Roy, B., & Laskar, A. I. (2017). Cyclic behavior of in-situ exterior beam-column subassemblies with cold joint in column. *Engineering Structures*, 132, 822-833.

Todeschini, C. E., Bianchini, A. C., & Kesler, C. E. (1964). Behavior of concrete columns reinforced with high strength steels. In *Journal Proceedings* (Vol. 61, No. 6, pp. 701-716).

Turan, Z. (2019). *Betonda soğuk derzin mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.

Udoh, A. (2020). Mechanical behaviour of concrete cold joints. *Ebony Journal of Science*, 3(1), 59-74.

Ünlü, A. (2018). *Soğuk derzin betonun mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, KTO Karatay Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.

Vanlalruata, J., & Marthong, C. (2021). Effect of cold joint on the flexural strength of RC beam. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 6(1), 28-36.



Farklı Dolgu Duvar Malzemelerinin ve Planda Yerleşimlerinin Betonarme Bir Yapının Davranışına Etkisi

The Effect of Different Infill Wall Materials and Their Location in Plan on the Behaviour of a Reinforced Concrete Building

Sadrettin Sancioğlu¹ , Hasan Furkan Soydoğan² , Hüsnü Can¹ 

¹KTO Karatay Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42020 ve Konya, TÜRKİYE

²KTO Karatay Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42020 ve Konya, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 05/12/2021

Kabul / Accepted: 03/03/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Betonarme yapıların tasarım hesaplamalarında ve projelendirilmesinde her ne kadar dolgu duvarların etkisi ihmal edilse de dolgu duvarların yapının dayanımına ve rijitliğine etki ettiği bilinmektedir. Bu çalışmada boşluklu fabrika tuğlası ve gazbeton blok olmak üzere iki farklı dolgu duvar malzemesinin ve farklı duvar yerleşimlerinin betonarme çerçevesi taşıyıcı sisteme sahip x- yönünde altı açıklıklı y- yönünde üç açıklıklı on katlı simetrik bir yapıya etkisi araştırılmıştır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018'e göre 16 adet model sonlu elemanlar yöntemi tabanlı çalışan SAP2000 programında incelenmiştir. Farklı malzemelere sahip dolgu duvarlar, özelliklerine göre tekli eşdeğer basınç çubuğu olarak programa tanımlanmıştır. Yapılan modellemeler üzerinde farklı dolgu duvar tiplerinin ve farklı dolgu duvar yerleşimlerinin betonarme çerçevesi bir yapının tepe noktası yatay ötelenmesine, görelî kat ötelenmelerine, dayanımına, yatay ve düşey yükler altında yapı performans hedefine etkisi irdelenmiştir. Araştırma sonucunda dolgu duvar malzemesi tiplerinin ve dolgu duvar yerleşiminin yapının tepe noktası yatay ötelenmesini her iki yönde önemli miktarda azalttığı, yapının rijitliğini artırırken periyodunu düşürdüğü gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Dolgu Duvar, Eşdeğer Basınç Çubuğu, Deprem Etkisi, TBDY-2018”

Abstract

It is known that infill walls affect the strength and rigidity of the structure, although their effect is neglected in the calculation and design of reinforced concrete structures. In this study, the effects of two different infill wall materials, namely vertically perforated brick and gas concrete block, and different wall locations on a ten-storey symmetrical structure with six spans in the x-direction and three spans in the y-direction with a reinforced concrete framed load-carrying system were investigated. According to Turkey Building Earthquake Code-2018, 16 models were examined in the SAP2000 program, which is based on the finite element method. Infill walls with different materials are defined in the program as a single equivalent pressure bar according to their properties. The effects of different infill wall types and different infill wall placements on the horizontal displacement of a reinforced concrete framed structure, relative storey drifts, strength, and the performance target of the building under horizontal and vertical loads were examined on the models made. As a result of the research, it was observed that infill wall material types and infill wall location significantly reduced the horizontal displacement of the structure in both directions, while increasing the rigidity of the structure and decreasing its period.

Key Words

“Infill Wall, Equivalent Strut Model, Earthquake Effect, TBEC-2018”

1. Giriş

Dolgu duvarların yapı dayanımını ve rijitliğini arttırması beklenir. Bundan dolayı emniyetli yönde kalacağı varsayımıyla dolgu duvarlar yapısal analizlerde göz önüne alınmazlar (Karabay, 1989). Betonarme yapılarda, dolgu duvarlar analizler de zati ağırlık olarak kesit hesaplarında dikkat edilse de yatay kuvvetlere karşı etkisi ihmal edilebilmektedir. Bu etki üzerinde analitik, numerik ve deneysel çalışmalar yapılmış ve çalışmalar sonucunda bu etki deprem yönetmeliklerine girmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018 (TBDY-2018) Bölüm 15'te bu etki tanımlanmıştır (TBDY-2018, 2018).

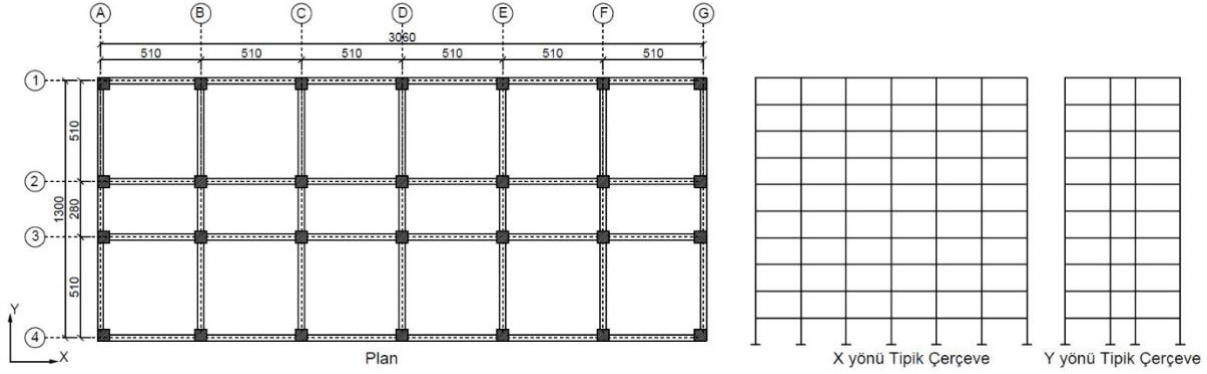
Dolgu duvarlarla ilgili daha önceki yapılan analitik çalışmalarda dolgu duvarları temsil etmesi için eşdeğer basınç çubuğu yaklaşımına dayalı modeller önerilmiştir (Madan ve diğerleri, 1997). Dolgu duvarların deprem performansına etki ettiği ve dünyada yürürlükte olan yönetmeliklerde bulunan hesaplarda dolgu duvarların etkisinin dahil edildiği bilinmektedir (Sucuoğlu, 2013). Dolgu duvarlarla ilgili deneysel çalışmalar yapılmış, dolgu duvarların yanal rijitliği arttırdığı, yanal ötelenmeleri ve görel kat ötelenmelerini azalttığı, eşdeğer basınç çubuğu yaklaşımının, dolgu duvarların modellenmesinde kullanılabileceği görülmüştür (Baran, 2012; Demirel, Yakut, Binici ve Canbay, 2015). Aykaç ve diğerleri, 2017'de yaptıkları deneysel çalışmada mevcut tuğla duvarların her iki yanına delikli levhalar yerleştirilerek tuğla duvarların dayanımını arttırmayı hedeflemişlerdir. Aksoy ve Kara, 2020'de yaptıkları çalışmada çeşitli panel konfigürasyonları ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçevelerle ilgili çalışma yapmış, yanal yük taşıma kapasitesinin ve enerji yayma kapasitesinin arttığını gözlemlemişlerdir. Alhalil ve Güllü, 2021'de yaptıkları çalışmada dolgu duvarları eşdeğer diyagonal basınç elemanları kullanılarak temsil edilmiş ve yükseklik boyunca asimetric olarak yerleştirilen güçlendirilmemiş yağma dolgu duvarların betonarme yapı sistem davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Dolgu duvarların yapısal sistemin kat yer değiştirmelerini azaltmada faydalı etkilere sahip olduğu gözlemlemişlerdir. Bu durum dolgu duvarların yapısal sistem yanal rijitliği üzerinde katkı sağlayıcı etkisinden kaynaklanmaktadır.

Dolgu duvarlarla ilgili yapılan numerik çalışmalarda sonlu elemanlar yöntemi tabanlı programlar kullanılmıştır (Crisafulli, Carr ve Park, 2000; Yakut, Binici, Demirel ve Özcebe, 2013). Bu çalışmalarda literatürde önerilen ancak deneysel olarak bulunamayan eşdeğer basınç çubuklarının yönleri bulunmuş ve eşdeğer basınç çubuklarının eğiminin kullanılacak dolgu malzemesinin kesit boyutuna, tipine ve düzenine bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir (Guerrero ve diğerleri, 2014; Öztürkoğlu, Uçar ve Yeşilce, 2015; Yiğit, Erdil ve Akkaya, 2019). Buna bağlı olarak eşdeğer basınç çubuğunu kesit boyutunun bir fonksiyon olarak türetilebileceği görülmüştür (Papia, Cavaleri ve Fossetti, 2003). Eşdeğer basınç çubuğu, yalnızca bir değil, birden fazla çubukla oluşturulduğunda yine dolgu duvarın davranışını temsil ettiği ve hatta birden fazla basınç çubuğuyla oluşturulan dolgu duvar modelinin, duvarın davranışını daha iyi tahmin ettiği gözlenmiştir (Durmazgezer, 2013; Kaushik, Rai ve Jain, 2008; Uysal, 2013). Dolgu duvarların dayanımı ve yanal rijitliği arttırdığı; yapının tepe noktası ötelenmesini ve görel kat ötelenmelerini azalttığı numerik çalışmalarla bulunmuştur (Çavdar, Köse ve Sunca, 2020; Kızıloğlu, 2006; Tekin, Alsancak ve Ay, 2007). İtme analizlerinde dolgu duvarların bina performans hedefinin sağlanmasında, yapıya gelen deprem etkisinin sönümlenmesinde ve yapıda mafsal oluşumuna kayda değer miktarda etkisi olduğu da yapılan çalışmalarda gösterilmiştir (Bayrak ve Bıkçe, 2019; Korkmaz ve Uçar, 2006). Ayrıca düzenli dolgu duvar yerleşiminin yapıda burulma açısından dayanım ve güvenliği büyük ölçüde arttırdığı gözlenmiştir (Sivri, Demir ve Kuyucular, 2006). Genel olarak yapılan çalışmalara bakıldığı zaman dolgu duvarların yatay kuvvetlere etkisinin olduğu ve bu etkinin yapısal analiz yapılırken dikkate alınmasının gerekliliği ortaya konulmuştur. TBDY-2018 Bölüm 15'te gösterilen eşdeğer basınç çubukları ile yapılan modelleme, dolgu duvarların yatay kuvvetlere etkisi için literatür tarafından onaylanan bir modelleme şeklidir.

Bu çalışmada 30,60x13 m taban alanına sahip, kat yüksekliği her katta eşit ve 3 m olan 10 katlı simetrik betonarme çerçeveli bir yapı incelenmiştir. Çalışmada boşluklu fabrika tuğlası ve gazbeton blok olmak üzere iki tip dolgu malzemesinin ve farklı dolgu duvar yerleşimlerinin yapının yatay yükler altındaki davranışına etkisi araştırılmıştır. TBDY-2018 yönetmeliği ve Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (TS500) standardından alınan yükler ve kombinasyonlara uygun şekilde modellenen yapılarda, dolgu duvar malzemesinin ve dolgu duvar yerleşiminin, yapının yatay ve düşey yükler altında performans hedefine, kat ötelenmelerine, görel kat ötelenmelerine ve dayanımına etkisi irdelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, ZC yerel zemin sınıfına sahip, enlemi 41.075044° ve boylamı 32.660299° olan bir konumda konut olarak kullanılacağı varsayılan süneklik düzeyi yüksek 10 katlı betonarme çerçeveli taşıyıcı sisteme sahip simetrik bir yapı incelenmiştir. Yapı, x- ekseninde her biri 5,1 m olan altı açıklıklı ve y- ekseninde üç açıklıklı (5,1-2,8-5,1 m) olmak üzere 30,60x13 m taban alanına sahip olacak şekilde her katın yüksekliği birbirine eşit ve 3 m olarak tasarlanmıştır. Çalışmada boşluklu fabrika tuğlası ve gazbeton blok olmak üzere iki farklı dolgu duvar tipinin yapısal davranışa etkisi incelenmiştir. İncelenen betonarme çerçeveli yapının görünüşleri Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Betonarme Çerçevesel Yapının Görünüşleri (Tüm ölçüler santimetre cinsindedir.)

2.1. Yük analizi ve yük kombinasyonları

Çalışmada incelenen yapıya etki eden sabit ve hareketli yükler Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri (TS 498) standardına uygun olarak alınmıştır (TS498, 1997). Kolonların ve kirişlerin öz ağırlıkları kullanılan kesitlere göre değişiklik göstereceğinden yük analizinde dahil edilmemiştir. Ancak kolonların ve kirişlerin öz ağırlıkları kullanılacak yapısal analiz programı olan SAP2000'de kesit özelliklerine göre dahil edilmiştir. Çatı kar yükü bölgesi TS 498 Ek 1'e göre belirtilen konum için "III" bölge seçilmiştir. Ölü yükler, hareketli yükler ve kar yükleri plan üzerinde alansal olarak yerçekimi doğrultusunda etkilmiştir. Rüzgâr yükleri için SAP2000 programında, TS 498 standardı seçilmiştir. Standartta göre rüzgâr hızı yüksekliğe bağlı değişiklik gösterir (0-8 m için 28 m/s; 9-20 m için 36 m/s; 21-100 m için 42 m/s). Ancak bu çalışma için bu değişiklik dikkate alınmamış ve en gayri müsait durum düşünülerek program içerisinde rüzgâr hızı 42 m/s girilmiştir. Rüzgâr yükleri, program içerisinde kat döşemelerinde oluşturulan rijit diyaframlar üzerinden her iki eksen de etkilmiştir. Analizde kullanılan yükler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Düşey Yükler

Çatı Döşemesi (kN/m ²)	
G (ölü yük)	5
Q _r (çatı hareketli yük)	2
S (kar yükü)	0,75
Normal Kat Döşemesi (kN/m ²)	
G (ölü yük)	5
Q (hareketli yük)	3,5

Çalışmada yatay ve düşey deprem etkisi dikkate alınmıştır. Buna göre yatay deprem yükleri program içerisinde kat döşemelerinde oluşturulan rijit diyaframlar üzerinden her iki eksen de etkilmiştir. Deprem parametreleri, 41.075044°-32.660299° için AFAD-Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulamasından alınmıştır (TDTH, 2021). Alınan bilgiler deprem yer hareketi düzeyi-2 (DD-2) için Tablo 2'de ve DD-3 için Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 2. Deprem Parametreleri (DD-2)

Deprem Yer Hareketi Düzeyi		Yerel Zemin Sınıfı		
DD-2		ZC		
S _s	S ₁	PGA [g]	PGV [cm/sn]	
0,968	0,294	0,400	26,435	
T _A (sn)	T _B (sn)	T _L (sn)	S _{DS}	S _{D1}
0,076	0,380	6	1,162	0,441

Tablo 3. Deprem Parametreleri (DD-3)

Deprem Yer Hareketi Düzeyi		Yerel Zemin Sınıfı		
DD-3		ZC		
S _s	S ₁	PGA [g]	PGV [cm/sn]	
0,381	0,107	0,164	10,206	
T _A (sn)	T _B (sn)	T _L (sn)	S _{DS}	S _{D1}
0,065	0,324	6	0,495	0,161

Düşey deprem etkisi TBDY-2018 4.4.3.2'ye uygun olarak TBDY-2018 Denklem 4.10'da verilen formülle yaklaşık hesaplanmıştır (Denklem 1). Hesaplanan değer, ölü yük (G) içerisine katılmıştır (TBDY-2018, 2018).

$$E_d^{(Z)} \approx (2/3)S_{DS}G \quad (1)$$

Analizlerde kullanılacak kombinasyonlar TS500 ve TBDY-2018 Bölüm 4.4.4'e göre belirlenmiş ve aşağıda sırasıyla verilmiştir (TS500, 2000). Düşey deprem etkisi yukarıda yaklaşık olarak hesaplanıp ölü yük (G) içerisine dahil edilmiştir. Analizde kullanılacak deprem etkili kombinasyonlar, TBDY-2018 Denklem 4.11'e göre belirlenmiştir. Tüm yük kombinasyonlarında G, Q, S, rüzgâr (W) ve

deprem (E) yükleri kullanılmıştır. W yükleri hem x- hem de y- ekseninde dikkate alınırken, E yükleri ise x-, y- ve z- (düşey deprem) eksenlerinde dikkate alınmıştır.

K1	: 1.4G+1.6Q
K2	: G+Q+E _x
K3	: G+Q+E _y
K4	: 1.0G+1.3Q+1.3W _x
K5	: 1.0G+1.3Q+1.3W _y
K6	: 0.9G+1.3W _x
K7	: 0.9G+1.3W _y
K8	: 1.0G+1.0Q+0.2S+1.0E _x +0.3E _y +0.3E _z
K9	: 1.0G+1.0Q+0.2S+0.3E _x +1.0E _y +0.3E _z

2.2. Dolgu duvarların özellikleri ve eşdeğer basınç çubuğunun boyutlandırılması

TBDY-2018'e EK15C'ye göre dolgu duvarın modellenmesinde eşdeğer basınç çubuğunun kalınlığı güçlendirilmiş dolgu duvarının kalınlığına eşittir. Basınç çubuğu genişliği a_d , TBDY – 2018 Denklem 15C.1'den hesaplanmıştır (Denklem 2).

$$a_d = 0,175(\lambda_d h_k)^{-0,4} r_d \quad (2)$$

Burada a_d çubuk genişliği (mm), h_k kolon boyu (mm), r_d dolgu duvarı köşegen uzunluğudur (mm). λ_d , TBDY – 2018 Denklem 15C.2'den hesaplanacaktır (Denklem 3).

$$\lambda_d = \left[\frac{E_d t_d \sin 2\theta}{4E_c I_k h_d} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

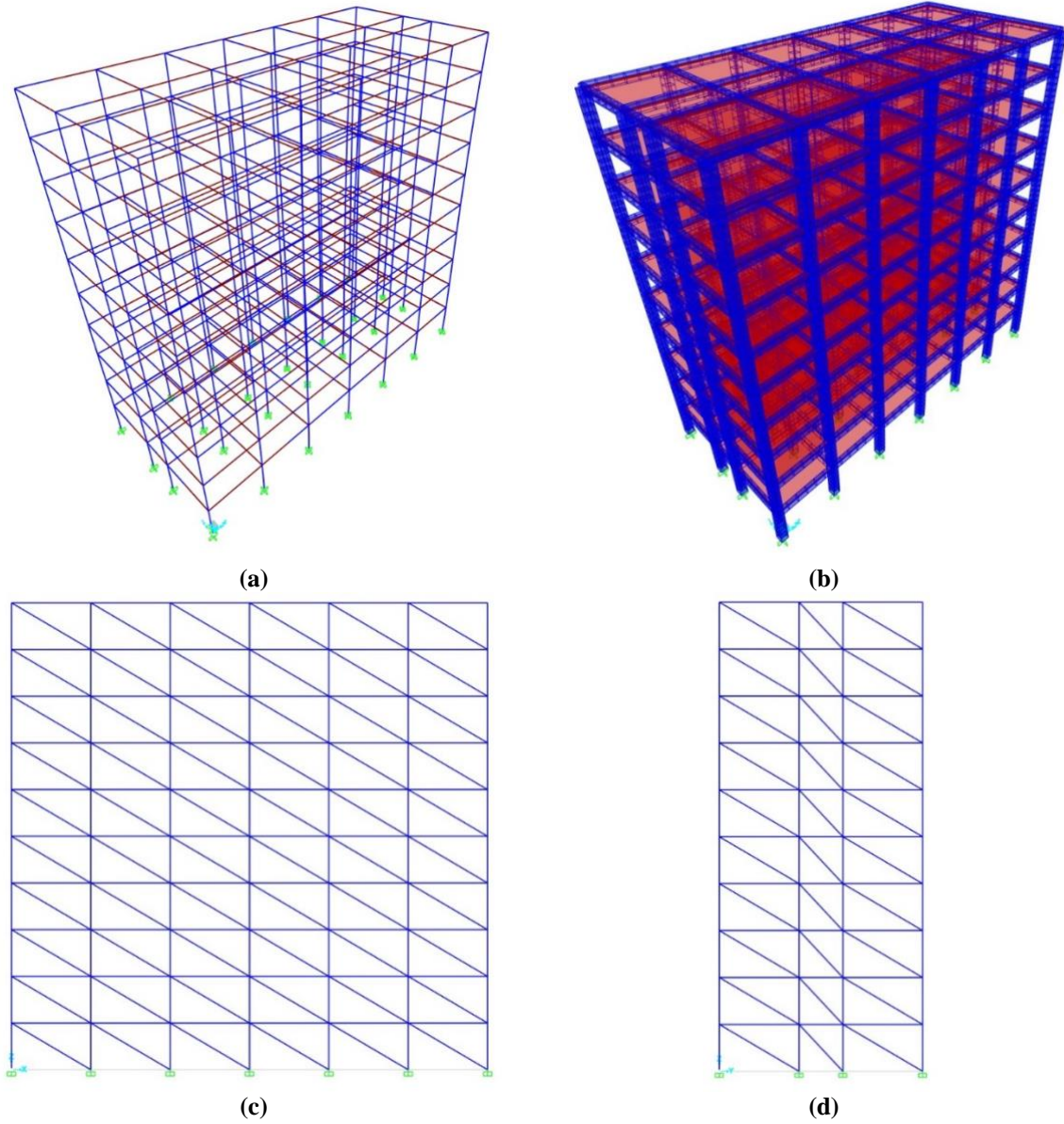
x- yönündeki tüm açıklıklar eşit olup yerleştirilecek dolgu duvarların tamamı aynı ölçüde olacaktır. Ancak y- yönündeki açıklıklar birbirleriyle eşit olmadığından farklı bir duvar tasarımına ihtiyaç duyulmaktadır. 5100 x 2400 mm ölçüleri için Duvar 1, 2200 x 2400 mm ölçüler için Duvar 2 hem boşluklu fabrika tuğlası için hem de gazbeton blok için ayrı hesaplanmıştır. Değerler yerine yazıldığından elde edilen sonuçlar Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Basınç çubuğu genişliğinin bulunması

	Boşluklu Fabrika Tuğlası		Gazbeton Blok	
	Duvar 1 (x- yönü)	Duvar 2 (y- yönü)	Duvar 1 (x- yönü)	Duvar 2 (y- yönü)
h_k	3000 mm	3000 mm	3000 mm	3000 mm
h_d	2400 mm	2400 mm	2400 mm	2400 mm
I_k	$1,08 \times 10^{10} \text{ mm}^4$	$1,08 \times 10^{10} \text{ mm}^4$	$1,08 \times 10^{10} \text{ mm}^4$	$1,08 \times 10^{10} \text{ mm}^4$
E_c	32000 MPa	32000 MPa	32000 MPa	32000 MPa
E_d	2000 MPa	2000 MPa	1000 MPa	1000 MPa
t_d	135 mm	135 mm	135 mm	135 mm
θ	28°	47,5°	28°	47,5°
r_d	5100 mm	3256 mm	5100 mm	3256 mm
λ_d	0,000510	0,000533	0,000430	0,000450
a_d	753 mm	472 mm	806 mm	505 mm

2.3. Yapısal analiz

Çalışmada incelenen yapının analizleri SAP2000 programında yapılmıştır (Şekil 2). Yapıdaki kolonlar, kirişler ve döşemelerin malzeme kalitesi beton için C30 ve çelik donatı için S420 olarak belirlenmiştir. Ölü, hareketli ve kar yükleri döşemelere tanımlanan alanlar üzerine alansal yük olarak atanmıştır. Hareketli yük kütle katılım katsayısı TBDY-2018'e göre (0,3) dikkate alınmıştır. Rüzgâr ve deprem yükleri ilgili yönetmelik ve standartlarda belirtilen değerlerin program içerisine girilmiştir. Yapının konut olarak kullanılacağı varsayılarak TBDY-2018 Tablo 3.1'de belirtilen bilgilere istinaden bina önem katsayısı, $I=1.0$ ve bina kullanım sınıfı, BKS=3 olarak tanımlanmıştır. Tasarım koşulu TS 500-2000 (R2018) seçilmiştir. Yapıda deprem etkileri tamamen moment aktaran süneklik düzeyi yüksek betonarme çerçeveler tarafından karşılanmaktadır. Bundan dolayı TBDY-2018 Tablo 4.1 A11'e göre taşıyıcı sistem davranış katsayısı $R=8$ ve dayanım fazlalığı katsayısı $D=3$ olarak belirlenmiştir (BYS ≥ 3). TBDY-2018 Tablo 3.2'ye göre deprem tasarım sınıfı, DTS=1 olarak tanımlanmıştır. TBDY-2018 Tablo 3.3'e göre DTS=1 ve $H_N=30$ için bina yükseklik sınıfı, BYS=4'tür. İncelenen yapının bina performans hedefi TBDY-2018 Tablo 3.4(a)'ya göre BYS ≥ 2 , DD-2 ve DTS=1 için normal performans hedefi Kontrollü Hasar (KH) olarak belirlenmiştir.

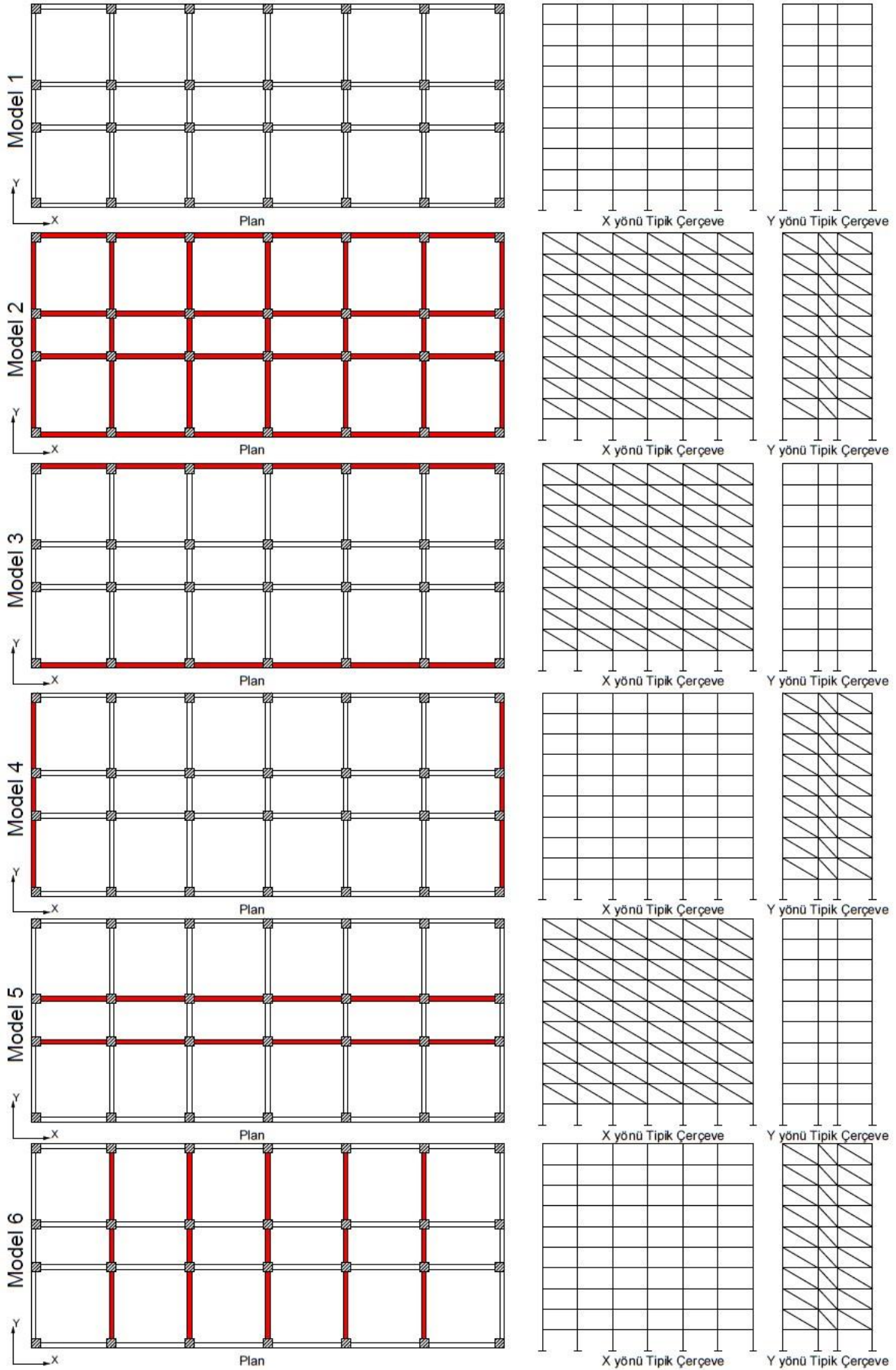


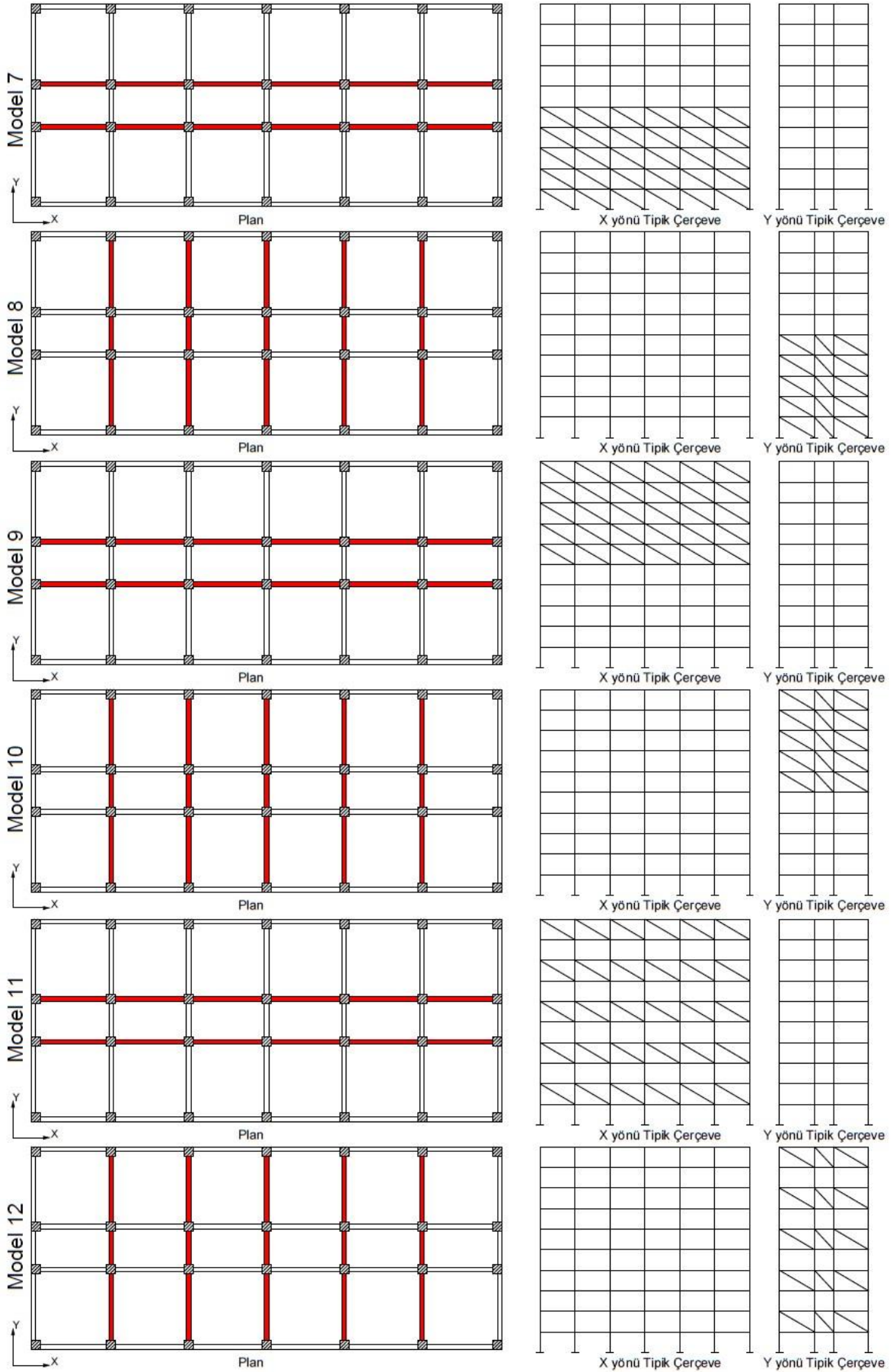
Şekil 2. Model Görünüşleri

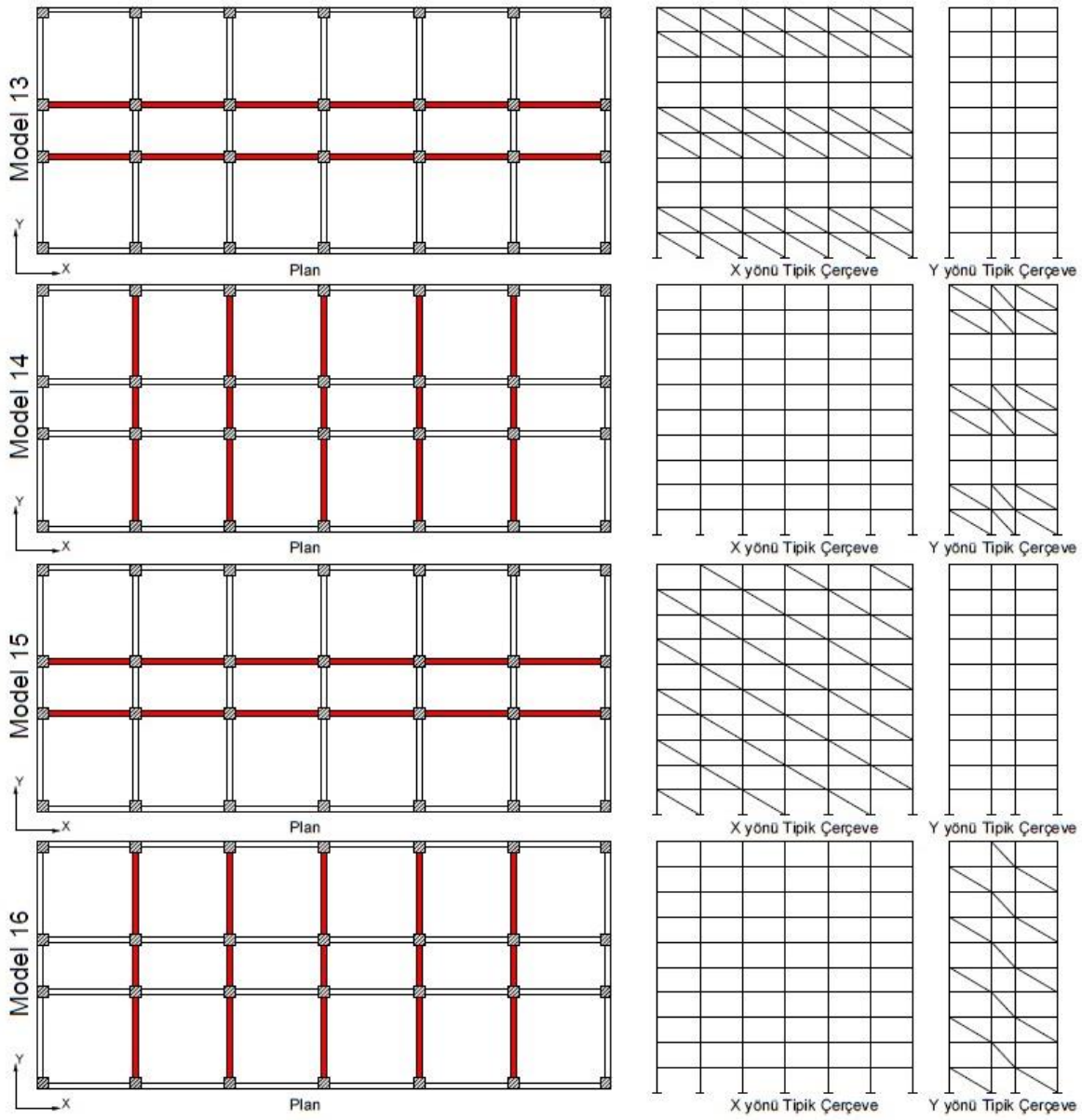
Çalışmada toplam 16 model incelenmiştir. İncelenen modellerin dolgu duvar düzenleri Tablo 5'te, kesit ve planları Şekil 3'te verilmiştir.

Tablo 5. Çalışmada incelenen modellerin dolgu duvar düzenleri

Model Adı	Dolgu Duvar Düzeni
Model 1	Dolgu duvarsız betonarme çerçevesi sistem
Model 2	Her iki yönde de dolgu duvarlı sistem
Model 3	Sadece x- yönündeki dış aksları dolgu duvarlı sistem
Model 4	Sadece y- yönündeki dış aksları dolgu duvarlı sistem
Model 5	Sadece x- yönündeki iç aksları dolgu duvarlı sistem
Model 6	Sadece y- yönündeki iç aksları dolgu duvarlı sistem
Model 7	Sadece x- yönündeki ilk 5 kat kattaki iç aksları dolgu duvarlı sistem
Model 8	Sadece y- yönündeki ilk 5 kattaki iç aksları dolgu duvarlı sistem
Model 9	Sadece x- yönündeki son 5 kattaki iç aksları dolgu duvarlı sistem
Model 10	Sadece y- yönündeki son 5 kattaki iç aksları dolgu duvarlı sistem
Model 11	x- yönünde bir kat boş bir kat dolu olmak üzere sadece iç aksları dolgu duvarlı sistem
Model 12	y- yönündeki bir kat boş bir kat dolu olmak üzere sadece iç aksları dolgu duvarlı sistem
Model 13	x- yönünde iki kat dolu iki kat boş olmak üzere sadece iç aksları dolgu duvarlı sistem
Model 14	y- yönünde iki kat dolu iki kat boş olmak üzere sadece iç aksları dolgu duvarlı sistem
Model 15	x- yönünde ve her katta dama taşı olmak üzere sadece iç aksları dolgu duvarlı sistem
Model 16	y- yönünde ve her katta dama taşı olmak üzere sadece iç aksları dolgu duvarlı sistem







Şekil 3. İncelenen Yapı Modelleri

Yapısal analizler sonucunda TBDY-2018 ve TS 500 yönetmelik ve standartlarına uygun şekilde kolonlar, kirişler ve döşemeler için minimum kesitler belirlenmiştir. Kesitler, yük analizleri ve yük kombinasyonları bölümünde açıklanan kombinasyonlardan en gayri müsait kombinasyona göre belirlenmiştir. Kesitler belirlenirken, her katta ve modellerde tüm kolonların, kirişlerin ve döşemelerin aynı ölçülerde olmasına dikkat edilmiştir. Yapıda kullanılan kesitler Tablo 6'da özetlenmiştir.

Tablo 6. Yapıda Kullanılan Kesitler

Kat	h (cm)	Kolon Kesiti (cm)	Kiriş Kesiti (cm)	Döşeme Yüksekliği (cm)
1	300	60x60	30x60	15
2	300	60x60	30x60	15
3	300	60x60	30x60	15
4	300	60x60	30x60	15
5	300	60x60	30x60	15
6	300	60x60	30x60	15
7	300	60x60	30x60	15
8	300	60x60	30x60	15
9	300	60x60	30x60	15
10	300	60x60	30x60	15

TBDY-2018'e göre etkin görelî kat ötelemeleri kontrol edilmiş ve belirtilen sınırlar içerisinde kalmıştır. TBDY-2018 Bölüm 4.9.1'e göre azaltılmış görelî kat ötelemeleri ve etkin görelî kat ötelemeleri her iki eksen için hesaplanmıştır. Hesaplanan etkin görelî kat ötelemeleri, λ , katsayısı ile çarpılarak kontrol edilmiştir. λ katsayısı DD-3 için hesaplanan elastik tasarım spektral ivmesinin DD-2 için hesaplanan elastik tasarım spektral ivmesine oranıdır. λ katsayısı her iki yön için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler TBDY-2018 Denklem 4.34b'ye göre kontrol edilmiştir. TBDY-2018 Denklem 4.34b Denklem 4'te verilmiştir.

$$\lambda \frac{\delta_i^{(x)}}{h_i} \leq 0,008\kappa \quad (4)$$

κ katsayısı TBDY-2018'de betonarme binalar için 1,0 olarak belirtilmiştir. Etkin görelî kat ötelemelerinin kontrolü x- ve y- yönü için boşluklu fabrika tuğlası ve gazbeton blok için sırasıyla Tablo 7, Tablo 8, Tablo 9 ve Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 7. Etkin Görelî Kat Ötelemelerinin Kontrolü (x- yönü) (Boşluklu Fabrika Tuğlası)

Kat	$\lambda \frac{\delta_i^{(x)}}{h_i}$								
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 5	Model 7	Model 9	Model 11	Model 13	Model 15
1	0,0046	0,0027	0,0034	0,0033	0,0027	0,0047	0,0038	0,0027	0,0033
2	0,0061	0,0032	0,0042	0,0041	0,0031	0,0062	0,0039	0,0037	0,0042
3	0,0063	0,0032	0,0042	0,0042	0,0031	0,0064	0,0047	0,0053	0,0041
4	0,0061	0,0031	0,0041	0,0040	0,0031	0,0061	0,0038	0,0051	0,0041
5	0,0057	0,0029	0,0038	0,0038	0,0032	0,0051	0,0042	0,0034	0,0037
6	0,0052	0,0027	0,0035	0,0034	0,0043	0,0032	0,0033	0,0030	0,0035
7	0,0046	0,0024	0,0031	0,0031	0,0043	0,0025	0,0034	0,0037	0,0030
8	0,0038	0,0021	0,0026	0,0026	0,0037	0,0021	0,0025	0,0033	0,0026
9	0,0030	0,0017	0,0021	0,0021	0,0030	0,0017	0,0023	0,0020	0,0021
10	0,0022	0,0013	0,0016	0,0016	0,0021	0,0013	0,0015	0,0013	0,0016

Tablo 8. Etkin Göreli Kat Ötelemelerinin Kontrolü (y- yönü) (Boşluklu Fabrika Tuğlası)

Kat	$\lambda \frac{\delta_i^{(x)}}{h_i}$								
	Model 1	Model 2	Model 4	Model 6	Model 8	Model 10	Model 12	Model 14	Model 16
1	0,0062	0,0049	0,0057	0,0051	0,0048	0,0059	0,0058	0,0048	0,0052
2	0,0075	0,0054	0,0067	0,0057	0,0052	0,0071	0,0059	0,0057	0,0063
3	0,0077	0,0055	0,0068	0,0058	0,0053	0,0073	0,0066	0,0070	0,0060
4	0,0075	0,0054	0,0066	0,0057	0,0052	0,0071	0,0059	0,0069	0,0062
5	0,0072	0,0052	0,0064	0,0055	0,0053	0,0064	0,0062	0,0055	0,0057
6	0,0067	0,0050	0,0060	0,0052	0,0061	0,0049	0,0054	0,0051	0,0057
7	0,0062	0,0047	0,0055	0,0048	0,0060	0,0043	0,0054	0,0056	0,0050
8	0,0055	0,0043	0,0050	0,0044	0,0054	0,0039	0,0045	0,0051	0,0047
9	0,0047	0,0039	0,0044	0,0039	0,0047	0,0036	0,0042	0,0040	0,0040
10	0,0039	0,0034	0,0037	0,0034	0,0039	0,0032	0,0034	0,0033	0,0036

Tablo 9. Etkin Göreli Kat Ötelemelerinin Kontrolü (x- yönü) (Gazbeton Blok)

Kat	$\lambda \frac{\delta_i^{(x)}}{h_i}$								
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 5	Model 7	Model 9	Model 11	Model 13	Model 15
1	0,0046	0,0033	0,0039	0,0038	0,0033	0,0047	0,0041	0,0034	0,0038
2	0,0062	0,0041	0,0049	0,0049	0,0040	0,0062	0,0048	0,0045	0,0049
3	0,0064	0,0041	0,0050	0,0049	0,0041	0,0064	0,0053	0,0056	0,0049
4	0,0062	0,0039	0,0048	0,0048	0,0040	0,0062	0,0047	0,0054	0,0048
5	0,0058	0,0037	0,0045	0,0045	0,0040	0,0058	0,0048	0,0042	0,0045
6	0,0053	0,0034	0,0041	0,0041	0,0046	0,0051	0,0040	0,0037	0,0041
7	0,0046	0,0030	0,0036	0,0036	0,0044	0,0044	0,0039	0,0040	0,0036
8	0,0039	0,0026	0,0031	0,0031	0,0038	0,0037	0,0030	0,0035	0,0031
9	0,0031	0,0021	0,0025	0,0024	0,0030	0,0029	0,0026	0,0023	0,0024
10	0,0022	0,0016	0,0018	0,0018	0,0022	0,0021	0,0018	0,0016	0,0018

Tablo 10. Etkin Göreli Kat Ötelemelerinin Kontrolü (y- yönü) (Gazbeton Blok)

Kat	$\lambda \frac{\delta_i^{(x)}}{h_i}$								
	Model 1	Model 2	Model 4	Model 6	Model 8	Model 10	Model 12	Model 14	Model 16
1	0,0062	0,0053	0,0059	0,0055	0,0053	0,0063	0,0059	0,0053	0,0056
2	0,0075	0,0060	0,0070	0,0063	0,0060	0,0075	0,0064	0,0063	0,0067
3	0,0077	0,0061	0,0071	0,0064	0,0061	0,0077	0,0070	0,0072	0,0066
4	0,0075	0,0060	0,0070	0,0063	0,0060	0,0074	0,0064	0,0071	0,0067
5	0,0072	0,0057	0,0067	0,0060	0,0060	0,0069	0,0065	0,0061	0,0062
6	0,0067	0,0054	0,0063	0,0057	0,0063	0,0057	0,0058	0,0057	0,0061
7	0,0062	0,0051	0,0058	0,0053	0,0061	0,0051	0,0057	0,0058	0,0054
8	0,0055	0,0046	0,0052	0,0048	0,0055	0,0046	0,0049	0,0052	0,0050
9	0,0047	0,0041	0,0045	0,0042	0,0047	0,0040	0,0044	0,0042	0,0043
10	0,0039	0,0035	0,0038	0,0036	0,0039	0,0035	0,0036	0,0035	0,0037

Bu çalışmada incelenen modeller TBDY-2018'de doğrusal olmayan analiz yöntemlerinden statik itme analizine tabi tutularak yapının performans hedefinin tespiti yapılmıştır. Betonarme kolon ve kiriş kesitlerinin her iki uç kısmına plastik mafsallı tanımlaması yapılmıştır. Analizde ikinci mertebe etkileri ve hareketli yük katılım katsayısı dikkate alınmıştır. Ötelenme kontrollü analizde çoklu durum incelenmiştir. Statik itme analizinden taban kesme kuvveti ve tepe noktası yer değiştirme değerleri alınmıştır. TBDY-2018 Tablo 3.4. (a)'ya göre yapının DD-2 için normal performans hedefi kontrollü hasar (KH) olarak belirtilmiştir. Statik itme analizine göre tüm modeller her iki eksen de KH performans hedefini sağlamıştır.

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Yapısal analiz sonuçlarına göre boşluklu fabrika tuğlası kullanılan yapılar duvarsız yapı (model 1) ile tepe noktasında oluşan yatay ötelenmeler bakımından her iki yönde de karşılaştırıldığında; model 2'de tepe noktasında oluşan x- eksenindeki yatay ötelenme %47 azalırken y- ekseninde %25 azalmıştır. Model 3'te x- ekseninde %31, model 4'te y- ekseninde %8 azalma meydana gelmiştir. Model 5'te x- ekseninde %33 ve model 6'da y- ekseninde %20 azalma görülmüştür. Model 7 için x- ekseninde %31 azalma meydana gelirken, model 8 için y- ekseninde %16 oranında azalma meydana gelmiştir. Model 9'da %18 oranında azalma görülürken model 10'da %14 azalma görülmüştür. Model 11 ve model 12'de oluşan azalma oranları sırasıyla %29 ve %14'tür. Model 13'te x- eksenindeki yatay ötelenme %29 ve model 14'te y- eksenindeki yatay ötelenme %14 azalmıştır. Son olarak model 15'te tepe noktasında oluşan x- eksenindeki yatay ötelenme oranı %33 azalırken; model 16'da tepe noktasında oluşan y- eksenindeki yatay ötelenme, model 1'de tepe noktasında oluşan yatay ötelenme ile kıyaslandığında %16 oranında azaldığı görülmüştür. Boşluklu fabrika tuğlası kullanılan modellerde katlarda oluşan yatay ötelenmeler her iki eksen için sırasıyla Tablo 11 ve Tablo 12'de verilmiştir.

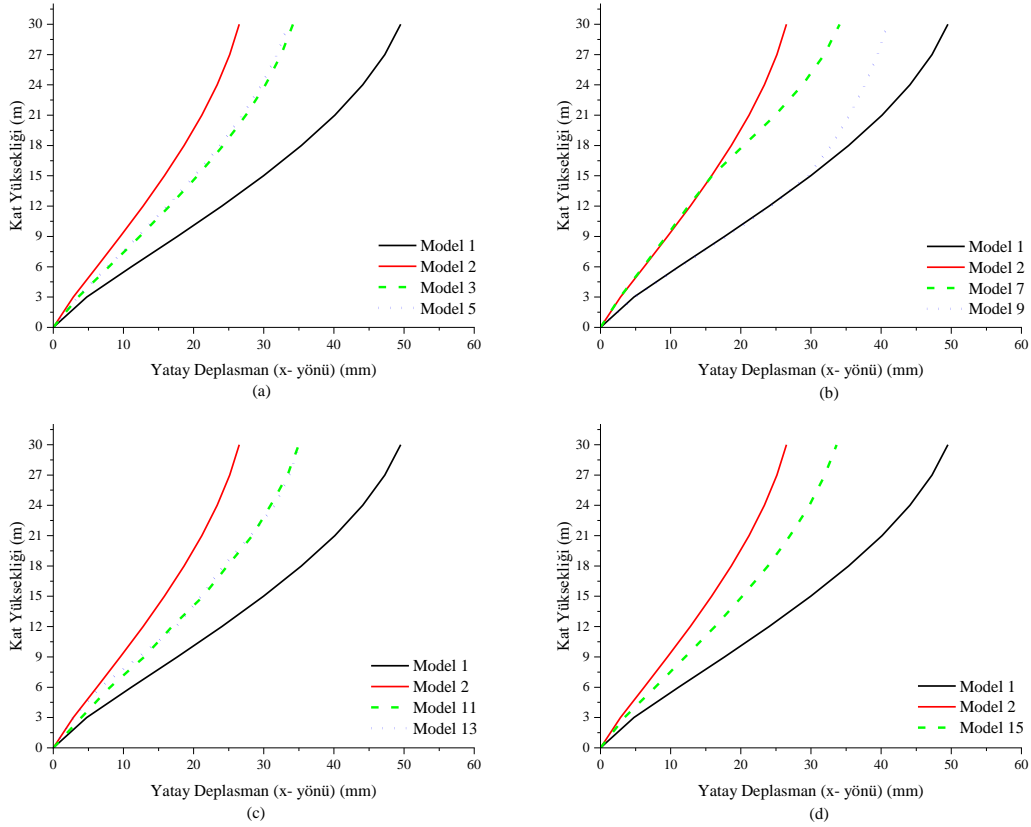
Tablo 11. Kat Ötelemeleri (m) (x- yönü)

Kat	Boşluklu Fabrika Tuğlası kullanılan modeller								
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 5	Model 7	Model 9	Model 11	Model 13	Model 15
1	0,005	0,003	0,004	0,003	0,003	0,005	0,004	0,003	0,003
2	0,011	0,006	0,008	0,008	0,006	0,011	0,008	0,007	0,008
3	0,018	0,010	0,012	0,012	0,009	0,018	0,013	0,012	0,012
4	0,024	0,013	0,017	0,016	0,013	0,024	0,017	0,018	0,016
5	0,030	0,016	0,021	0,020	0,016	0,030	0,021	0,021	0,020
6	0,035	0,019	0,024	0,024	0,020	0,033	0,025	0,024	0,024
7	0,040	0,021	0,027	0,027	0,025	0,035	0,028	0,028	0,027
8	0,044	0,023	0,030	0,030	0,029	0,038	0,031	0,032	0,030
9	0,047	0,025	0,032	0,032	0,032	0,039	0,033	0,034	0,032
10	0,050	0,027	0,034	0,034	0,034	0,041	0,035	0,035	0,034

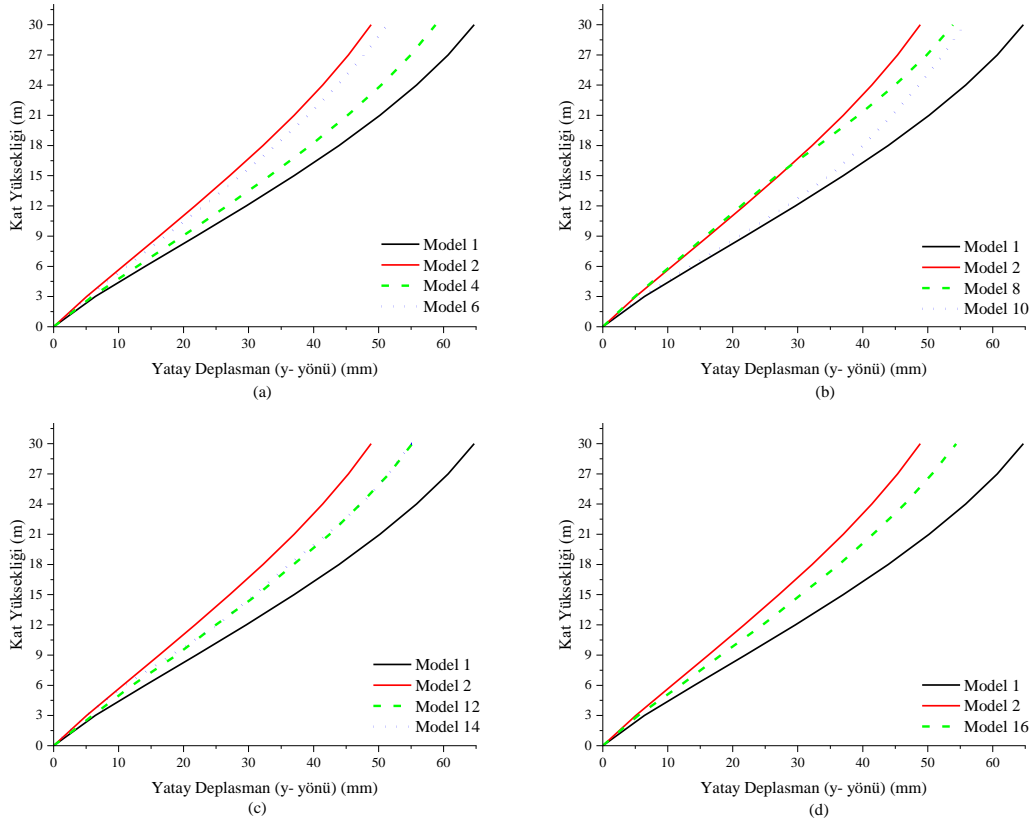
Tablo 12. Kat Ötelemeleri (m) (y- yönü)

Kat	Boşluklu Fabrika Tuğlası kullanılan modeller								
	Model 1	Model 2	Model 4	Model 6	Model 8	Model 10	Model 12	Model 14	Model 16
1	0,006	0,005	0,006	0,005	0,005	0,006	0,006	0,005	0,005
2	0,014	0,011	0,013	0,011	0,010	0,013	0,012	0,011	0,012
3	0,022	0,016	0,020	0,017	0,016	0,021	0,019	0,018	0,018
4	0,030	0,022	0,027	0,023	0,021	0,028	0,025	0,025	0,025
5	0,037	0,027	0,033	0,029	0,027	0,035	0,031	0,031	0,031
6	0,044	0,032	0,039	0,034	0,033	0,040	0,037	0,036	0,036
7	0,050	0,037	0,045	0,039	0,039	0,045	0,043	0,042	0,042
8	0,056	0,041	0,050	0,044	0,045	0,049	0,047	0,047	0,046
9	0,061	0,045	0,055	0,048	0,050	0,052	0,052	0,052	0,051
10	0,065	0,049	0,059	0,051	0,054	0,056	0,055	0,055	0,054

Tabloda verilen değerler grafiksel olarak incelendiğinde, model 1'in her kat için ve tepe noktası için x- ve y- yönünde daha fazla yatay ötelenme yaptığı görülürken, model 2'nin ise en az ötelenme yapan model olduğu görülmüştür. Diğer dolgu düzenlerindeki verilerin her zaman bu iki model arasında kaldığı görülmüştür. Model 3 ve model 5'in birbirleriyle benzer davranış gösterdiği görülürken model 4 ve model 6'nın birbirlerinden farklı davranış gösterdiği görülmüştür. Buna istinaden incelenen yapı için dolgu duvarların x- yönü için iç ya da dış akslarda olmasının yatay ötelenmeye etkisi olmadığını ancak y- yönü için gözle görülür etkisi olduğu gözlenmiştir. Model 7 ve model 8 incelendiğinde ilk beş katında model 2 ile benzer özellik gösterirken son beş katında model 1'e benzer davranış göstermiştir. Ancak tepe noktası ötelenmeleri değerlendirildiğinde model 7 ve model 8'in model 1'e göre daha az ötelenme yaptığı görülmüştür. Benzer şekilde, model 9 ve model 10 incelendiğinde ilk beş katında model 1'e benzer davranış gösterdiği ve son 5 katında model 2'ye benzer davranış gösterdiği görülmüştür. Ancak tepe noktası ötelenmeleri kıyaslandığında model 9 ve model 10'un model 1'e göre daha az ötelenme yaptığı ve model 2'ye göre daha fazla ötelenme yaptığı görülmüştür. x- yönünde model 11 ve model 13'ün, y- yönünde model 12 ve model 14'ün birbirine benzer davranış gösterdiği görülmüştür. Model 15 ve model 16'nın yaptığı yatay ötelenmeler grafiksel olarak incelendiğinde model 1 ile model 2 arasında kaldığı gözlenmiştir. Boşluklu fabrika tuğlası kullanılarak oluşturulan modellerin grafiksel verileri x- ve y- yönü için sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4. Boşluklu Fabrika Tuğlası Kullanılan Modeller (x- yönü)



Şekil 5. Boşluklu Fabrika Tuğlası Kullanılan Modeller (y- yönü)

Yapısal analiz sonuçlarına göre gazbeton blok kullanılan yapılar duvarsız yapı (model 1) ile tepe noktasında oluşan yatay ötelenmeler bakımından her iki yönde de karşılaştırıldığında; model 2’de tepe noktasında oluşan x- eksenindeki yatay ötelenme %35 azalırken y- ekseninde %18 azalmıştır. Model 3’te x- ekseninde %20, model 4’te y- ekseninde %6 azalma meydana gelmiştir. Model 5’te x- ekseninde %22 ve model 6’da y- ekseninde %14 azalma görülmüştür. Model 7 için x- ekseninde %22 azalma meydana gelirken, model 8 için y- ekseninde %12 oranında azalma meydana gelmiştir. Model 9’da %1 oranında azalma görülürken model 10’da %7 azalma görülmüştür. Model 11 ve model 12’de oluşan azalma oranları sırasıyla %19 ve %10’dur. Model 13’te x- eksenindeki yatay ötelenme %21 ve model 14’te y- eksenindeki yatay ötelenme %11 azalmıştır. Son olarak model 15’te tepe noktasında oluşan x- eksenindeki yatay ötelenme oranı %21 azalırken; model 16’da tepe noktasında oluşan y- eksenindeki yatay ötelenme, model 1’de tepe noktasında oluşan yatay ötelenme ile kıyaslandığında %11 oranında azaldığı görülmüştür. Gazbeton kullanılan modellerde katlarda oluşan yatay ötelenmeler her iki eksen için sırasıyla Tablo 13 ve Tablo 14’te verilmiştir.

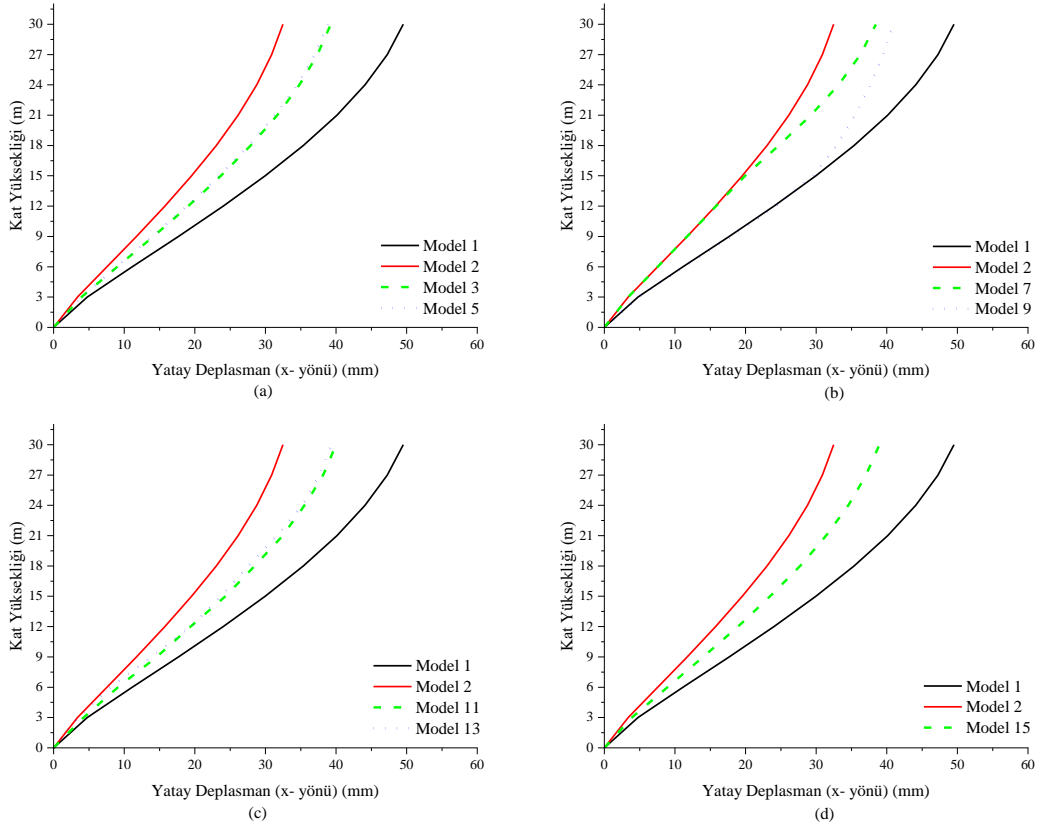
Tablo 13. Kat Ötelemeleri (m) (x- yönü)

Kat	Gazbeton kullanılan modeller								
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 5	Model 7	Model 9	Model 11	Model 13	Model 15
1	0,005	0,003	0,004	0,004	0,003	0,005	0,004	0,003	0,004
2	0,011	0,008	0,009	0,009	0,008	0,011	0,009	0,008	0,009
3	0,018	0,012	0,014	0,014	0,012	0,018	0,015	0,014	0,014
4	0,024	0,016	0,019	0,019	0,016	0,024	0,019	0,019	0,019
5	0,030	0,020	0,024	0,023	0,020	0,030	0,024	0,024	0,024
6	0,035	0,023	0,028	0,028	0,025	0,035	0,028	0,028	0,028
7	0,040	0,026	0,032	0,031	0,029	0,040	0,032	0,032	0,031
8	0,044	0,029	0,035	0,034	0,033	0,044	0,036	0,035	0,035
9	0,047	0,031	0,037	0,037	0,036	0,047	0,038	0,038	0,037
10	0,050	0,032	0,039	0,039	0,038	0,049	0,040	0,039	0,039

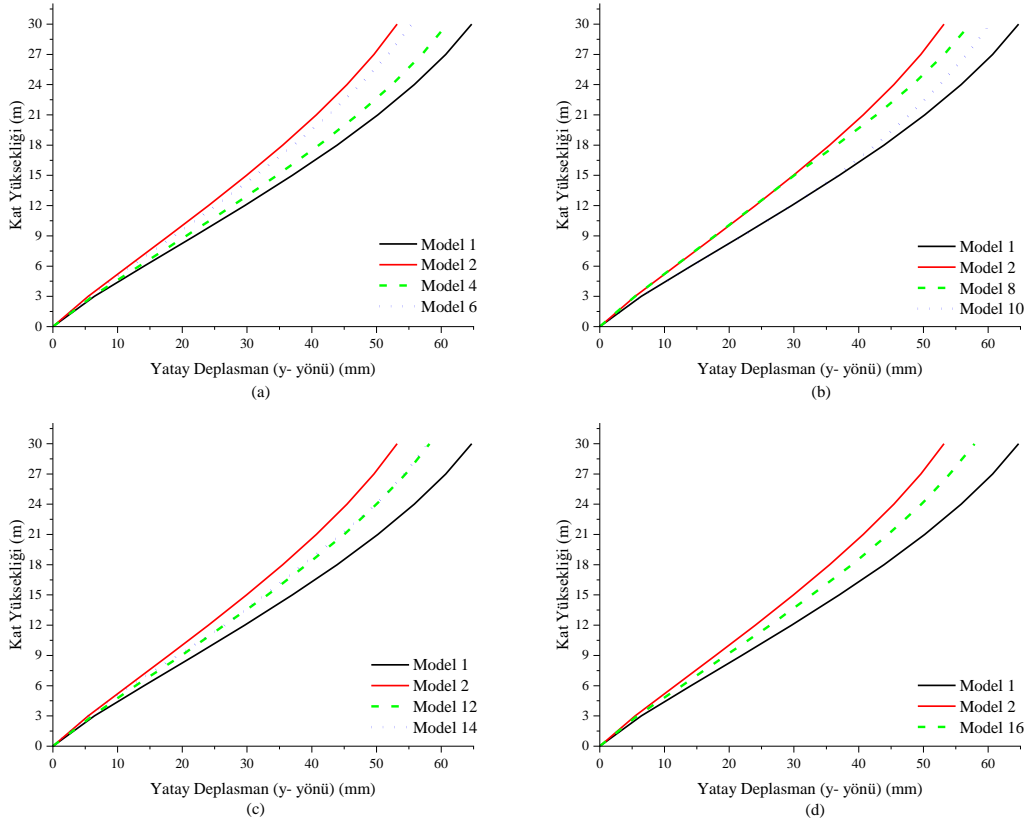
Tablo 14. Kat Ötelemeleri (m) (y- yönü)

Kat	Gazbeton kullanılan modeller								
	Model 1	Model 2	Model 4	Model 6	Model 8	Model 10	Model 12	Model 14	Model 16
1	0,006	0,005	0,006	0,006	0,005	0,006	0,006	0,005	0,006
2	0,014	0,012	0,013	0,012	0,012	0,014	0,013	0,012	0,013
3	0,022	0,018	0,021	0,019	0,018	0,022	0,020	0,019	0,019
4	0,030	0,024	0,028	0,025	0,024	0,030	0,026	0,027	0,026
5	0,037	0,030	0,035	0,031	0,030	0,037	0,033	0,033	0,033
6	0,044	0,036	0,041	0,037	0,037	0,043	0,039	0,039	0,039
7	0,050	0,041	0,047	0,043	0,043	0,048	0,045	0,045	0,045
8	0,056	0,045	0,052	0,048	0,048	0,053	0,050	0,050	0,050
9	0,061	0,050	0,057	0,052	0,053	0,057	0,055	0,054	0,054
10	0,065	0,053	0,061	0,055	0,057	0,060	0,058	0,058	0,058

Tabloda verilen değerler grafiksel olarak incelendiğinde, model 1'in her kat için ve tepe noktası için x- ve y- yönünde daha fazla yatay ötelenme yaptığı görülürken, model 2'nin ise en az ötelenme yapan model olduğu görülmüştür. Diğer dolgu düzenlerinin verilerinin her zaman bu iki model arasında kaldığı görülmüştür. Model 3 ve model 5'in birbirleriyle benzer davranış gösterdiği görülürken model 4 ve model 6'nın birbirlerinden farklı davranış gösterdiği görülmüştür. Boşluklu fabrika tuğlası kullanılan modellerde de görüldüğü üzere incelenen yapı için dolgu duvarların x- yönü için iç ya da dış akslarda olmasının yatay ötelenmeye etkisi olmadığını ancak y- yönü için gözle görülür etkisi olduğu gözlenmiştir. Model 7 ve model 8 incelendiğinde ilk beş katında model 2 ile benzer özellik gösterirken son beş katında model 1'e benzer davranış göstermiştir. Ancak tepe noktası ötelemeleri değerlendirildiğinde model 7 ve model 8'in model 1'e göre daha az ötelenme yaptığı görülmüştür. Benzer şekilde, model 9 ve model 10 incelendiğinde ilk beş katında model 1'e benzer davranış gösterdiği ve son 5 katında model 2'ye benzer davranış gösterdiği görülmüştür. Ancak tepe noktası ötelemeleri kıyaslandığında model 9 ve model 10'un model 1'e göre daha az ötelenme yaptığı ve model 2'ye göre daha fazla ötelenme yaptığı görülmüştür. x- yönünde model 11 ve model 13'ün, y- yönünde model 12 ve model 14'ün birbirine benzer davranış gösterdiği görülmüştür. Model 15 ve model 16'nın yaptığı yatay ötelemeler grafiksel olarak incelendiğinde model 1 ile model 2 arasında kaldığı gözlenmiştir. Gazbeton blok kullanılarak oluşturulan modellerin grafiksel verileri x- yönü için Şekil 6'da ve y- yönü için Şekil 7'de verilmiştir.

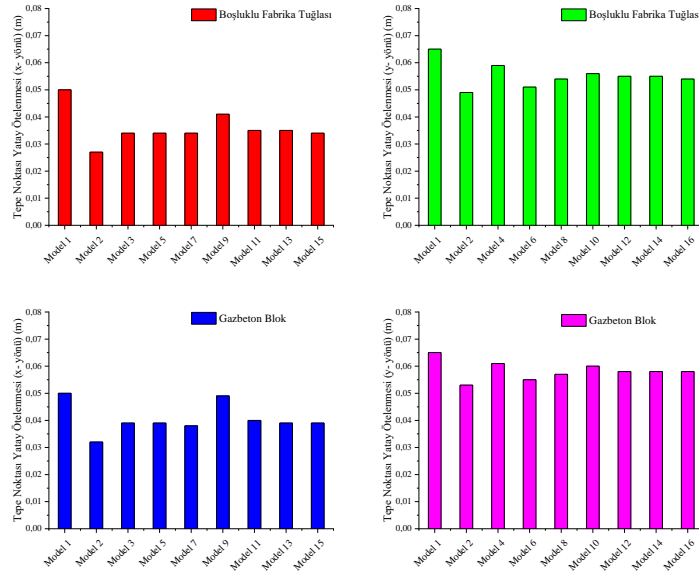


Şekil 6. Gazbeton Blok Kullanılan Modeller (x- yönü)



Şekil 7. Gazbeton Blok Kullanılan Modeller (y- yönü)

Dolgu duvar malzeme tipinin betonarme çerçevesel yapının kat ötelenmesine etkisi Şekil 8’de incelenmiştir. Boşluklu fabrika tuğlasının kullanıldığı modeller, gazbeton blok kullanılarak oluşturulan modellere göre hem x- hem de y- doğrultusunda daha az tepe noktası yatay ötelenmesine sahiptir. Bu durumda, dolgu duvar malzemesi olarak boşluklu fabrika tuğlasının incelenen yapı için kullanılması önerilebilir.



Şekil 8. Malzeme Tipine Göre Modellerin Tepe Noktası Yatay Ötelenmesi

4. Sonuç

Bu çalışmada, boşluklu fabrika tuğlası ve gazbeton blok olmak üzere iki farklı dolgu duvar malzemesinin farklı yerleşim modellerinde betonarme çerçevesel bir yapıdaki yapısal davranışına etkisi araştırılmıştır. Yapılan tüm analizler duvarsız (Model 1) yapı referans alınarak karşılaştırılmıştır. Tüm analizler ve karşılaştırmalar x- ve y- yönleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda;

- Farklı dolgu duvar malzemesinin (boşluklu fabrika tuğlası ve gazbeton blok) yapının tepe noktası yatay ötelenmesinde kayda değer miktarda etkisi olduğu görülmüştür.
- Dolgu duvar malzemeleri birbiriyle kıyaslandığında boşluklu fabrika tuğlası kullanılarak oluşturulan modellerin, gazbeton blok kullanılarak oluşturulan modellere göre her katta ve tepe noktasında daha az yatay ötelenme yaptığı görülmüştür.
- Tüm yerleşim modelleri, dolgunsuz betonarme çerçevesel yapı ile oluşturulan modelle kıyaslandığında, dolgu duvarların yapıda oluşan yatay ötelenmeleri hem x- hem de y- yönünde önemli oranda azalttığı görülmüştür.
- Boşluklu fabrika tuğlası ve gazbeton blok kullanılarak oluşturulan yapı modelleri ile model 1 kıyaslandığında hem boşluklu fabrika tuğlası hem de gazbeton blok için ötelenmeler en fazla model 2'de azalmıştır. Boşluklu fabrika tuğlalı yapıda yatay ötelenmeler x- yönünde %47, y- yönünde %25 azalırken, gazbeton blok dolgu yapıda yatay ötelenmeler x- yönünde %35, y- yönünde %18 azalmıştır. Bundan dolayı en verimli sonuç model 2'den alınmıştır.
- Yapı modelinde x- ekseninde 6, y- ekseninde 3 açıklık vardır. Bundan dolayı dolgu duvar yerleşiminin y- eksenindeki etkisi, x- eksenine göre daha fazla olduğu gözlenmiştir.
- Betonarme çerçevesel yapılarda dolgu duvarlar yapının rijitliğini artırırken; periyodu ve kat ötelenmesini önemli ölçüde azalttığı gözlenmiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre dolgu duvarların yerleşiminin ve dolgu duvar malzemesinin yapının yatay yük taşıma kapasitesine ve yatay ötelenmelerine etkisinin önemli miktarda fazla olduğu görülmüştür.

Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda ve projelerde

- Dolgu duvarların yapı davranışına etkisinin özellikle yüksek binalarda göz önüne alınması
- Dolgu duvarların bulunduğu üzere çekme dayanımının olmaması ve kesme kuvvetleri altındaki gevrek davranışı, bu duvarların özel modelleme teknikleriyle hesaplara dahil edilmesi
- Dolgu duvarların simetrik olarak uygulanmaması durumunda oluşacak burulma momentine dikkat edilmesi
- Dolgu duvarların en az betonarme taşıyıcı sistemler kadar yatay yük alabildiği, kat ötelenmelerini ve kesme kuvveti değişiminde etkili olduğu bilinmektedir. Bundan dolayı sonraki çalışmalarda, dolgu duvarların taban kesme kuvvetine olan etkisinin araştırılması
- Ayrıca çalışmanın deneysel olarak araştırılarak analitik bulguları desteklemesi yazarlar tarafından önerilmektedir.

Referanslar

- Aksoylu, C., ve Kara, N. (2020). Strengthening of RC frames by using high strength diagonal precast panels. *Journal of Building Engineering*, 31, 101338.
- Alhalil, İ. ve Güllü, M. F. (2021). Investigating the Effect of Masonry Infill Walls on the 2D RC Structural Systems with Asymmetry along the Elevation. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(3), 1019-1039.
- Aykaç, B., Özbek, E., Babayani, R., Baran, M. ve Aykaç, S. (2017). Seismic Strengthening of Infill Walls with Perforated Steel Plates. *Engineering Structures*, 152, 168-179.
- Baran, M. (2012). Dolgu Duvarların Betonarme Çerçevesel Yapıların Davranışı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27(2), 275-284.
- Bayrak, O. F. ve Bıkçe, M. (2019). Dolgu Duvarların Yapısal Düzensizliklere ve Performansa Etkisinin Mevcut Bir Yapı Üzerinde İncelenmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 241-254.

- Çavdar, Ö., Köse, G. ve Sunca, F. (2020). Betonarme Binaların Deprem Performanslarına Dolgu Duvarların Etkisinin İncelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(1), 465–484. doi:10.17482/uumfd.658027
- Crisafulli, F. J., Carr, A. J. ve Park, R. (2000). Analytical modelling of infilled frame structures - A general review. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 33(1), 30–47. doi:10.5459/bnzsee.33.1.30-47
- Demirel, İ. O., Yakut, A., Binici, B. ve Canbay, E. (2015). Betonarme Çerçevelerde Dolgu Duvar Etkisinin İncelenmesi Üzerine Deneysel Çalışma. 3. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı* içinde . İzmir.
- Durmazgezer, E. (2013). *Dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin deprem etkileri altındaki davranışının incelenmesi*. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Guerrero, N., Martínez, M., Picón, R., Marante, M. E., Hild, F., Roux, S. ve Flórez-López, J. (2014). Experimental Analysis of Masonry Infilled Frames Using Digital Image Correlation. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 47(5), 873–884. doi:10.1617/s11527-013-0099-0
- Karabay, M. (1989). *Dolgu Duvarların Betonarme Çerçevelerin Davranışı ve Dayanımı Üzerindeki Etkileri*. Gazi Üniversitesi.
- Kaushik, H. B., Rai, D. C. ve Jain, S. K. (2008). A rational approach to analytical modeling of masonry infills in reinforced concrete frame buildings. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering* içinde . Beijing, China. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:A+RATIONAL+APPROACH+TO+ANALYTICAL+MODELING+OF+MASONRY+INFILLS+IN+REINFORCED+CONCRETE+FRAME+BUILDINGS#0%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:A+rational+approach+to+an> adresinden erişildi.
- Kızıloğlu, M. Y. (2006). *Deprem Etkisi Altında Dolgu Duvarların Betonarme Çerçeve Yapılar Üzerindeki Etkisi*. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Korkmaz, A. ve Uçar, T. (2006). Betonarme Binaların Deprem Davranışında Dolgu Duvar Etkisinin İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 101–108.
- Madan, A., Reinhorn, A. M., Mander, J. B. ve Valles, R. E. (1997). Modeling of Masonry Infill Panels for Structural Analysis. *Journal of Structural Engineering*, 123(October), 1295–1302.
- Öztürkoğlu, O., Uçar, T. ve Yeşilce, Y. (2015). Betonarme Yapılarda Dolgu Duvar-Çerçeve Etkileşiminin İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 17(5), 109–121.
- Papia, M., Cavaleri, L. ve Fossetti, M. (2003). Infilled frames: Developments in the evaluation of the stiffening effect of infills. *Structural Engineering and Mechanics*, 16(6), 675–693. doi:10.12989/sem.2003.16.6.675
- Sivri, M., Demir, F. ve Kuyucular, A. (2006). Dolgu Duvarlarının Çerçeve Yapının Deprem Davranışına ve Göçme Mekanizmasına Etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(1), 109–115.
- Sucuoğlu, H. (2013). Implications of masonry infill and partition damage in performance perception in residential buildings after a moderate earthquake. *Earthquake Spectra*, 29(2), 661–667. doi:10.1193/1.4000147
- TBDY-2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018 (2018). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.
- TDTH. (2021). Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması. *Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı*. 1 Eylül 2021 tarihinde <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml> adresinden erişildi.
- Tekin, M., Alsancak, E. ve Ay, M. (2007). Betonarme Çerçevelerde Dolgu Duvar Etkisinin İncelenmesi. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 95–104.
- TS498. Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri (1997). Türkiye.
- TS500. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (2000).
- Uysal, K. E. (2013). *Betonarme Binalarda Dolgu Duvarların Deprem Etkisi Altındaki Davranışının İncelenmesi*. Journal Tunas Bangsa. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Yakut, A., Binici, B., Demirel, İ. O. ve Özcebe, G. (2013). Dolgu Duvarların Deprem Davranışına Etkisi. 2. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı* içinde (ss. 1–10). Hatay.
- Yiğit, A., Erdil, B. ve Akkaya, İ. (2019). Dolgu Duvarların Betonarme Binaların Doğal Titreşim Periyotları Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. *3rd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management* içinde . Van, Turkey.



Yenilenebilir Enerji Çalışmalarında Bölge Seçimi Problemlerini Etkileyen Kriterlerin Önem Sıralarının Belirlenmesi

Determining the Importance Order of The Criteria Affecting the Problems of Regional Selection in Renewable Energy Studies

Emel Yontar¹

¹Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mersin, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 08/12/2021

Kabul / Accepted: 26/02/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıt tüketimine karşılık temiz ve sürdürülebilir enerji üretimi için önemli bir seçenektir. Bu kadar güçlü bir dönüşüme uyum sağlamak adına ülkelere ve hatta bölgelere, yenilenebilir enerji yatırımı yapmak çalışmanın çıkış noktasını oluşturmaktadır. Bölgelerin var olan etkenlere yönelik, doğru yenilenebilir enerji kaynağına karar vermesi evrensel bir problem haline gelmektedir. Bu noktadan hareketle bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarının doğru bölgelere yatırımının yapılması için önem verilmesi gereken kriterlerin belirlenmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada detaylı literatür taraması neticesinde elde edilen kriterler bir araya getirilerek ve uzman görüşleri yardımıyla 139 farklı yenilenebilir enerji kaynağı seçimini etkileyen kriterlere ulaşılmıştır. Yenilenebilir enerji alanında çalışan kişiler tarafından yapılan değerlendirme (Pareto Analizi) ile çok sayıda var olan bu kriterlerin en önemlileri belirlenerek; maliyet, çevre, teknik, sosyal, risk ana boyutları altında gruplandırılmış ve tanımları aktarılmıştır. Pareto Analizi sonucu elde edilen 45 alt kriterin ilişki analizi araştırılır ve DEMATEL yöntemi ile en çok etki düzeyine sahip kriter, enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği/öngörülebilirliği olurken; en az etki düzeyine sahip kriter, güvenlik kriteri bulunur. Elde edilen bulgular literatürde yenilenebilir enerji çalışmalarında yer seçimi, kaynak seçimi, yatırım bölgesi kararı problemlerine yönelik yol gösterici niteliktedir.

Anahtar Kelimeler

“Enerji, Yenilenebilir enerji kaynakları, DEMATEL, Enerji seçimi, Enerji kriterleri”

Abstract

Renewable energy sources are an important option for clean and sustainable energy production against fossil fuel consumption. Investing in renewable energy in countries and even regions in order to adapt to such a powerful transformation is the starting point of the study. It is becoming a universal problem for regions to decide on the right renewable energy source for existing factors. From this point of view, in this study, a study was conducted on determining the criteria that should be given importance in order to invest in the right regions of renewable energy resources. In the study, the criteria that affect the selection of 139 different renewable energy sources are reached by bringing together the criteria obtained as a result of the detailed literature review and with the help of expert opinions. With the evaluation made by people working in the field of renewable energy, the most important of these criteria, which exist in many, are determined; are grouped under the main dimensions of cost, environment, technical, social, risk and their definitions are given. Relationship analysis of 45 sub-criteria obtained as a result of Pareto Analysis is investigated and with the DEMATEL method, the most influential criterion is the sustainability/predictability of energy resources; The criterion with the least impact level is the security criterion. The findings obtained are guiding for the problems of site selection, resource selection, investment region decision in renewable energy studies in the literature.

Key Words

“Energy, Renewable energy sources, DEMATEL, Energy selection, Energy criteria”

1. Giriş

Yenilenebilir enerji, çevreyi korumak adına sera gazı salınımı yüksek olan fosil yakıtların kullanımını azalttığı, yeni istihdam olanakları sağladığı, dışa bağımlılığı azalttığı, uluslararası anlaşmalara uyum sağladığı ve enerji verimliliğinin artmasına katkıda bulunduğu için oldukça önemlidir. Bu kapsamda ülkemiz genelinde dikkat edilmesi gerekli ve önemli bir konudur. Ülkeler, sosyal ve ekonomik gelişmeleri geliştirmek için enerjiye ihtiyaç duyarlar. Enerji, yoksulluğun azaltılmasında, yaşam standartlarının ve refah düzeyinin iyileştirilmesinde önemli bir faktör olarak görülmelidir. 1970'lerde petrol fiyatlarındaki hızlı yükseliş, ülkeleri farklı enerji kaynaklarını kullanmaya yöneltmiş ve gelişen teknolojinin yardımıyla fosil yakıtlara alternatif olabilecek farklı enerji kaynakları, özellikle yenilenebilir enerji kaynakları bulunmuştur.

Fosil yakıtlar, dünyanın toplam enerji tüketiminin hala %81'ini üreten ve genellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler tarafından ithal edilen birincil enerji kaynağıdır (Alkan ve Albayrak, 2020). Bunun yanı sıra dünyamızda var olan fosil yakıtların er ya da geç sona ereceği açıktır (Stanek vd., 2018). Dünya enerji rezervinin tükenme aralığı kömür için 200 yıl, doğalgaz için 65 yıl ve petrol için 40 yıldır (Güler, 2009). Enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi, özellikle petrole bağımlı ve gelişmekte olan ülkeler için hayati önem taşımaktadır (Al Garni vd., 2016). Aynı zamanda, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) 2013'de yayımladığı 5. Değerlendirme Raporu'nda, küresel sıcaklıklardaki artışın, yani iklim değişikliğinin "kesin olarak" insan faaliyetlerinden kaynaklandığını ortaya koymaktadır. IPCC, sanayi devriminden bu yana oluşan sera gazı emisyonlarının üçte ikisinin fosil yakıt kullanımı ve çimento üretiminden kaynaklandığını bu rapor ile altını çizmiştir (IPCC, 2014). Dünyadaki toplam enerji talebinin %29'unu karşılayan kömür, yoğun karbon içeriği nedeniyle küresel CO2 emisyonlarının %44'ünden sorumlu olmaktadır (IEA, 2013). Bu açıdan da bakıldığında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasıyla minimum veya sıfır karbondioksit emisyonlu elektrik üretilerek, daha çevreci ve gelecek yılların rezervlerinden almadan sürdürülebilir bir şekilde enerji elde etmek mümkün olmaktadır.

Geleneksel enerji santralleriyle ilgili potansiyel sorunları azaltmak için yenilenebilir enerji teknolojilerine hızla artan bir ilgi olduğu görülmektedir (Kim vd., 2014). Ancak, yenilenebilir enerjinin benimsenmesi, çok çeşitli faktörlerden etkilenen karmaşık bir prosedür olduğundan, araştırmacılar arasında bu etki faktörleri incelenmektedir (Irfan vd., 2020). Yenilenebilir enerji kaynakları için önemli olan kriterlerin belirlenmesi, değerlendirilmesi ve bu kriterlerin uygulanması için yürütülen çalışmalar mevcuttur. Konuyla alakalı literatüre bakıldığında, Barry vd. (2011), Afrika kıtasındaki mevcut enerjiye erişim eksikliğini iyileştirmek için yenilenebilir enerji teknolojilerinin seçimi için dikkate alınması gereken faktörlerin belirlenmesi çalışmasını Ruanda, Tanzanya ve Malawi'de yürütülen sekiz örnek olay incelemesi aracılığıyla geliştirmektedir. Kim vd. (2014) çalışmalarında, halkın güneş enerjisi teknolojilerini kullanma niyetlerini önemli ölçüde etkileyen faktörleri incelemektedir. Entegre araştırma modeline yapısal eşitlik modelleme yönteminin uygulanmasından elde edilen sonuçlar, sistem kalitesi, algılanan faydalar ve güvenden oluşan üç olumlu faktörün, halkın güneş enerjisi teknolojilerine yönelik tutumunun belirlenmesine önemli ölçüde katkıda bulunduğunu göstermektedir. Jabeen vd. (2019) ve Irfan vd. (2020a) çalışmalarında, Pakistan'da tüketicilerin evde kullanım için yenilenebilir enerjiyi benimseme niyetlerini etkileyen faktörleri Yapısal Eşitlik Modellemesi ile incelemektedir.

Yenilenebilir enerji seçimine ilişkin karar verme süreci çok boyutludur ve ekonomik, teknik, çevresel ve sosyal gibi farklı seviyelerde bir dizi kapsamdan oluşur. Bu açıdan, Çok Kriterli Karar Verme yöntemleri, ilgili tüm farklı bakış açılarını anlamak ve çeşitli alternatifler arasında bir dizi ilişki oluşturarak karar verme sürecini desteklemek için en uygun araç gibi görünmektedir (Cavallaro ve Ciraolo, 2005). Çok kriterli karar verme (MCDM), çeşitli göstergeler, çelişen hedefler ve kriterler dahil olmak üzere karmaşık senaryolarda en iyi sonuçları bulmakla ilgilenen bir operasyonel araştırma dalıdır. Bu araç, karar vericilere tüm kriterleri ve hedefleri aynı anda göz önünde bulundurarak karar alma esnekliği sağlaması nedeniyle enerji planlaması alanında popüler hale gelmektedir (Kumar vd., 2017). Haralambopoulos ve Polatidis (2003) çalışmalarında, PROMETHEE II geçiş yöntemini kullanarak yenilenebilir enerji projelerinde çok kriterli analize yardımcı olmak için uygulanabilir bir grup karar verme çerçevesini açıklamaktadır. Önerilen çerçeve, Yunanistan'ın Sakız adasında bulunan bir jeotermal kaynağın kullanımı ile ilgili bir vaka çalışmasında test edilmektedir. Cavallaro ve Ciraolo (2005) çalışmasında, rüzgar enerjisi için Çok Kriterli Karar Verme yöntemi uygulamışlardır. Polatidis vd. (2006), yenilenebilir enerji planlaması bağlamında, çeşitli uygun çok kriterli teknikler ve bunların performansları ile karşılaştırmalı olarak bir çalışma gerçekleştirmektedir. Kaya ve Kahraman (2010) çalışmalarında, ele alınan farklı kriterleri değerlendirerek entegre bir VIKOR-AHP metodolojisi uygulamaktadır. Bu çalışmada, İstanbul için en iyi yenilenebilir enerji alternatifinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. İkinci olarak, bu şehirdeki alternatif enerji üretim sahaları arasından bir seçim aynı yaklaşımla yapılmıştır. Kumar vd. (2017) çalışmalarında, çeşitli MCDM yöntemlerine göre yenilenebilir enerji uygulamalarını dikkate alarak yapılan sürdürülebilir enerji alanında kapsamlı bir inceleme yapılmaktadır.

Çalışmanın temel amacı, yenilenebilir olmayan enerji kaynaklarının tek alternatifi olan yenilenebilir enerji kaynaklarının seçimi için nihai bir kriter tablosu oluşturmak için literatürde yer alan çalışmaların araştırılması ve analiz edilmesidir. Bu bağlamda yapılan çalışmada, yazar ve yazarların çalıştığı yenilenebilir enerji belirleme konulu yayınlarda ele alınan kriterler araştırılmış ve mevcut çalışmada bir araya getirilmiştir. Yenilenebilir enerji seçimini etkileyen 139 farklı kriter sonucuna ulaşılmış ve uzman görüşleri yardımıyla bu kriter "daha önemli" bulgusuyla 45 kritere indirgenerek tanımları detaylandırılmış ve ilişki analizi yorumlanmıştır.

2. Yöntem

Çalışmanın yenilenebilir enerji kuruluşu için bölge seçiminde etkili kriterlerin belirlenmesi için ilk aşama literatürde yer alan çalışmaları araştırmak olmuştur. Kapsamlı araştırmalar neticesinde ulaşılan detaylı ana kriter-alt kriter çalışmaları Tablo 1’de verilmiştir. Buna göre kriter sayısının fazlalığı ve önem derecelerine göre sıralanmasının istenmesi ile yöntem olarak Pareto Analizi kullanılmıştır. Pareto Analizi sonrasında kriterler arası derecelendirme ve birbirlerine göre etki düzeyleri incelenmek istenmiştir. Bu amaçla Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden biri olan DEMATEL (The Decision Making Trial And Evaluation Laboratory) Yöntemi kullanılmıştır.

Pareto Analizi 19. yüzyılda ünlü ekonomist ve sosyolog Vilfredo Pareto tarafından geliştirilmiştir. 80-20 kuralı olarak da bilinmektedir. Gerçek hayatta değeri düşük işler için, değerinin üzerinde zaman veya para harcamak önemli kayıplara yol açar. Bu sorunun önüne geçebilmek için işleri önem derecelerine göre ayırarak; değerlere göre işlem yapılması durumunda bu kayıpların önüne geçmek mümkün olmaktadır. Bu amaçla çalışmaları “çok önemli”, “orta derecede önemli” ve “az önemli” olmak üzere üç ana başlık altında sınıflandıran Pareto Analizi, ABC Analizi olarak da adlandırılmaktadır.

Ayrıca Pareto Analizinin faydaları şu şekilde sıralanmaktadır (Bozkurt, 1998);

- Önem sırasına göre tablo
- Sorunları ve nedenlerini listelemek
- Her sorunun yüzdesini hesaplama
- Problemden en yüksek öneme sahip faktörü belirlemek
- Listedeki toplam hata sayısını belirleyin
- Takım çalışmasında ortak karar almak

Pareto Analizi ile elde olan kriterler önem sırasına göre sıralanır, her kriterin yüzdesi hesaplanır ve böylelikle en yüksek öneme sahip kriter de belirlenmiş olur.

Tablo 1. Yenilenebilir Enerji Seçimi Kriterleri

Georgopoulou vd., 1997	Akash vd., 1999	Beccali vd., 2003	Nigim ve Munier, 2004	Kahraman vd., 2009	Amer ve Daim, 2011	Kabak ve Dağdeviren, 2014	Ren ve Sovacool, 2015
Finansal kriterler	Finansal kriterler	Teknolojik kriterler	Finansal kriterler	Finansal kriterler	Finansal kriterler	Finansal kriterler	Teknolojik kriterler
Yatırım maliyeti	Donanım maliyeti	Teknik olgunluk	Sermaye maliyeti	Uygulama maliyeti	Ar-Ge maliyeti	Ekonomik değer	Teknolojik olgunluk
İşletme ve Bakım Maliyeti	Yakıt Maliyetleri	Güvenilirlik	Ödeme zamanı	Fonların kullanılabilirliği	Sermaye maliyeti	Uygulama maliyeti	Güvenilirlik
Teknolojik kriterler	Bakım maliyeti	Çevresel kriterler	Devlet teşvikleri	Ekonomik değer	İşletme ve Bakım maliyetleri	Yatırım maliyeti	Güvenlik
Emniyet	Teknolojik kriterler	Sera emisyonları	Teknolojik kriterler	Teknolojik kriterler	Elektrik maliyeti	İşletme ve Bakım maliyeti	Yüklenmiş kapasite
İşletimsellik	Etkinlik	Arazi ihtiyacı	Teknoloji olgun	Fizibilite	Teknolojik kriterler	Teknolojik kriterler	Elektrik üretimi
İstikrar	Güvenilirlik	Sosyal kriterler	Kaynak kullanılabilirliği	Risk	Olgunluk	Teknik fizibilite	Sosyal kriterler
Çevresel kriterler	Kullanılabilirlik	Emek etkisi	Çevresel kriterler	Güvenilirlik	Etkinlik	Güvenilirlik	Sosyal kabul edilebilirlik
Hava kalitesi	Emniyet	Piyasa vadesi	Ekolojik etki	Çevresel kriterler	Güvenilirlik	Güvenlik	Devlet teşviği
Gürültü	Sosyal kriterler		Arazi ihtiyacı	Kirlilik emisyonu	Kullanılabilirlik	Gelişmemişlik	
Görsel özellik	Sosyal yardımlar		Sosyal kriterler	Arazi ihtiyacı	Mevcut kaynak	Çevresel kriterler	
İklim değişikliği	Ulusal ekonomi		İş	Sosyal kriterler	Çevresel kriterler	Global etki	
Ekosistemin korunması			Yerel kalkınma	Sosyal kabul	Arazi ihtiyacı	Arazi kullanımı	
Sosyal kriterler			Sosyal yardımlar	Emek etkisi	Emisyon	Ekolojik hasar	
İş					Ekosistem	Sosyal kriterler	
Ekonomik aktiviteler					Sosyal kriterler	İnsan refahı	
					Sosyal yardımlar	İş yaratma	
					İş yaratma	Sosyal direniş	
					Sosyal kabul		

Tablo 1 (devam). Yenilenebilir Enerji Seçimi Kriterleri

Şengül vd., 2015	Štreimikienė vd., 2016	Özcan vd., 2017	Ligus ve Peternek 2018	Lee ve Chang, 2018	Solangi vd., 2019
Finansal kriterler Yatırım maliyeti	Finansal kriterler Üretim maliyeti	Teknik Kriterler Verimlilik	Ekonomi GSYH	Yatırım maliyeti İşletme ve Bakım maliyeti Elektrik maliyeti	Ekonomik Boyut İlk maliyet
İşletme ve Bakım maliyetleri Geri ödeme periyodu	Ekonomik verim Teknolojinin rekabet gücü	Santral inşa süresi Ekonomik Kriterler	Ticaret dengesi Ekonominin rekabet gücü ve yenilikçiliği İşsizlik oranı	Etkinlik	İşletme ve Bakım Maliyeti Kaynak Potansiyeli
Teknolojik kriterler Etkinlik	Teknolojik kriterler Kapasite	Maliyet Devlet teşviki	Girişim ve kamu sektörünün enerji güvenliği Bölgelerin dengeli gelişimi Arazi ihtiyacı	Kapasite faktörü Teknik olgunluk	Enerji Üretim Maliyeti RE tesisinin beklenen ömrü
Yüklenmiş kapasite Üretilen enerji miktarı Çevresel kriterler	Güvenilirlik Yenilikçilik Teknolojinin dayanıklılığı	Ekonomik ömür Dışa bağımlılık Sosyal Kriterler	Sosyal Toplumsal eşitsizliği ortadan kaldırmak Yeni enerji kültürünün şekillendirilmesi Hanelerin enerji güvenliği	Sera gazı emisyonu Arazi kullanımı İş yaratma	Çevresel Boyut CO ₂ Emisyon Azaltma Çevreye Etkisi
Arazi kullanımı CO2 emisyonu Sosyal kriterler İş yaratma	Çevresel kriterler İklim değişikliği Kirlilik (SO ₂ , NO _x) Sosyal kriterler İş Kamuoyu kabulü	İstihdam olanakları Sosyal kabul Çevresel Kriterler Alan gereksinimi Çevresel etki Topografik gereksinimler Sera gazı salınımı	Karbon salınımı SO _x , NO _x , PM10, PM2.5 Atık üretim miktarı Ekonominin kaynak verimliliği Peyzajda girişim Arıza / kaza riski	Sosyal kabul	Arazi İhtiyacı Gürültü Teknik Boyut Teknoloji olgunluğu Etkinlik Kapasite faktörü İnsan Kaynakları Uzmanlığı İklim koşulları Güvenilirlik / Fizibilite Sosyo-Politik Boyut Kamuoyu kabulü İş yaratma Enerji güvenliği Kurumsal düzenleme Düzenleyici mekanizma

Tablo 1 (devam). Yenilenebilir Enerji Seçimi Kriterleri

Rani vd., 2019	Bento vd., 2020	Yücenur vd., 2020	Alizadeh vd., 2020	Zheng ve Wang 2020
Kirletici emisyonları Atık bertaraf ihtiyacı	Sosyoekonomik faktörler Refah	Yer Şehir merkezine uzaklık	Yarar Yerel kaynakların kullanımı	Ekonomi Yatırım maliyeti
Su kirliliği Arazi ihtiyacı Arazi bozulması	Nüfus ve beşerî sermaye Faiz oranları Finansal piyasaların gücü	Toprağın verimliliği Maliyet Karlılık	Çevrenin korunması Müttefik endüstrilerin gelişimi UNFCCC ve Kyoto Protokolü gibi uluslararası taahhütleri yerine getirmek	Yıllık işletme maliyeti Arazi talebi Çevre
Ekonomik riskler	Fosil enerji kaynaklarının maliyeti	İşçilik maliyetleri	Fırsat	Gürültü etkisi
Enerji arz güvenliği Enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği	Ülkeye özgü faktörler Enerji bağımlılığı	Ulaşım maliyetleri Yatırım maliyeti	Alternatif çevre dostu kaynaklar geliştirmek İş yaratma	Ekolojik etki Dış çevre ile koordinasyon
Kaynak dayanıklılığı Ulusal enerji politikası hedefine uyumluluk Yatırım maliyetleri Fizibilite	Yenilenebilir potansiyel Siyasi faktörler	Risk Aşınma	Enerji fiyatlarında düşüş Maliyet	Teknoloji Hizmet ömrü
		Deprem riski Terör riski Hammadde Hammadde seçimi Hammaddeye uzaklık Hammadde maliyeti	Yatırım maliyetleri İşletme maliyetleri Bakım maliyetleri Arazi kullanımı Ekolojik hasar Risk Yabancı teknolojiye bağımlılık Mali mekanizma eksikliği Yetersiz teknolojik altyapılar Enerji kaynağının dengesizliği Halkla ilişkiler konusunda bilinç eksikliği Teknolojik eskime Teknoloji Ekonomi Güvenlik Global etki İnsan refahı Enerji güvenlik açığı	Enerji arz istikrarı Enerji verimliliği

Tablo 1'e bakıldığında literatürde yer alan yenilenebilir enerji kaynağı seçimi çalışmaları çoğunlukla incelenmiş ve yazarların kendi çalışmalarında kullandığı kriterler belirtilmiştir. Buna göre, Georgopoulou vd. 1997 yılında ilk olarak finansal kriterler ana boyutu altında, yatırım maliyeti, işletme ve bakım maliyeti, teknolojik kriterler boyutu altında emniyet, işletimsellik, istikrar, çevresel kriterler boyutu altında hava kalitesi, gürültü, görsel özellik, iklim değişikliği, ekosistemin korunması, sosyal kriterler boyutu altında iş ve ekonomik aktiviteler kriterlerini çalışmalarında kullanmışlardır. Yıllar içerisinde özgünlük adına birbirlerinden esinlenen yazarlar, kriterleri çoğalarak artmasını sağlamıştır. Bu artışla kriterlerin uygunluğu ve önem derecesi çalışmasını ortaya çıkarmıştır. Bu sebeple bu çalışmada Tablo 1'den alınan tüm farklı kriterler bir araya getirilmiştir.

2.1. DEMATEL Yöntemi

DEMATEL Yöntemi; kriterler seti arasında etki diyagramlarına ulaşmak için ve matrisler yardımıyla nedensel ilişkileri ortaya koyan bir model analizidir. Yöntem; bileşenler arasındaki ilişkileri diyagramlar ve matrislerle tanımlayarak, bu ilişkiler arasında kantitatif tanımlamalar yaparak ilişkiler arasındaki gücü ortaya koymaktadır (Bai ve Sarkis, 2013). DEMATEL yöntemi 5 adımdan oluşmaktadır (Wu ve Lee, 2007).

Adım 1: Direkt ilişki matrisinin oluşturulması. Tablo 2.'de yer alan ikili karşılaştırma ölçeği kullanılarak direkt ilişki matrisi oluşturulur.

Tablo 2. DEMATEL Değerlendirme Skalası

Sayısal Değer	Açıklama
0	Etkisiz
1	Düşük Etki
2	Orta Etki
3	Yüksek Etki
4	Çok Yüksek Etki

Kriterler arasındaki ilişkiler, ikili karşılaştırma ölçeği kullanılarak uzman grup tarafından belirlenir. Kriterlerin kendi arasındaki değerlendirmeler 0 olarak atanır. Karşılaştırmaların sonucunda direkt ilişki matrisi elde edilir.

Adım 2: Normalleştirilmiş direkt ilişki matrisinin belirlenmesi

$$M=k*A \quad (1)$$

$$k = \min \left[\frac{1}{\max \sum_{j=1}^n |a_{ij}|}, \frac{1}{\max \sum_{i=1}^n |a_{ij}|} \right] \quad (2)$$

$i, j \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$

Direkt ilişki matrisi (A)'ya bağlı olarak 1 ve 2 numaralı eşitlikler kullanılarak normalleştirilmiş direkt ilişki matrisi (M) oluşturulur.

Adım 3: Toplam ilişki matrisinin elde edilmesi; toplam ilişki matrisi (S) 3 numaralı eşitlik yardımıyla elde edilir. Bu eşitlikte birim matris (I) ile gösterilmektedir. Toplam ilişki matrisi (S) elde edilmesi (1) numaralı eşitlik yardımı ile gerçekleşmektedir. Normalize edilmiş direkt ilişki matrisi, birim matristen çıkarılıp tersi alındıktan sonra tekrar kendisiyle çarpılarak toplam ilişki matrisi elde edilir.

$$S=M+M^2+M^3+\dots=\sum_{i=1}^{\infty} M^i \quad (3)$$

$$=M(1-M)^{-1}$$

Adım 4: Gönderici ve alıcı grubu hesaplanması; gönderici ve alıcı gruplar eşitlik 4, 5 ve 6 numaralı eşitlik yardımıyla hesaplanır. Matriste yer alan S_{ij} değeri i kriterinin j kriterine olan etki düzeyini belirtmektedir. S matrisindeki sütunlar toplamı (R), S matrisindeki satırlar toplamı (D)'yi göstermektedir. D ve R eşitliklerinin hesaplanmaları ile D-R ve D+R değerlerini kullanarak her bir kriterin diğerleri üzerindeki etkisi ve diğerleri ile ilişki düzeyi belirlenir. D-R'de pozitif değerlere sahip kriterlerin, diğer kriterler üzerinde daha yüksek etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu tip kriterler gönderici olarak adlandırılmaktadır. D-R değeri için negatif değere sahip olan kriterler ise diğer kriterlerden daha fazla etkilenirler. Bu kriterlere ise alıcı adı verilmektedir. Öte yandan D+R değerleri herhangi bir kriterin diğer kriterler ile arasındaki ilişkisini göstermektedir.

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{1j} & S_{1n} \\ S_{i1} & S_{ij} & S_{in} \\ S_{n1} & S_{nj} & S_{nn} \end{bmatrix} \quad i, j \in \{1, 2, 3, \dots, n\} \quad (4)$$

$$D = \sum_{j=1}^n S_{i,j} \quad (5)$$

$$R = \sum_{i=1}^n S_{i,j} \quad (6)$$

D+R ve D-R'den yararlanarak etki-yönlü graf diyagramı elde edilebilir. Karar vericiler tarafından belirlenen bir eşik değeri yardımıyla S matrisinde eşik değerden daha büyük etki değerine sahip bazı elemanlar seçilir ve etki yönlü graf diyagramı elde edilir. Yatay eksen D+R, dikey eksen D-R'yi gösteren bir koordinat düzleminde noktalar gösterilir.

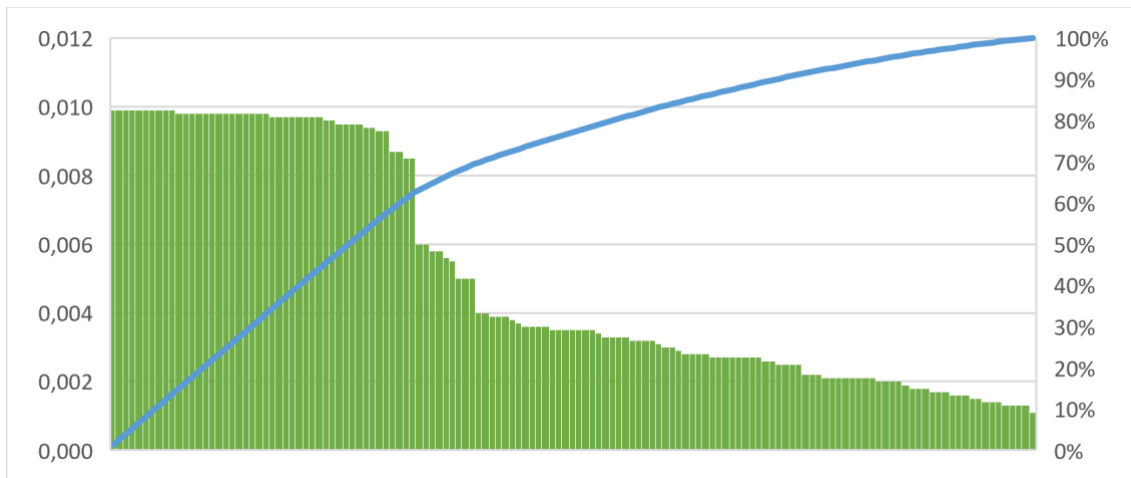
Adım 5: Ağırlıkların hesaplanması; D+R ve D-R değerleri yardımı ile 7 ve 8 numaralı eşitlik kullanılarak ağırlıklar hesaplanır.

$$w_i = \left\{ (D_i + R_i)^2 + (D_i - R_i)^2 \right\}^{1/2} \quad (7)$$

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (8)$$

3. Bulgular

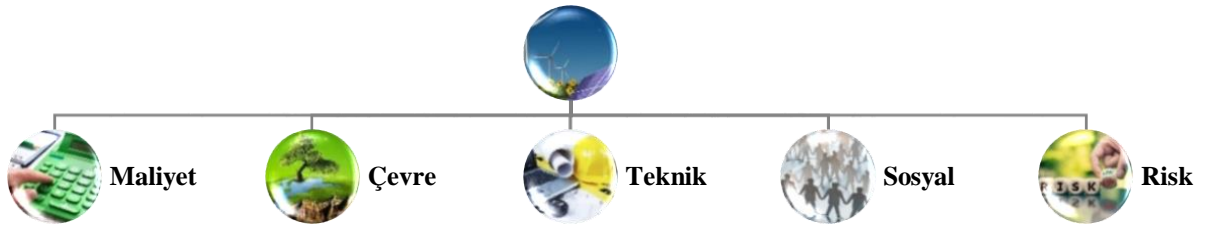
Literatür incelemesiyle ulaşılan 139 farklı kriterin, hangileri gerçekten önemli, hangileri olmazsa olmaz veya hangilerinin önemi göz ardı edilebilir gibi sorulara cevap aranmak istendiği için uzman görüşleri alınarak Pareto analizi gerçekleştirilmiştir. Yenilenebilir enerji alanında çalışan firma temsilcileri ve yine enerji alanında çalışan akademisyenler ile görüşmeler gerçekleştirilmiştir. 10 kişiden görüş alınarak oluşturulan puan tablosunda önem derecesine göre 1-10 arasında puan verilmesi istenmiştir. Elde edilen sonuçlar Pareto analizi açısından çalışılmış ve 139 kriter 45 kritere indirgenerek çalışmada yer almıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Yenilenebilir Enerji Seçiminde Etkili Kriterlerin Belirlenmesi

Kriter sayısının fazla olması sebebiyle kriter isimleri grafik içerisinde yer almamış olsa da 139 kriterden indirgenen 45 alt kriterin detaylı açıklaması ve belirlenen alt kriterlerin tanımlaması Tablo 3'de, yenilenebilir enerji kaynağı belirlemede rol oynayan alt kriter için oluşturulan ana boyutlar ise Şekil 2'de verilmiştir. Yenilenebilir enerjiyi etkileyen ana boyutların sınıflandırılması için, elde edilen kriterlerin tanımlarının birbirleri ile tutarlı ve anlamlı olacak şekilde yapılması sonucunda bir araya getirilerek bulunmuştur.

Yenilenebilir Enerji Ana Boyutları



Şekil 2. Yenilenebilir Enerjiyi Etkileyen Ana Boyutlar

Tablo 3. Kriterlerin Tanımlanması

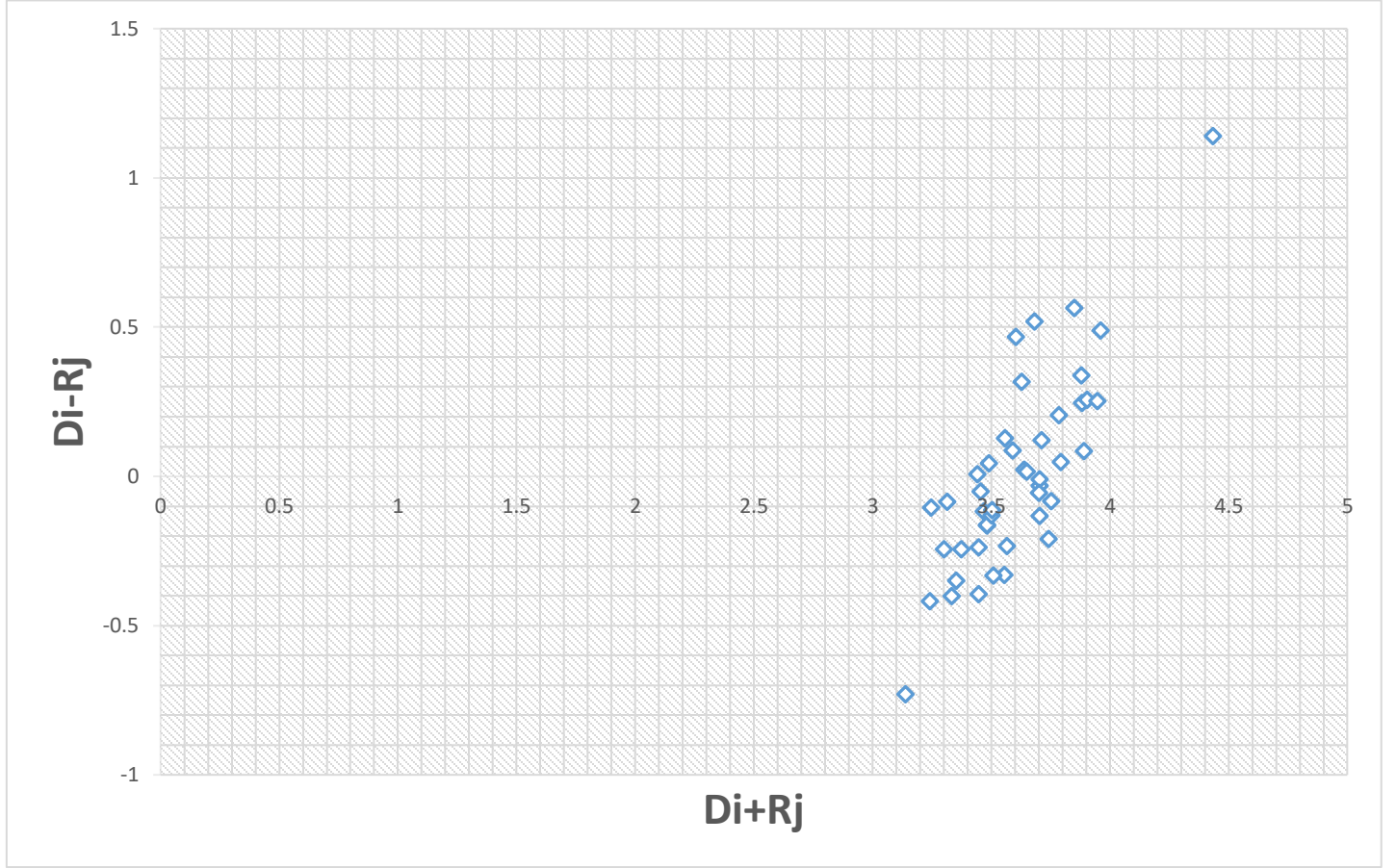
No	Alt Kriter	Tanım	Ana Boyut
1	Yatırım maliyeti	İlk kurulumda kullanılan hammadde oranına bağlı olarak, ekipman sayısı ve kurulum, mühendislik hizmetleri satın almak için tüm masrafları içerir.	Maliyet
2	İşletme ve Bakım Maliyeti	İşçilerin maaşları da dahil olmak üzere tesisin düzenli bakımının işletme ve taahhüt maliyetini içerir.	
3	İşçilik maliyetleri	Ulaşım, yeme ve içme, eğitim vb. işçilerle ilgili giderleri içerir.	
4	AR-GE maliyeti	Yenilenebilir teknolojide meydana gelen araştırma ve geliştirme giderlerini içerir.	
5	Üretim maliyeti	Yenilenebilir enerji santrallerinden üretilen elektriğin maliyeti olarak tanımlanır.	
6	Nakliye maliyeti	Tedarikçiden enerji tesisine hammadde tedariki için gerekli araç ve giderleri içerir.	
7	Ekolojik ve ekosistem üzerindeki etkisi	Çevresel kirlilik, canlı yaşamına etki eden değişiklikler vb. etkilerin bütünüdür.	Çevre
8	Su kirliliğine etkisi	Enerji tesisinden kaynaklı ortaya çıkan atıklarla suyun kirlenmesini ifade eder.	
9	Su tüketimi	Elektrik üretiminin yaşam döngüsü sırasında kaynağına geri döndürülmeyen yüzey suyu veya yeraltı suyu gibi su rezervuarından elde edilen çekilen su miktarıdır.	
10	Gürültü etkisi	Bölgede elektrik santrallerinin kurulması nedeniyle gürültü kirliliği olasılığını ifade eder.	
11	Sera gazı emisyonu	Sera gazları olarak adlandırılan CO ₂ , SO ₂ ve NO _x moleküller, çevre, hava ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sahip olmasını ifade eder.	
12	İklim değişikliği	İklim koşulları bir elektrik santralindeki üretimi etkiler; tesisin performansı bu koşullara bağlıdır.	
13	Hava kirliliğine etkisi	Enerji tesisinden kaynaklı ortaya çıkan atıklarla hava tabakasının kirlenmesini ifade eder.	
14	Atık bertaraf ihtiyacı	Geri kazanımı mümkün olmayan atıkların bertaraf edilmesi gerekliliğidir.	
15	Arazi bozulması	Arazinin birtakım etkiler sonucu özelliklerinin değişikliğe uğraması ile ekonomik ve ekolojik işlevlerinin azalmasını anlatır.	
16	Kirlilik	Bölgeyi etkileyen her türlü kirliliğin toplamını ifade eder.	
17	Şehir merkezine olan mesafe	Enerji üretimi için seçilecek tesisin uzaklığını ifade eder.	Teknik
18	Hammaddeye olan mesafe	Enerji üretimi için seçilecek tesisin hammadde kaynaklarına yakın olması beklenir.	
19	Arazi ihtiyacı/alan gereksinimi	Santral yatırım kararının verilmesinde, toplam alan kullanımı ve birim m ² 'ye enerji miktarı önemli bir kriterdir.	
20	Hizmet ömrü/Ekonomik ömür/Tesisin beklenen ömrü	Santral kurulum ve işletme maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle, yatırımın ekonomik ömrü kârlılığı belirleyen önemli bir faktördür.	

Tablo 3 (devam). Kriterlerin Tanımlanması

No	Alt Kriter	Tanım	Ana Boyut
21	Kaynak potansiyeli	Bölgede enerji üretmek için yenilenebilir kaynakların kullanılabilirliğidir.	
22	Üretim ve kurulumda modülerlik	Tesisin gerekli büyüklüklerde kurulabilir, birleştirilerek büyüyebilir ve kolayca yer değiştirebilirler olmasını ifade eder.	
23	Teslim süresi	Bir tesisin onaylanması ve kurulması için geçen süredir.	
24	Teknolojik olgunluk	Teknolojinin bölgesel, ulusal ve uluslararası düzeylerde ne kadar yaygın olduğunu gösterir.	
25	Enerji arz istikrarı	Enerji arzının dış ortamdan ne ölçüde etkilendiğini ifade eder.	
26	Güvenlik/Enerji güvenliği/Enerji Arz Güvenliği/Arz güvenliği	Yeterli miktardaki kaliteli ve temiz enerjinin, uygun fiyatlarla ve kesintisiz olarak temin edilmesini anlatır.	
27	Enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği/öngörülebilirliği	Bölgenin kaynak bakımından yoğunluğunu, devamlılığını ifade eder	
28	Etkinlik/Enerji verimliliği/Verimlilik	Gaz, buhar, ısı, hava ve elektrikteki enerji kayıplarının önlenmesi, atıkların geri kazanımı ve değerlendirilmesi, ileri teknoloji ile üretim düşürülmeden enerji talebinin azaltılması, daha verimli enerji kaynakları, gelişmiş endüstriyel süreçler, enerji geri kazanımları gibi etkinliği artırıcı önlemlerin tamamıdır.	
29	Üretilen enerji miktarı	Yılda üretilen enerji miktarını ifade eder.	
30	Kapasite faktörü	Bir yenilenebilir enerji kaynağından elde edilen enerjinin ne kadar yararlı ve verimli olabileceğini gösterir.	
31	Güvenilirlik	Bir elektrik santralının belirtilen koşullar altında temel işlevleri yerine getirme kabiliyeti olarak tanımlanır.	
32	Rezervler / Üretim Oranı	Bölgede bulunan rezerv miktarının, üretime oranına oranını ifade eder.	
33	Devlet teşviki	Hükümet yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı konusunda birçok teşvik vermektedir.	Sosyal
34	İş imkanı/ İstihdam olanakları/istihdam yaratma	Yenilenebilir enerji teknolojisinin yaşam döngüsü boyunca, inşaat ve işletimden hizmetten alma aşamasına kadar oluşan potansiyel işleri dikkate almaktadır.	
35	Sosyal Kabul Edilebilirlik	Santrallerin toplum tarafından kabul edilirlilik düzeyini gösteren bir parametre olarak, iş imkanları, sera gazı emisyonları, görüntü kirliliği, alan ve su kullanımı vb. birçok kriterden etkilenmektedir ve maksimize edilmesi gereken bir hedeftir.	
36	Hükümet politikaları	Her yenilenebilir enerji teknolojisine ilişkin hükümet politikalarını içerir.	
37	Ulusal enerji politikası hedefine uyumluluk	Hükümet politikası ile önerilen tesis politikası arasındaki hedeflerin yakınlaşma derecesini ifade eder.	
38	Dış çevre ile koordinasyon	Yabancı firmalarca kurulacak tesisin ülkemizle olan işbirliği düzeyini ifade eder.	
39	Dışa bağımlılık/Enerji bağımlılığı/Yabancı teknolojiye bağımlılık	Yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam üretim içindeki payının artırılması ile mümkün olacak önemli bir stratejik hedeftir.	
40	Yerel kalkınma ve refah	Kurulacak tesisin bölgeyi kalkındırma ve refah seviyesini yükseltmeye etkisini ifade eder.	
41	Yerel, sivil toplum kuruluşlarının tepkisi	Kurulacak tesisin bölge halkı tarafından kabul edilmemesini ifade eder.	
42	Deprem riski	Tesisin açılacağı bölgenin deprem riski açısından incelenmesini içerir.	Risk
43	Terör riski	Alternatifler, enerji tesisinin bulunduğu şehre terör saldırısı olasılığına / oranına göre incelenir.	
44	Arıza / kaza riski	Enerji tesisinin arıza veya kaza riskine olasılığı incelenir.	
45	Ekonomik riskler	Kurulum aşamasında veya sonrasında öngörülemeyen ekonomik zorlukları içerir.	

Tablo 3 dikkate alınarak Pareto analizi sonucu elde edilen 45 alt kritere yönelik önem derecelerinin belirlenmesi için DEMATEL uygulamasına geçilmiştir. İlk adım olarak kriterler arası ilişkiler ikili karşılaştırma ölçeği (Tablo 2) kullanılarak direkt ilişki matrisi uzman görüşü alınarak belirlenmiştir. 45 kritere yönelik karşılıklı değerlendirme yapılarak matris elde edilmiştir. Yöntemde yer alan formüller aracılığıyla toplam ilişki matrisi elde edilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4 ile kriterler toplam ilişki matrisinde yerini almıştır. Matrisin puan ortalaması 0,04 olarak bulunmuştur. Bu ortalama eşik değerini göstermektedir ve kırmızı ile gösterilen alanlar bu ortalamanın üzerinde değer alan kriterler olarak gösterilmiştir. Buna ek olarak gönderici ve alıcı grubun hesaplanması aşamasına gidilmiştir. Ardından, Tablo 5’de yer alan D+R ve D-R’den yararlanarak etki yönlü graf diyagramı elde edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Etki yönlü diyagram

Şekil 3’e göre eksenin pozitif tarafında kalanlar etkileyen grupta iken, negatif tarafında kalanlar etkilenen olarak grafikte yer almıştır. Buna göre Di-Rj dikkate alınarak negatif değerler (ekolojik ve ekosistem üzerindeki etkisi, nakliye maliyeti, güvenlik/enerji güvenliği/enerji arz güvenliği/arz güvenliği, sera gazı emisyonu/sera gazı salınımı, su tüketimi, hammaddeye olan mesafe, iş imkanı/istihdam olanakları/istihdam yaratma, hava kirliliğine etkisi iklim değişikliğine etkisi, hükümet politikaları, ulusal enerji politikası hedefine uyumluluk, atık bertarafı ihtiyacı, şehir merkezine olan mesafe, sosyal kabul edilebilirlik, yerel kalkınma ve refah, devlet teşviki, gürültü etkisi, üretilen enerji miktarı, işçilik maliyetleri, kirlilik (SO₂, NO_x), arazi bozulması, ar-ge maliyeti, dış çevre ile koordinasyon, kapasite faktörü, su kirliliğine etkisi) etkilenen kriterler olarak bulunmuştur.

Tablo 5. Kriterlerin ağırlıklarının hesaplanması

No	Kriter	Di	Rj	Di+Rj	Di-Rj	Etki Grubu
1	Yatırım maliyeti	2,2083	1,6430	3,8513	0,5652	Etkileyen
2	İşletme ve Bakım Maliyeti	1,8431	1,7147	3,5578	0,1283	Etkileyen
3	İşçilik maliyetleri	1,4119	1,8295	3,2414	-0,4176	Etkilenen
4	AR-GE maliyeti	1,5648	1,8093	3,3740	-0,2445	Etkilenen
5	Üretim maliyeti	2,2255	1,7355	3,9610	0,4900	Etkileyen
6	Nakliye maliyeti	1,5725	1,6763	3,2488	-0,1038	Etkilenen
7	Ekolojik ve ekosistem üzerindeki etkisi	1,5269	1,9207	3,4476	-0,3938	Etkilenen
8	Su kirliliğine etkisi	1,4661	1,8668	3,3329	-0,4008	Etkilenen
9	Su tüketimi	1,6771	1,7932	3,4703	-0,1161	Etkilenen
10	Gürültü etkisi	1,6048	1,8420	3,4468	-0,2373	Etkilenen
11	Sera gazı emisyonu/Sera gazı salınımı	1,8360	1,8681	3,7041	-0,0321	Etkilenen
12	İklim değişikliğine etkisi	1,7025	1,7534	3,4560	-0,0509	Etkilenen
13	Hava kirliliğine etkisi	1,8480	1,8570	3,7051	-0,0090	Etkilenen
14	Atık bertarafı ihtiyacı	1,6667	1,9000	3,5667	-0,2334	Etkilenen
15	Arazi bozulması	1,7658	1,9755	3,7413	-0,2098	Etkilenen
16	Kirlilik (SO ₂ , NO _x)	1,6128	1,9430	3,5559	-0,3302	Etkilenen
17	Şehir merkezine olan mesafe	1,6151	1,6995	3,3146	-0,0844	Etkilenen
18	Ham maddeye olan mesafe	1,5286	1,7720	3,3006	-0,2434	Etkilenen
19	Arazi İhtiyacı/Alan gereksinimi	1,9217	1,8730	3,7947	0,0487	Etkileyen
20	Hizmet ömrü/Ekonomik ömür/Tesisin beklenen ömrü	2,0645	1,8179	3,8824	0,2466	Etkileyen
21	Kaynak potansiyeli	1,9956	1,7912	3,7868	0,2045	Etkileyen
22	Üretim ve kurulumda modülerlik	1,7245	1,7170	3,4415	0,0075	Etkileyen
23	Teslim süresi	1,8386	1,7520	3,5906	0,0867	Etkileyen
24	Teknolojik olgunluk	1,7667	1,7230	3,4897	0,0437	Etkileyen
25	Enerji arz istikrarı	1,9170	1,7951	3,7121	0,1220	Etkileyen
26	Güvenlik/Enerji güvenliği/Enerji arz güvenliği/Arz güvenliği	1,2042	1,9347	3,1389	-0,7304	Etkilenen
27	Enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği/öngörülebilirliği	2,7869	1,6474	4,4343	1,1396	Etkileyen
28	Etkinlik/Enerji verimliliği/Verimlilik	2,0360	1,5676	3,6035	0,4684	Etkileyen
29	Üretilen enerji miktarı	1,6961	1,8097	3,5058	-0,1136	Etkilenen
30	Kapasite faktörü	1,5020	1,8507	3,3527	-0,3487	Etkilenen
31	Güvenilirlik	2,1005	1,8477	3,9482	0,2528	Etkileyen
32	Rezervler / Üretim Oranı	1,9886	1,9027	3,8913	0,0858	Etkileyen
33	Devlet teşviki	1,6858	1,8161	3,5020	-0,1303	Etkilenen
34	İş imkanı/ İstihdam olanakları/istihdam yaratma	1,8353	1,9185	3,7538	-0,0832	Etkilenen
35	Sosyal kabul edilebilirlik	1,8231	1,8778	3,7010	-0,0547	Etkilenen
36	Hükümet politikaları	1,7852	1,9184	3,7035	-0,1332	Etkilenen
37	Ulusal enerji politikası hedefine uyumluluk	1,6587	1,8232	3,4819	-0,1646	Etkilenen
38	Dış çevre ile koordinasyon	1,5897	1,9208	3,5105	-0,3311	Etkilenen
39	Dışa bağımlılık/Enerji bağımlılığı/Yabancı teknolojiye bağımlılık	1,8308	1,8081	3,6388	0,0227	Etkileyen
40	Yerel kalkınma ve refah	1,6610	1,8231	3,4840	-0,1621	Etkilenen
41	Yerel, sivil toplum kuruluşlarının tepkisi	2,1007	1,5818	3,6824	0,5189	Etkileyen
42	Deprem riski	1,8324	1,8170	3,6494	0,0154	Etkileyen
43	Terör riski	2,0809	1,8235	3,9044	0,2573	Etkileyen
44	Arıza/kaza riski	1,9726	1,6559	3,6285	0,3167	Etkileyen
45	Ekonomik riskler	2,1093	1,7713	3,8806	0,3380	Etkileyen

Di+Rj değeri göz önünde bulundurularak ağırlıklara göre ilişki sıralaması yapıldığı takdirde en yüksek ilişkili kriterler Şekil 4'de verildiği gibi olmaktadır.

İLİŞKİ DÜZEYİ		Di+Rj
		Enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği/öngörülebilirliği
	Üretim maliyeti	3,9610
	Güvenilirlik	3,9482
	Terör riski	3,9044
	Rezervler / Üretim Oranı	3,8913
	Hizmet ömrü/Ekonomik ömür/Tesisin beklenen ömrü	3,8824
	Ekonomik riskler	3,8806
	Yatırım maliyeti	3,8513
	Arazi İhtiyacı/Alan gereksinimi	3,7947
	Kaynak potansiyeli	3,7868
	İş imkanı/ İstihdam olanakları/istihdam yaratma	3,7538
	Arazi bozulması	3,7413
	Enerji arz istikrarı	3,7121
	Hava kirliliğine etkisi	3,7051
	Sera gazı emisyonu/Sera gazı salınımı	3,7041
	Hükümet politikaları	3,7035
	Sosyal kabul edilebilirlik	3,7010
	Yerel, sivil toplum kuruluşlarının tepkisi	3,6824
	Deprem riski	3,6494
	Dışa bağımlılık/Enerji bağımlılığı/Yabancı teknolojiye bağımlılık	3,6388
	Arıza/kaza riski	3,6285
	Etkinlik/Enerji verimliliği/Verimlilik	3,6035
	Teslim süresi	3,5906
	Atık bertarafı ihtiyacı	3,5667
	İşletme ve Bakım Maliyeti	3,5578
	Kirlilik (SO ₂ , NO _x)	3,5559
	Dış çevre ile koordinasyon	3,5105
	Üretilen enerji miktarı	3,5058
	Devlet teşviki	3,5020
	Teknolojik olgunluk	3,4897
	Yerel kalkınma ve refah	3,4840
	Ulusal enerji politikası hedefine uyumluluk	3,4819
	Su tüketimi	3,4703
	İklim değişikliğine etkisi	3,4560
	Ekolojik ve ekosistem üzerindeki etkisi	3,4476
	Gürültü etkisi	3,4468
	Üretim ve kuruluma modülerlik	3,4415
	AR-GE maliyeti	3,3740
	Kapasite faktörü	3,3527
	Su kirliliğine etkisi	3,3329
	Şehir merkezine olan mesafe	3,3146
	Hammaddeye olan mesafe	3,3006
	Nakliye maliyeti	3,2488
	İşçilik maliyetleri	3,2414
	Güvenlik/Enerji güvenliği/Enerji arz güvenliği/Arz güvenliği	3,1389

Şekil 4. İlişki düzeyi gösterimi

4. Sonuç

Günümüzde sanayinin, ulaşımın ve nüfusun hızlı bir şekilde artması enerjiye olan ihtiyacı her geçen gün arttırmaktadır. Artan enerji ihtiyacıyla birlikte enerji kullanımının artması çevresel problemler başta olmak üzere ithalat bağımlılığı, enerjiye ulaşım gibi birçok farklı problemi de ortaya çıkarmaktadır. Bu problemlerin ortaya çıkmasının temel nedeni kömür, petrol ve doğal gaz gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Bu nedenlerden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları enerjiye ulaşım kolaylaştırmakta, ithalat bağımlılığının azalmasını sağlamakta ve sera gazı emisyonu gibi çevresel

problemlerin azalmasına etki etmektedir. Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması sırasında ele alınması gereken kriterlerin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaç ile yenilenebilir enerji kaynaklarının dar boğazlarını ortaya koyacak ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması için öncelikli çalışma olan kriterlerin belirlenmesi çalışması uygulanmıştır.

Uygulamada elde edilen sonuçlar alt kriter ve ana boyutlar olarak detaylandırılmıştır. Buna göre maliyet ana boyutunun altında; yatırım maliyeti, işletme ve bakım maliyeti, işçilik maliyetleri, ar-ge maliyeti, üretim maliyeti, nakliye maliyeti; çevre ana boyutunun altında ekolojik ve ekosistem üzerindeki etkisi, su kirliliğine etkisi, su tüketimi, gürültü etkisi, sera gazı emisyonu, iklim değişikliği, hava kirliliğine etkisi, atık bertaraf ihtiyacı, arazi bozulması, kirlilik; teknik ana boyutunun altında şehir merkezine olan mesafe, hammaddeye olan mesafe, arazi ihtiyacı/alan gereksinimi, hizmet ömrü/ekonomik ömür/tesis beklenen ömrü, kaynak potansiyeli, üretim ve kurulumda modülerlik, teslim süresi, teknolojik olgunluk, enerji arz istikrarı, güvenlik/enerji güvenliği/enerji arz güvenliği/arz güvenliği, enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği/öngörülebilirliği, etkinlik/enerji verimliliği/verimlilik, üretilen enerji miktarı, kapasite faktörü, güvenilirlik, rezervler / üretim oranı; sosyal ana boyutunun altında devlet teşviki, iş imkanı/ istihdam olanakları/istihdam yaratma, sosyal kabul edilebilirlik, hükümet politikaları, ulusal enerji politikası hedefine uyumluluk, dış çevre ile koordinasyon, dışa bağımlılık/enerji bağımlılığı/yabancı teknolojiye bağımlılık, yerel kalkınma ve refah, yerel, sivil toplum kuruluşlarının tepkisi; risk ana boyutunun altında ise deprem riski, terör riski, arıza / kaza riski, ekonomik riskler alt kriterleri yer almıştır.

Pareto Analizi neticesinde elde edilen 45 alt kriterle yönelik ilişki araştırması DEMATEL yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre ekolojik ve ekosistem üzerindeki etkisi, nakliye maliyeti, güvenlik/enerji güvenliği/enerji arz güvenliği/arz güvenliği, sera gazı emisyonu/sera gazı salınımı, su tüketimi, hammaddeye olan mesafe, iş imkanı/ istihdam olanakları/istihdam yaratma, hava kirliliğine etkisi iklim değişikliğine etkisi, hükümet politikaları, ulusal enerji politikası hedefine uyumluluk, atık bertarafı ihtiyacı, şehir merkezine olan mesafe, sosyal kabul edilebilirlik, yerel kalkınma ve refah, devlet teşviki, gürültü etkisi, üretilen enerji miktarı, işçilik maliyetleri, kirlilik (SO₂, NO_x), arazi bozulması, ar-ge maliyeti, dış çevre ile koordinasyon, kapasite faktörü, su kirliliğine etkisi kriterleri etkilenen kriterler; yatırım maliyeti, üretim maliyeti, yerel, sivil toplum kuruluşlarının tepkisi, etkinlik/enerji verimliliği/verimlilik, arıza/kaza riski, ekonomik riskler, arazi ihtiyacı/alan gereksinimi, hizmet ömrü/ekonomik ömür/tesis beklenen ömrü, kaynak potansiyeli, dışa bağımlılık/enerji bağımlılığı/yabancı teknolojiye bağımlılık, teslim süresi, deprem riski, terör riski, teknolojik olgunluk, üretim ve kurulumda modülerlik, enerji arz istikrarı, işletme ve bakım maliyeti, güvenilirlik, rezervler/üretim oranı, enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği/öngörülebilirliği etkileyen kriterler konumunda yer almıştır. En çok etki düzeyine sahip kriter enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği/öngörülebilirliği olmuştur. En az etki düzeyine sahip kriter ise güvenlik kriteri olmuştur.

Bu analiz neticesinde ortaya çıkan beş ana boyut, 45 alt kriter gelecek çalışmalarda önemli düzeyde rol alacak niteliktedir. Karar verme problemlerine oldukça sık konu olan yenilenebilir enerji kaynakları seçimi konusunda farklı enerji kaynaklarının farklı bölgelere seçiminde bu kriterler ele alınarak çalışmalar genişletilebilir.

Teşekkür / Bilgilendirme

Bu araştırma, Tarsus Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (Proje No: MF.20.007) tarafından desteklenmiştir.

Referanslar

- Akash, B. A., Mamlook, R., & Mohsen, M. S. (1999). Multi-criteria selection of electric power plants using analytical hierarchy process. *Electric power systems research*, 52(1), 29-35.
- Al Garni, H., Kassem, A., Awasthi, A., Komljenovic, D., & Al-Haddad, K. (2016). A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia. *Sustainable energy technologies and assessments*, 16, 137-150.
- Alizadeh, R., Soltanisehat, L., Lund, P. D., & Zamanisabzi, H. (2020). Improving renewable energy policy planning and decision-making through a hybrid MCDM method. *Energy Policy*, 137, 111174.
- Alkan, Ö., & Albayrak, Ö. K. (2020). Ranking of renewable energy sources for regions in Turkey by fuzzy entropy based fuzzy COPRAS and fuzzy MULTIMOORA. *Renewable Energy*, 162, 712-726.
- Amer, M., & Daim, T. U. (2011). Selection of renewable energy technologies for a developing county: a case of Pakistan. *Energy for sustainable development*, 15(4), 420-435.
- Bai, C. ve Sarkis, J. (2013) "A Grey-Based DEMATEL Model For Evaluating Business Process Management Critical Success Factors", *International Journal of Production Economics*, 146(1): 281–292.
- Barry, M. L., Steyn, H., and Brent, A. 2011. Selection of renewable energy technologies for Africa: Eight case studies in Rwanda, Tanzania and Malawi. *Renewable Energy*, 36(11), 2845-2852.

- Beccali, M., Cellura, M., & Mistretta, M. (2003). Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renewable energy*, 28(13), 2063-2087.
- Bento, N., Borello, M., & Gianfrate, G. (2020). Market-pull policies to promote renewable energy: A quantitative assessment of tendering implementation. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119209.
- Bozkurt, R. (1998). *Kalite iyileştirme araç ve yöntemleri* (630). Basım Yeri: Milli Prodüktivite Merkezi Yayınları.
- Georgopoulou, E., Lalas, D., & Papagiannakis, L. (1997). A multicriteria decision aid approach for energy planning problems: The case of renewable energy option. *European Journal of Operational Research*, 103(1), 38-54.
- Güler, Ö. (2009). Wind energy status in electrical energy production of Turkey. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(2), 473-478.
- Haralambopoulos, D. A., and Polatidis, H. 2003. Renewable energy projects: structuring a multi-criteria group decision-making framework. *Renewable energy*, 28(6), 961-973.
- IEA. 2013. *CO2 Emissions From Fuel Combustion* (2013 Edition).
- Irfan, M., Zhao, Z. Y., Rehman, A., Ozturk, I., and Li, H. 2020a. Consumers' intentionbased influence factors of renewable energy adoption in Pakistan: a structural equation modeling approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-14.
- Jabeen, G., Yan, Q., Ahmad, M., Fatima, N., and Qamar, S. 2019. Consumers' intentionbased influence factors of renewable power generation technology utilization: a structural equation modeling approach. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117737.
- Kabak, M., & Dağdeviren, M. (2014). Prioritization of renewable energy sources for Turkey by using a hybrid MCDM methodology. *Energy conversion and management*, 79, 25-33.
- Kahraman, C., Kaya, İ., & Cebi, S. (2009). A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy process. *Energy*, 34(10), 1603-1616.
- Kaya, T., and Kahraman, C. 2010. Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul. *Energy*, 35(6), 2517-2527.
- Kim, H., Park, E., Kwon, S. J., Ohm, J. Y., & Chang, H. J. 2014. An integrated adoption model of solar energy technologies in South Korea. *Renewable Energy*, 66, 523-531.
- Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., and Bansal, R. C. 2017. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 596-609.
- Lee, H. C., & Chang, C. T. (2018). Comparative analysis of MCDM methods for ranking renewable energy sources in Taiwan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 883-896.
- Ligus, M., & Peternek, P. (2018). Determination of most suitable low-emission energy technologies development in Poland using integrated fuzzy AHP-TOPSIS method. *Energy Procedia*, 153, 101-106.
- Nigim, K., Munier, N., & Green, J. (2004). Pre-feasibility MCDM tools to aid communities in prioritizing local viable renewable energy sources. *Renewable energy*, 29(11), 1775-1791.
- Özcan, E. C., Ünlüsoy, S., & Eren, T. (2017). A combined goal programming–AHP approach supported with TOPSIS for maintenance strategy selection in hydroelectric power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1410-1423.
- Polatidis, H., Haralambopoulos, D. A., Munda, G., Vreeker, R. 2006. Selecting an appropriate multi-criteria decision analysis technique for renewable energy planning. *Energy Sources, Part B*, 1(2), 181-193.
- Rani, P., Mishra, A. R., Pardasani, K. R., Mardani, A., Liao, H., & Streimikiene, D. (2019). A novel VIKOR approach based on entropy and divergence measures of Pythagorean fuzzy sets to evaluate renewable energy technologies in India. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117936.

- Ren, J., & Sovacool, B. K. (2015). Prioritizing low-carbon energy sources to enhance China's energy security. *Energy conversion and management*, 92, 129-136.
- Solangi, Y. A., Tan, Q., Mirjat, N. H., & Ali, S. (2019). Evaluating the strategies for sustainable energy planning in Pakistan: An integrated SWOT-AHP and Fuzzy-TOPSIS approach. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117655.
- Stanek, W., Mendecka, B., Lombardi, L., & Simla, T. (2018). Environmental assessment of wind turbine systems based on thermo-ecological cost. *Energy*, 160, 341-348.
- Štreimikienė, D., Šliogerienė, J., & Turskis, Z. (2016). Multi-criteria analysis of electricity generation technologies in Lithuania. *Renewable energy*, 85, 148-156.
- Şengül, Ü., Eren, M., Shiraz, S. E., Gezder, V., & Şengül, A. B. (2015). Fuzzy TOPSIS method for ranking renewable energy supply systems in Turkey. *Renewable energy*, 75, 617-625.
- Wu, W.W. ve Lee, Y.T. (2007) "Developing Global Managers' Competencies Using The Fuzzy DEMATEL Method", *Expert Systems with Applications*, 32(2): 499507.
- Yücenur, G. N., Çaylak, Ş., Gönül, G., & Postalçioğlu, M. (2020). An integrated solution with SWARA&COPRAS methods in renewable energy production: City selection for biogas facility. *Renewable Energy*, 145, 2587-2597.
- Zheng, G., & Wang, X. (2020). The comprehensive evaluation of renewable energy system schemes in tourist resorts based on VIKOR method. *Energy*, 193, 116676.



Türkiye İnşaat Sektörü İş Kazalarının İstatistiksel Analizi, 2011-2020

Statistical Analysis of Occupational Accidents in the Turkish Construction Industry, 2011-2020

Mehmet Ali Zengin¹

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Havza Meslek Yüksekokulu, İş Sağlığı ve Güvenliği Programı, 55700, Samsun, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 13/12/2021

Kabul / Accepted: 22/06/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

İnşaat sektörü ülke ekonomilerine önemli katkı yapmasına rağmen iş kazalarının çok sık görüldüğü bir sektördür. İnşaat sektöründe meydana gelen iş kazaları ile diğer sektörlerle karşılaştırırken sadece sayılar üzerinden bir karşılaştırma yapmak doğru değildir. Bu nedenle gerçekleştirilen karşılaştırmaların ulusal ve uluslararası otoriteler tarafından kabul görmüş karşılaştırma ölçütleri ile yapılması gerekmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada 2011 ile 2020 tarihleri arasında inşaat sektörü ve inşaat sektörü dışında kalan tüm sektörlerde meydana gelen iş kazalarının, “kaza sıklık hızı”, “kaza ağırlık hızı”, “ölümlü kaza sıklık hızı” parametreleri ile karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bulguları kapsamında, kaza sıklık hızlarının 10 yıllık ortalaması hesaplandığında inşaat sektöründeki 3 faaliyetin 1.000.000 iş saatinde ortalama 7,96 kaza meydana gelirken diğer 85 faaliyette ortalama 6,86 kaza meydana geldiği belirlenmiştir. Özellikle 2018 yılında inşaat sektöründe çalışan her 100 kişiden yaklaşık 5’i iş kazasına maruz kalmıştır. İnşaat sektöründe iş kazası sonucu ölüm oranlarının da çok yüksek olduğu tespit edilmiştir. Değerlendirme yapılan yıllar itibarıyla iş kazası sonucu ölen her üç sigortalıdan biri inşaat sektöründe çalışmaktadır. Sonuç olarak inşaat sektörünün irdelenen tüm parametrelerde diğer tüm sektörlerden daha yüksek olduğu belirlenmiş ve çözüme yönelik öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler

“İş Güvenliği, İnşaat Sektörü, Kaza Sıklık Hızı, Kaza Ağırlık Hızı, Ölümlü Kaza Sıklık Hızı”

Abstract

Although the construction sector makes a significant contribution to the national economy, it is a sector where work accidents are very common. When comparing work accidents in the construction sector with other sectors, it is not correct to make a comparison only on numbers. For this reason, comparisons should be made with comparison criteria accepted by national and international authorities. In the study carried out, the comparison of work accidents that occurred in the construction sector and all sectors except the construction sector between 2011 and 2020 with the parameters of “Incidence rate of occupational injuries”, “Weight rate of occupational injuries”, “Incidence rate of fatal occupational injuries” was carried out. Within the scope of the findings of the study, when the 10-year average of the Incidence rate of occupational injuries is calculated, it has been determined that while an average of 7.96 accidents occur in 1.000.000 working hours in the construction sector, an average of 6.86 accidents occur in other sectors. Especially in 2018, about 5 out of every 100 people working in the construction industry were exposed to work accidents. It has been determined that death rates as a result of work accidents in the construction sector are also very high. As of the years of evaluation, one out of every three insured people who died as a result of work accident works in the construction sector. As a result, it has been determined that the construction sector is higher than all other sectors in all parameters examined and suggestions for solutions are presented.

Key Words

“Occupational Safety, Construction Sector, Incidence Rate of Occupational Injuries, Weight Rate of Occupational Injuries, Incidence rate of fatal occupational injuries”

1. Giriş

İnşaat sektörü; ülke ekonomilerine yaptığı katkılardan (istihdam, vergi, milli gelir vb.) dolayı, genel ekonomi içerisinde önemli bir paya sahiptir. Ayrıca inşaat sektörünün çarpan etkisi çok yüksek olduğundan doğrudan ve dolaylı olarak birçok sektörü etkilemektedir. AB-28 ülkelerinde 2018 yılında brüt katma değer ekonomik faaliyete göre dağılımına bakıldığında inşaat sektörünün payı %5,6 iken Türkiye’de GSYH’yi oluşturan sektör faaliyetleri içinde inşaat sektörünün payı %8,0’i oluşturmaktadır (TÜİK, 2019). Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) yıllık istatistiklerine göre Türkiye’de inşaat sektöründe iş kazaları sonucunda meydana gelen ölüm ve iş göremezlik vaka sayıları diğer sektörler ile karşılaştırıldığında daha yüksek olduğu görülmektedir. Ölümlü iş kazası sayıları, geçici/sürekli iş göremezlik sayıları bakımından inşaat sektörü Türkiye’de faaliyet gösteren sektörler içerisinde ilk sırada yer almaktadır.

Türkiye’de inşaat sayılarındaki artış, iş kazası miktarlarını da doğrudan ilgilendirmektedir. İnşaat sahalarında gerekli tedbirlerin alınmaması, çalışanların aşırı özgüveni, yoğun mesai çalışmaları, İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) ile ilgili yeterli sayıda ve düzeyde eğitimlerin verilmemesi gibi nedenler inşaat sektöründe iş kazalarını tetiklemektedir (Uzdil ve Güllüoğlu, 2020). İnşaat sektöründe var olan risklerin en aza indirilmesi için mevcut yasalarla İSG’yi ilgilendiren tüm taraflara (işçi, işveren ve devlet) çeşitli görev ve sorumluluklar verilmiştir. Ancak yeterli tedbirlerin alınmaması nedeniyle iş kazaları meydana gelmekte ve sonrasında ölüm ve yaralanmalar yaşanmaya devam etmektedir (Çavuş, 2016).

İş kazası dünyanın her yerinde karşılaşılan gerek maddi gerekse manevi açıdan toplumun genelini etkileyen büyük bir sorundur. SGK verilerine göre inşaat sektörü imalat, makine/metal, taşımacılık, madencilik sektörleriyle birlikte iş kazasının en sık yaşandığı ve dolayısıyla ölümlü iş kazası sayılarının fazla olduğu sektörlerden birisidir. Özellikle Türkiye’de inşaat faaliyetlerinin asıl işveren - alt işveren ilişkisi kapsamında yürütülmesi ve inşaat alanlarında birden fazla firma ve işveren olması sebebiyle İSG ile ilgili tedbirlerinin alınması, bu tedbirlerin uygulanması ve denetlenmesi güçleşmektedir. Buna ilave olarak işverenlerin İSG faaliyetlerine harcanan maliyetleri gereksiz ekonomik yük olarak görmeleri ve çalışanların da İSG ile ilgili yeterli eğitim ve bilince sahip olmaması iş yerlerinde meydana gelen kazaların en temel sebeplerindedir (Yağimli ve Hacıbektaşoğlu, 2018).

İnşaat sektörü; ülke ekonomisine sağladığı büyük katkıların yanında, çalışma koşullarının oldukça zor olduğu dinamik bir sektördür (Bilim ve Çelik, 2018). İnşaat çalışanları; dış hava şartlarının olumsuzluklarının, aşırı ekipman ağırlığının ve bunların gürültülerinin, yükte çalışmanın getirdiği risklerin, kimyasal-fiziksel ve psikolojik risklerin çok yüksek olduğu ortamlarda çalışmak zorundadır (Mohammed and Shamsul, 2017). Bu risklerin her biri iş kazasına sebep olabilecek özelliktedir.

Türkiye’de 2014 ve 2015 yıllarında yaşanan iş kazaları sonuçlarına göre, nitelik gerektirmeyen işlerde daha fazla iş kazası yaşandığı ve ölüm sayısının fazla olduğu tespit edilmiştir (Gümüş, 2017). Ayrıca yapılan araştırmalarda iş kazasına uğrayanların çoğu 22-44 yaş aralığında erkek, tecrübesiz ve düşmeden kaynaklı yaralanmaların olduğu (Betsis, vd., 2019), iş kazalarının sabah ve öğleden sonraki zaman dilimlerinde daha fazla meydana geldiği belirlenmiştir (Bayram, 2018).

SGK verilerine göre; Türkiye’de iş kazaları ve sonrasında iş görmezlik durumları, meslek hastalıklarında yıllar bazında genel trend olarak artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Birçok meslek hastalığının kayıt altına alınmadığı dikkate alınırsa olumsuz bir durumun olduğu ifade edilebilir (Çavuş, 2016).

İnşaat sektöründe çalışan sayısının sürekli değişmesi, zaman baskısı, eğitim düzeyi düşük çalışanların yoğun bir şekilde istihdam edilmesi, düşük ekonomik güce sahip işverenlerin çokluğu gibi kendi doğasından kaynaklanan birçok risk bulunmaktadır. Bu nedenle yaşanan kazaların meydana gelme nedenlerinin sınıflandırılması ve meydana gelme sıklıklarının bulunması hangi nedenlerin ilk olarak bertaraf edileceğinin belirlenmesini mümkün kılacaktır (Hacıbektaşoğlu, 2018).

İnşaat sektörü gerek ülkemizde gerekse dünyada kabul edildiği gibi riskli bir sektördür. İnşaat sektörü ile diğer sektörlerin iş kazaları açısından karşılaştırılması ve inşaat sektöründe var olan risklerin şiddetinin ortaya konulması alınacak önlemlerin belirlenmesi açısından önem arz etmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada inşaat sektörü verileri ile Türkiye’deki diğer tüm sektör verilerinin iş kazaları açısından karşılaştırılmasıyla ortaya konulan sonuçlar inşaat sektörüne neden daha hassas yaklaşılması gerektiğini gösteren önemli ipuçları vermektedir.

Çalışmanın amacı, 2011 ile 2020 tarihleri arasında inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının uluslararası kabul görmüş, “kaza sıklık hızı”, “kaza ağırlık hızı”, “ölümlü kaza sıklık hızı” diğer sektörlerin parametreleri ile karşılaştırma yapmaktır. Çalışmada yukarıda bahsedilen parametrelerin hesaplanmasında kullanılan ve sunulan veriler, SGK istatistik yıllıklarından alınmıştır. Çalışma yılları içindeki değişimin daha net görülebileceği 10 yıllık veriler kullanılarak inşaat sektörü ve diğer tüm sektörlerin uluslararası kabul görmüş parametrelerce karşılaştırılması açısından önem arz etmektedir. Sonuç olarak, genelde iş kazalarının özeldede inşaat sektöründe yaşanan kazaların azaltılması için önerilerde bulunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada SGK tarafından düzenli olarak yayımlanan 2011-2020 yılları arasındaki inşaat sektörü istatistikleri ile Türkiye genelindeki diğer tüm sektörlerdeki veriler uluslararası kabul görmüş parametreler ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Türkiye

genelindeki tüm kaza verilerinden inşaat sektörü verileri çıkarılarak kalan işletmelerin istatistik verileri elde edilmiştir. SGK tarafından en son yayınlanan istatistik yıllığı 2020 yılına ait olduğu için çalışma kapsamına en son 2020 yılı verilerine kadar olan veriler dahil edilmiştir. Bununla birlikte değerlendirmede kullanılacak uluslararası parametrelerin gerek inşaat sektöründe gerekse Türkiye’deki diğer tüm sektörlerdeki yıllar içerisindeki değişimini ortaya koyabilmek için son 10 yıllık veriler kullanılmıştır.

Ülkemizdeki inşaat sektöründe faaliyet gösteren işletmeler Avrupa Birliği istatistik ofisi tarafından hazırlanan ve iki haneli olarak belirtilen Ekonomik Faaliyet Sınıflamasına (Nace) göre birbirlerinden ayrılmaktadır. Bu sınıflama doğrultusunda: Bina inşaatı kapsamındaki faaliyet gösteren işletmeler 41, bina dışı yapıların inşaatı kapsamındaki faaliyet gösteren işletmeler 42, özel inşaat faaliyetleri kapsamındaki işletmeler 43 Nace koduna sahiptir (nace rev.2-altılı, 2022). İnşaat sektöründe faaliyet gösteren farklı ekonomik faaliyet sınıfına giren işletmelerin 2011- 2020 yıllarına ait işletme sayıları Tablo 1’de verilmiştir. 10 yıllık verilere göre Türkiye’deki işletmelerin ortalama %10,81’i inşaat sektöründe faaliyet göstermektedir. Çalışmamızda bulgular bölümündeki İnşaat sektörü ile ilgili istatistikler hesaplanırken üç faaliyet koduna giren işletmelerin toplam bilgileri (çalışan sayısı, iş kazası sayısı, ölümlü kaza sayısı vb.) kullanılmıştır.

Tablo 1. Ekonomik faaliyet sınıfına göre inşaat sektöründeki işletmelerin sayısı

Yıllar	(41) Bina İnşaatı	(42) Bina Dışı Yapıların İnşaatı	(43) Özel İnşaat Faaliyetleri	Toplam (41+42+43)	Türkiye Geneli İşletme Toplamı	Türkiye Genelindeki Oranı
2011	116.679	12.763	48.436	177.878	1.435.879	12,39
2012	118.035	13.830	54.068	185.933	1.538.006	12,09
2013	111.117	14.223	56.575	181.915	1.611.292	11,29
2014	119.686	14.055	52.560	186.301	1.679.990	11,09
2015	128.477	15.053	54.701	198.231	1.740.187	11,39
2016	126.915	14.438	54.637	195.990	1.749.240	11,20
2017	142.241	14.684	57.219	214.144	1.874.682	11,42
2018	115.739	13.445	56.464	185.648	1.879.771	9,88
2019	90.389	11.549	53.999	155.937	1.891.512	8,24
2020	111.308	11.917	55.958	179.183	1.960.911	9,14

Kaynak: SGK istatistiklerinden derlenerek düzenlenmiştir.

SGK tarafından yayınlanan 2020 yılı “İş Kazası ve Meslek Hastalıkları İstatistikleri” incelendiğinde Ekonomik Faaliyet Sınıflamasına göre 88 farklı faaliyet bulunmaktadır. Bu faaliyetlerden 3 tanesi inşaat sektörü ile ilgiliyken diğer 85 faaliyet inşaat sektörü dışında faaliyet göstermektedir. Çalışmamız kapsamında inşaat sektöründeki 3 faaliyet ile inşaat sektörü dışındaki 85 faaliyet (diğer sektörler) bilgileri kullanılarak karşılaştırma gerçekleştirilmiştir.

Ülkelerin mevzuatlarındaki farklılıklar nedeni ile iş kazaları ile ilgili istatistiklerin hazırlanması kapsamında kullanılan yöntemlerde farklılıklar olabilmektedir. Bu ve benzeri farklılıkları azaltmak için, Cenevre’de gerçekleştirilen 16. Uluslararası Çalışma İstatistikçileri Konferansında (ICLS) sıklık oranları, şiddet oranları, yaralanma başına kaybedilen kayıp gün sayıları gibi istatistik terimlerin tanımları yapılmıştır (ILO, 1998). Çalışma kapsamında inşaat sektörünün Türkiye’deki geriye kalan diğer tüm sektörler ile karşılaştırılmasında, ulusal ve uluslararası düzeyde kabul görmüş ve bilgilerin karşılaştırılmasında kullanılan “kaza sıklık hızı”, “kaza ağırlık hızı” ve “ölümlü kaza sıklık hızı” kullanılmıştır. Aşağıda bu kavramlar ile ilgili temel bilgiler ve eşitlikler verilmiştir.

Kaza Sıklık Hızı (Oranı): Bir yıl içerisinde çalışılan her 1.000.000 iş saatinde karşılık gelen kaza sayısı sayısını belirtmek için kullanılan kaza sıklık hızı, İngiltere Sağlık ve Güvenlik İdaresi (HSE)’nin 1999 yılında hazırladığı terimler sözlüğünde Eşitlik 1 ile hesaplanmaktadır (Aritan ve Ataman, 2017). Eşitlikte var olan “Toplam insan saat çalışma sayısı” bir yıl içerisinde tahakkuk eden toplam çalışılan gün sayısının günlük çalışma saati olan 8 ile çarpılması ile elde edilmiştir.

$$\text{Kaza Sıklık Hızı(Oranı)} = \frac{\text{Yıllık Kaza Sayısı}}{\text{Toplam İnsan Saat Çalışma Sayısı}} \times 1.000.000 \quad \text{Eşitlik 1}$$

Kaza Ağırlık Hızı (Oranı): Bir yıl içerisinde meydana gelen mesleki yaralanmalardan dolayı oluşan toplam kayıp gün sayısının, aynı yıl içerisinde ilgili gruptaki işçilerin toplam çalışma saatinde bölünüp 1.000.000 katsayısı ile çarpılmasıyla hesaplanır. Temel olarak kaza ağırlık oranı, bir takvim yılında çalışılan 1.000.000 saatte iş kazaları yüzünden ne kadar iş günü kaybedildiğini gösterir ve Eşitlik 2 ile hesaplanır (Balcı, vd., 2013). Eşitlikte var olan “Kazalardan dolayı yıllık kayıp gün sayısı”: (Geçici iş göremezlik süreleri)+ (sürekli iş göremezlik dereceleri toplamı x 75) + (ölüm vaka sayısı x 7500) şeklinde hesaplanmaktadır. Eşitlikte bulunan “Toplam insan saat çalışma sayısı” ise “Kaza sıklık hızı” bölümünde anlatıldığı gibi hesaplanmaktadır.

$$Kaza \text{ Ağrlık Hızı(Oranı)} = \frac{Kazalardan \text{ dolayı yıllık kayıp gün sayısı}}{Toplam İnsan Saat Çalışma Sayısı} \times 1.000.000 \quad \text{Eşitlik 2}$$

Ölümlü Kaza Sıklık Hızı (Oranı): Bir yıl içerisinde 100.000 çalışan için meydana gelen ölümlü kaza sayısını gösteren ölümlü kaza sıklık oranı aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır (Ceylan, 2011).

$$\text{Ölümlü Kaza Sıklık Oranı} = \frac{Yıllık Ölümlü Kaza Sayısı}{Toplam İşçi Sayısı} \times 100.000 \quad \text{Eşitlik 3}$$

Gerçekleştirilen çalışmanın bulgular bölümünde yukarıda bahsedilen üç parametre ile ilgili hesaplamalar yapılarak incelenen yıllar bazında inşaat sektörü ile diğer tüm sektör verilerinin karşılaştırılması ortaya konulmuştur.

3. Bulgular

İşletmeleri, sektörleri ve hatta ülkeleri sadece iş kazası/meslek hastalıkları sayılarına bakarak karşılaştırmak doğru bir yaklaşım değildir. Zira Türkiye'nin 2011-2020 yılları arasındaki veriler incelendiğinde yıllık ortalama on üç milyon sigortalı çalışanın olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda on milyon nüfusu dahi olmayan bir ülkenin iş kazası ve meslek hastalık sayıları ile Türkiye'deki kaza ve hastalık sayılarını karşılaştırmak anlamlı sonuçlar vermeyecektir. Benzer şekilde sektörel anlamda da sadece kaza, ölüm, iş göremezlik sayılarına bakarak yapılan karşılaştırmalar doğru sonuçlara ulaşmamızı engeller. Bu nedenlerle karşılaştırmalar yapılırken kaza sayıları üzerinden değil, karşılaştırma yapılacak gruplardaki toplam çalışan sayılarının kazaya uğrayan kişi sayılarına oranları üzerinden yorumlamak gerekmektedir. Bu doğrultuda gerçekleştirilen çalışmada, ulusal ve uluslararası düzeyde kabul görmüş parametreler kullanılmıştır.

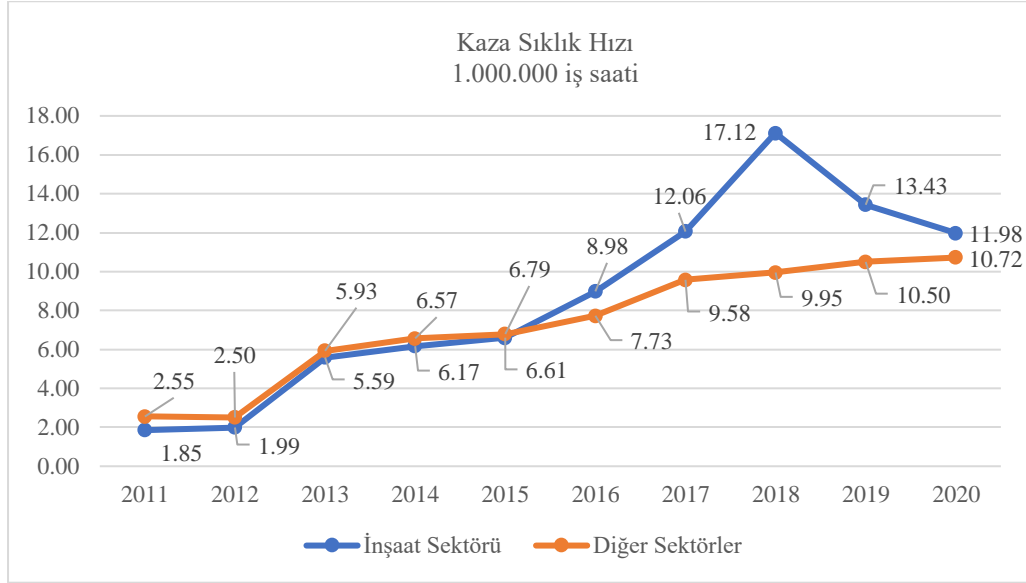
İnşaat sektöründeki ve inşaat sektörü dışındaki diğer sektörlerdeki işletmelerin toplamına ait 2011-2020 yılları “yıllık kaza sayıları” ve “Prim tahakkuk eden gün sayıları” Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 2’de verilen İnşaat sektöründe prim tahakkuk eden gün sayıları SGK tarafından düzenli olarak yayımlanan bilgiler içerisinde bulunmamaktadır. Bu nedenle Türkiye geneli için verilen prim tahakkuk eden gün sayıları, Türkiye genelindeki çalışan sayısına bölünerek bulunan çalışan başına düşen prim tahakkuk eden gün sayısı, inşaat sektöründeki toplam çalışan sayısı ile çarpılarak inşaat sektöründeki toplam prim tahakkuk eden gün sayısı hesaplanmıştır. Her bir yıl için Eşitlik 1 kullanılarak kaza sıklık hızı hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Kaza sıklık hızı bilgileri

Yıllar	Yıllık Kaza Sayısı		Prim Tahakkuk Eden Gün Sayısı		Kaza Sıklık Hızı	
	İnşaat Sektörü	Diğer Sektörler	İnşaat Sektörü	Diğer Sektörler	İnşaat Sektörü	Diğer Sektörler
2011	7.749	61.478	522.240.306	3.010.149.197	1,85	2,55
2012	9.209	65.662	577.899.063	3.277.896.037	1,99	2,50
2013	26.967	164.422	603.082.714	3.466.749.070	5,59	5,93
2014	29.699	191.667	601.939.290	3.646.488.892	6,17	6,57
2015	33.361	208.186	631.295.158	3.830.796.286	6,61	6,79
2016	44.552	241.516	619.823.294	3.904.678.284	8,98	7,73
2017	62.802	296.851	651.083.882	3.873.299.993	12,06	9,58
2018	77.157	353.828	563.344.193	4.442.901.370	17,12	9,95
2019	47.701	374.762	443.858.702	4.463.147.228	13,43	10,50
2020	44.304	339.958	462.200.014	3.963.807.927	11,98	10,72

Yıllar itibarıyla iş kazası geçiren sigortalılarla ilgili istatistiki bilgiler Tablo 2’de yer almaktadır. Buna göre; Türkiye’de 2011 yılında toplam 69.227 iş kazası meydana gelmiş ve bu kazaların 7.749’u inşaat sektöründe olmuştur. İnşaat sektöründe meydana gelen iş kazaların, toplam iş kazaları içerisindeki payı %11 olarak gerçekleşmiştir. İncelemeye alınan 10 yılın veriler dikkatle incelendiğinde en fazla iş kazası 2018 yılında, en az iş kazası ise 2011 yılında gerçekleşmiştir. İş kazası istatistiklerinde dikkat çeken bir diğer durum 2013 yılı verileridir. 2012 yılı verilerine göre 2013 yılında iş kazalarında yaklaşık % 140 artış yaşanmıştır. Aynı artış inşaat sektöründe yaşanan iş kazalarında da olmuştur. Bu denli yüksek artışı açıklayan en önemli gelişme, 2012 yılında yayımlanan 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu’dur. İlgili kanunun uygulanmaya başlanması ile kayıt dışı istihdamda ve kayıt altına alınmayan iş kazalarında azalma yaşanmış ve istatistiklere yansımıştır (Çavdar, vd., 2022). Yıllar itibarı ile bina dışı yapı (karayolu, demiryolu, havaalanı vb.) inşaatlarında ve özel inşaat faaliyetlerinde (havalandırma, yıkım, onarım vb.) yaşanan iş kazası sayıları benzer oranda gerçekleşmiştir. İnşaat sektöründe en fazla bina inşaatlarında iş kazaları yaşanmıştır. Bina inşaatlarının yapımında çeşitli izinlerin zorunlu olarak alınması ve tamamlandıktan sonra tapu müdürlüğüne tescil edilmesi gibi uygulamalar kayıt dışı istihdamı azaltmaktadır. Bu uygulamaların sonucu olarak da yaşanan iş kazalarının kayıt altına alınmasını gerekli kılmaktadır.

Kaza sıklık hızı çalışılan her 1.000.000 iş saatinde meydana gelen iş kazasını tanımlamaktadır. Kaza sıklık hızlarının 10 yıllık ortalamasına bakıldığında inşaat sektöründeki 3 faaliyetin 1.000.000 iş saatinde ortalama 7,96 kaza meydana gelirken diğer 85 faaliyette ortalama 6,86 kaza meydana gelmektedir. Kaza sıklık hızının özellikle 2018 yılında inşaat sektöründe 17,12 olarak hesaplanırken diğer tüm sektörlerde 9,95 olarak hesaplanması en fazla farkın oluşması açısından dikkat çekicidir. İnşaat sektörü gerek ülkemiz için gerekse tüm dünya için lokomotif sektörlerden biri olmasına rağmen sadece bu rakamlara bakılarak bile diğer tüm sektörlerin toplamından daha fazla kaza meydana geldiği dolayısıyla daha hassas yaklaşılması gereken bir sektör olduğu ortaya konulmaktadır. Şekil 1’de yıllara göre ayrışma çok daha net görülmektedir.



Şekil 1. Kaza sıklık hızı karşılaştırması

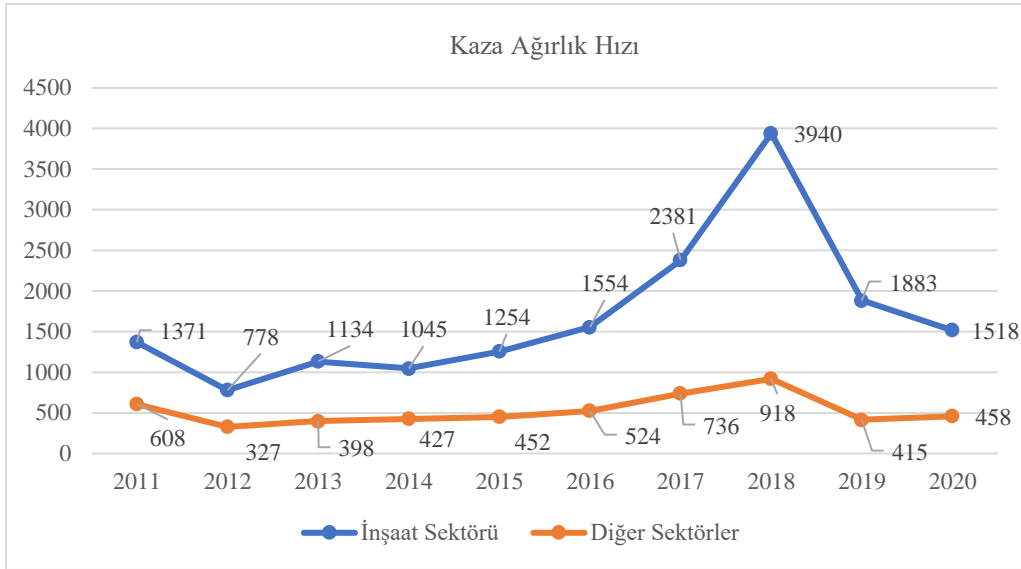
Özellikle 2015 yılından sonra çalışılan her 1.000.000 iş saatinde inşaat sektöründe diğer tüm sektörlerin toplamından daha fazla kaza meydana geldiği anlaşılmaktadır.

2011-2020 yıllarında inşaat sektörü ve diğer tüm sektörler için geçici iş göremezlik süreleri, sürekli iş göremezlik derece toplamları Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Kaza ağırlık hızı bilgileri

Yıllar	Geçici İş Gör. Süreleri(Gün)		Sürekli İş Gör. Derece Toplamı		Kaza Ağırlık Hızı	
	İnşaat Sek.	Diğer Sek.	İnşaat Sek.	Diğer Sek.	İnşaat Sek.	Diğer Sek.
2011	319.209	1.438.213	15.104	62.950	1371	608
2012	309.441	1.337.686	18.261	47.778	778	327
2013	457.437	1.900.068	14.734	38.091	1134	398
2014	358.536	1.707.426	12.185	30.672	1045	427
2015	562.498	2.429.572	29.610	74.223	1254	452
2016	700.908	2.752.794	43.824	90.579	1554	524
2017	838.697	3.158.176	95.470	157.446	2381	736
2018	528.410	1.959.591	170.631	314.150	3940	918
2019	521.203	3.106.731	45.407	78.216	1883	415
2020	504.166	2.988.658	33.400	65.220	1518	458

Kaza ağırlık hızı, bir takvim yılında çalışılan 1.000.000 saatte kaç iş gününün iş kazası nedeniyle kaybedildiğini göstermektedir. Bu hesaplamada kaybedilen günden kasıt, çalışanın iş kazası sonrası doktorun kontrol ettiği günden başlayarak tekrar işbaşı yaptığı gün arasında geçen zamanı ifade etmektedir (Özaslan, 2011). İnşaat sektörünün 10 yıllık kaza ağırlık hızı verileri incelendiğinde çalışılan 1.000.000 saatte iş kazalarından dolayı ortalama 1686 iş günü kaybedilmiştir. Diğer sektörler ile karşılaştırıldığında özellikle 2018 yılında inşaat sektörü kazalardan dolayı 3940 iş günü kayıp etmiştir. Yıllara göre kaza ağırlık hızlarının karşılaştırması Şekil 2’de verilmiştir.



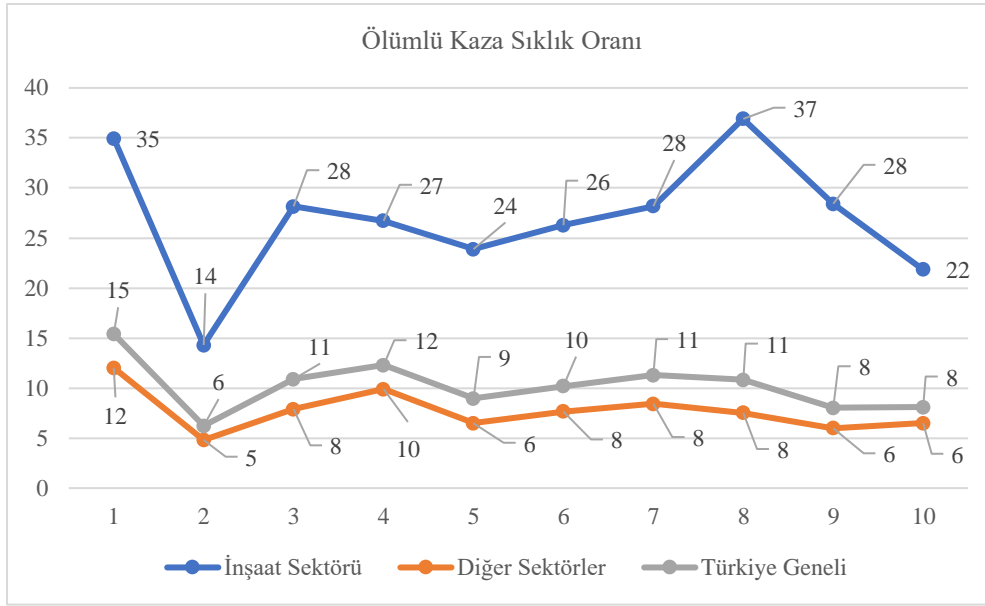
Şekil 2. Kaza ağırlık hızı karşılaştırması

Ölümlü kaza sıklık oranının hesaplanmasında kullanılan ölümlü kazaların sayısı ile toplam çalışan sayıları Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. Ölümlü kaza sıklık oranı bilgileri

Yıllar	Ölümlü Vaka Sayısı		Çalışan Sayıları		Ölümlü Kaza Sıklık Oranı		
	İnşaat Sek.	Diğer Sek.	İnşaat Sek.	Diğer Sek.	İnşaat Sek.	Diğer Sek.	Türkiye Geneli
2011	570	1130	1.630.851	9.400.088	35	12	15
2012	256	488	1.789.487	10.150.133	14	5	6
2013	521	839	1.849.942	10.634.171	28	8	11
2014	501	1125	1.875.929	11.364.193	27	10	12
2015	473	779	1.980.630	12.018.768	24	6	9
2016	496	909	1.887.099	11.888.089	26	8	10
2017	587	1046	2.083.438	12.394.379	28	8	11
2018	591	950	1.601.184	12.627.986	37	8	11
2019	368	779	1.294.788	13.019.525	28	6	8
2020	347	884	1.587.666	13.615.757	22	6	8

İş kazası sonucu ölen sigortalı sayılarının verildiği Tablo 4 incelendiğinde, inşaat sektöründe iş kazası sonucu ölüm oranlarının diğer sektörlerle göre çok yüksek olduğu görülmektedir. Nitekim incelemeye alınan 2011-2020 yılları arasında inşaat sektöründe iş kazası sonucu ölüm oranı %28 ile %38 arasında değişmektedir. Diğer bir ifade ile iş kazası sonucu ölen her üç sigortalıdan biri inşaat sektöründe çalışmaktadır. Örneğin; incelenen yıllar içerisinde Türkiye geneli ölümlü iş kazası oranının en yüksek olduğu 2014 yılında toplam 1.626 sigortalı çalışan iş kazası sonucu hayatını kaybetmiş ve bu hayatını kaybedenlerin 501’i inşaat sektöründe çalışmaktadır. Yıllar bazında ölümlü kaza sıklık oranlarının karşılaştırılması Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. Ölümlü kaza sıklık oranı karşılaştırması

Sosyal Güvenlik Kurumu istatistiklerine göre, 5510 Sayılı Kanun'un 4-1/a Maddesi kapsamındaki inşaat sektörü ve diğer sektörlerdeki sigortalı sayıları incelenen yıllara göre Tablo 4'de verilmiştir. Buna göre; 2011 yılında toplam sigortalı sayısı 11.030.939 kişidir. Bu sigortalıların 1.630.851'i inşaat sektöründe çalışmaktadır. Diğer bir ifade ile; toplam sigortalı çalışanların %14,78'i inşaat sektöründe çalışmaktadır. 2020 yılında ise toplam sigortalı çalışan sayısı 15.203.423'e yükselmiş ve bu çalışanların 1.587.666'i inşaat sektöründe çalışmaktadır. İnşaat sektöründe sigortalı çalışanların toplam sigortalı çalışanlar içerisindeki payı 2018 yılına kadar yaklaşık %14 olarak gerçekleşmiş ancak bu yıldan itibaren düşüş yaşanmaya başlamış ve 2020 yılında %10,44'e gerilemiştir. Yıllar itibarı ile hiç değişmeyen durum ise inşaat sektöründe sigortalı çalışanların daha çok bina inşaatlarında çalışmalarıdır.

Türkiye'de inşaat sektöründe yaşanan kaza sıklığı değerleri ile Avrupa Birliği üye ülkeleri ortalamaları ile yıllar bazında karşılaştırıldığında yaklaşık iki kat yüksek çıkmaktadır (Güllüoğlu ve Güllüoğlu, 2019). Özellikle 2012 yılında çıkarılan İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'ndan sonra iş kaza kayıtlarının ciddi olarak tutulmaya başlanması ile kaza sıklığı değerlerinde belirgin bir artış görülmektedir. 2012 yılında Türkiye'de inşaat sektöründe 74.871 iş kazası yaşanırken, 2013 yılında 191.389 kişi iş kazasına maruz kalmıştır. Ayrıca 2011 yılında inşaat sektöründe her yüz bin sigortalı çalışandan 510'u iş kazası geçirirken 2018 yılında bu oran 4.826'lara kadar çıkmaktadır. Ölümlü kaza sıklığı değerleri Avrupa Birliği üyeleri ile karşılaştırıldığında da ülkemiz açısından durum çok farklıdır. 2016 yılında inşaat sektöründeki her yüz bin çalışandan İngiltere'de 2,04'ü, Almanya'da 3,10'u ve Türkiye'de 26,28'i yaşamını yitirmektedir. Türkiye'de ölümlü iş kaza oranı Avrupa Birliği üye ülkeleri ortalamasının (5,80) dört katının üzerindedir (Güllüoğlu ve Güllüoğlu, 2019). Türkiye'de meydana gelen iş kaza sonuçlarının bu denli yüksek olması, çalışanların eğitim seviyelerinin düşük olması ile doğrudan ilişkilidir. Ayrıca inşaat sektöründe çalışanların fazla cesaretli olması, kendilerine aşırı güvenmeleri ile 'bana bir şey olmaz' söylemleri, yaşanan kazaları 'kader' olarak değerlendirmeleri, iş güvenliği konusunda bilgi ve kültürün olmaması iş kazalarının nedenleri arasındadır.

4. Sonuç ve Öneriler

Karşılaştırma yapılan 2011-2020 yılları arasında iki grup arasında kaza sıklık hızları bakımından 2015 yılına kadar birbirine yakın oranlar söz konusu iken 2016 yılı ve sonrasında inşaat sektörünün diğer tüm sektörler karşısında kaza sıklık oranının arttığı görülmektedir. 2016 yılında inşaat sektöründeki 3 alt sektörün 1.000.000 iş saatinde ortalama 8,98 kaza meydana gelirken diğer 85 faaliyette ortalama 7,73 kaza meydana gelmektedir. 2018 yılında inşaat sektöründe 1.000.000 iş saatinde 17,12 kaza meydana gelirken diğer sektörlerin tamamında 9,95 kaza ile en fazla farkın olduğu yıl olmuştur.

Bir takvim yılında çalışılan 1.000.000 saatte kaç iş gününün iş kazası nedeniyle kaybedildiğini gösteren kaza ağırlık hızı bakımında iki grup karşılaştırıldığında ise inşaat sektörünün karşılaştırma yapılan tüm yıllarda diğer sektörlerin toplamından daha fazla iş kazası nedeniyle iş günü kaybettiğini göstermektedir. Kaza ağırlık hızı kapsamında da 2018 yılı iki grup arasında en büyük farkın olduğu yıldır. 2018 yılında bir takvim yılında çalışılan 1.000.000 saatte 3.940 iş günü kaybederken diğer tüm sektörler 918 iş günü kaybetmiştir. Ülkemiz için lokomotif sektörler arasında sayılan inşaat sektöründe iş kazaları nedeniyle diğer tüm sektörlerden daha fazla iş günü kaybedilmesi inşaat sektöründe İSG tedbirleri konusunda daha hassas olunması gerektiğini göstermektedir.

100.000 çalışanda ölümlü kaza geçiren çalışan sayısını gösteren ölümlü kaza sıklık oranı bakımından iki grup karşılaştırıldığında özellikle 2018 yılından inşaat sektöründe meydana gelen ölümlü kaza geçiren çalışan sayısının diğer tüm sektörlerden yüksek olduğu

görülmüştür. Bu anlamda 2018 yılında meydana gelen toplam 1541 ölümlü kazanın 591'i(%38) inşaat sektöründe meydana gelmiştir. Bir yıl içerisinde 100.000 çalışan için meydana gelen ölümlü kaza sayıları bakımından incelendiğinde ise, incelenen tüm yıllarda inşaat sektörünün diğer tüm sektörlerden daha yüksek ölümlü kaza sıklık oranına sahip olduğu görülmüştür.

İnşaat sektörü ülkemizde olduğu gibi tüm dünyada tehlikeli sektörler arasında yer almaktadır. Türkiye'deki inşaat sektörünün, İSG mekanizmalarının sağlıklı bir şekilde çalıştığı ABD, İtalya ve İspanya gibi ülkelerle kıyaslandığında, çok daha tehlikeli olduğu görülmektedir. Bununla birlikte bizden teknolojik açıdan daha geride olduğunu söyleyebileceğimiz Macaristan ve Bulgaristan gibi ülkelerin inşaat sektöründeki kaza sıklığının daha düşük olması dikkat çekicidir (Ceylan, 2014).

Ülkelerin veya işletmelerin İSG karnelerini incelenirken sadece sayılara bakmak doğru sonuçlara ulaşmamızı engelleyecektir. Bu doğrultuda günümüz İSG'nin geleneksel anlayıştan uzaklaşarak, daha güncel bir yaklaşımla ele alınmaya başlandığını söylemek mümkündür. Bu nedenle, gerek ülkelerin gerekse işletmelerin İSG bilgilerinin karşılaştırılması gerek çalışanların gerek işletmelerin gerekse ülkelerin İSG'ye ilişkin algılarının olumlu yönde değişmesine yardımcı olacaktır.

Her sektör için benzer iş güvenliği tedbirlerin alınması doğru bir yaklaşım olmadığı gibi uygulanması da güçtür. İş kazalarının yoğun olduğu inşaat, maden ve elektrik gibi sektörlerin kendine özgü standartları ve iş güvenliği tedbirlerinin oluşturulması, uygulanması gerekmektedir. Örneğin inşaat sektöründe en fazla iş kazasına neden olan faktörlerin başında yüksekte düşme gelmektedir. 2011-2020 yılları arasında yaşanan 4.710 ölümlü iş kazasının %39,9'i yüksekte düşme sonucunda meydana gelmiştir. Düşme şeklinde meydana gelen kazalarını engelleme konusu İSG mevzuatında önemle üzerinde durulan bir konu olmasına rağmen kazalar meydana gelmeye devam etmektedir. Özellikle yüksekte yapılan çalışmalarda emniyet kemeri gibi kişisel koruyucu donanımların(KKD) kullanma alışkanlığının artırılması, asansör, merdiven ve benzeri şaft boşluklarının kapamalar, emniyet şeritleri vb. aracılığı ile kapatılması, gereken yerlerde korkulukların yapılması, uyarıcı levhaların kullanılması ve özellikle gece çalışmalarında yeterli aydınlatmanın yapılarak sağlıklı görüş imkanının sağlanması alınacak önemli önlemler arasındadır. Bu önlemlere ilaveten; yüksekte yapılacak çalışmalar için yaş, tecrübe ve fiziki yeterlilik gibi özel şartların getirilmesi yaşanacak kazaların azalmasına önemli katkı sağlayacaktır.

İnşaat sahalarında çalışanların yüksekte düşmelerini önleyici KKD'leri yaygın olarak kullanmadıkları görülmektedir. Bu kapsamda firmaların çalışanların bu bakış açılarını değiştirmek ve KKD'lerin önemini vurgulamak için çeşitli iletişim yollarını denemesi gerekmektedir. Bu kapsamda kullanılması gereken KKD'ler belirlendikten sonra kullanımları konusunda uygulamalı eğitimleri verilmelidir. Verilen eğitimlerin periyodik olarak tekrar edilmesi ve denetlenmesi kullanım sıklığını arttıracaktır. Bununla birlikte KKD kullanımı yasal olarak zorunlu olmasına rağmen çalışanlar KKD kullandıklarında işveren tarafından desteklenmeyi beklemektedirler. Bu nedenle düzenli olarak KKD kullanan çalışanların işveren tarafından ödüllendirilmesi KKD kullanım sıklığının artırılmasına fayda sağlayacaktır.

İnşaat sektöründe kaza sayılarının fazla olmasının bir diğer nedeni çalışanların eğitim seviyeleridir. Son 10 yıllık veriler incelendiğinde inşaat sektöründe kazaya maruz kalan çalışanların ortalama % 65'i ortaokul ve altında eğitim seviyesine sahiptir. İSG eğitimleri verilirken formel eğitimin yanı sıra uygulamalı olarak eğitim gerçekleştirilmesi çalışanların eğitimi daha kolay anlamasına yardımcı olacaktır. Öğrenmenin %83'ü görsel olarak gerçekleşmektedir. Eğitimlerde doğru görsellerin kullanılması verilen eğitimlerin daha iyi anlaşılmasına fayda sağlayacaktır. Eğitim organize edilirken, eğitim kapsamında verilen bilgileri çalışanların kendi deneyimleri ile ilişkilendirmelerine olanak tanınmalıdır. Çalışanların öğrenme becerileri sürekli olarak güncellenmelidir. Öğrenme becerileri arasında öğrenmenin planlanması, öğrenme teknikleri ve kişinin kendine has öğrenme stilini bilmek vardır. Bu nedenle eğitimcilerin de eğitim verdikleri çalışanların öğrenme stillerini bilmesi ve o stile göre eğitimi planlaması eğitimin daha verimli geçmesine fayda sağlayacaktır.

İSG multidisipliner bir çalışma alanı olduğu için bu alana dahil olan tüm tarafların (işçi, işveren, devlet) katılımını gerektirmektedir. Çalışanlar sadece işletmelerde ürün/hizmet üretmesi açısından değil toplum açısından da önemli yapı taşlarıdır. Bu nedenle, İSG alanında etkili sonuçlar verebilecek uygulamaların işletmeler için önemli olduğu kadar toplum ve dolayısıyla devlet içinde önem arz etmektedir.

Türkiye'de İSG faaliyetleri, 2012 yılı sonrasında 6331 sayılı kanun ile desteklenmesine rağmen halen en büyük eksikliğimiz işçisinde, memurunda, ev hanımında, öğrencisinde fark etmeksizin İSG bilincinin ve güvenlik kültürünün oluşturamamış olunmasıdır. Bu problemi çözmeyenin tek yolu her kademede sağlanacak eğitim faaliyetlerinin gerçekleştirilmesidir. Eğitim faaliyetleri okul öncesi İSG ile ilgili çizgi film, oyun vb. uygulamalarla başlamalı sonrasında tüm eğitim kademelerine dengeli dağıtılarak çalışma hayatında da devam etmelidir (Gözüak ve Ceylan, 2021; Koçali, 2021). Çalışma hayatında sadece teknik eğitimlere değil İSG tiyatrosu gibi görsel aktivitelere yer verilmesi çalışan tabanında da farkındalığın artırılmasına yardımcı olacaktır.

İSG teknik bir çalışma konusu olduğu kadar sosyolojik alanda da faaliyet göstermektedir. İncelenen yıllar arasında inşaat sektöründe 4.710 çalışan, Türkiye genelinde ise 13.639 çalışan hayatını kaybetmiştir. Meydana gelen ölümlü kazalar sosyolojik olarak değerlendirildiğinde belirtilen bu sayılar buz dağının görünen yüzünü oluşturmaktadır. Zira meydana gelen ölümlü kazadan kazazedenin ailesi(anne, baba, kardeş, eş, çocuklar), akrabaları, arkadaşları belirli oranlarda etkilenmektedir. Bu durum İSG'nin toplum sağlığını korumaya yönelik çalışmalar yaptığını desteklemektedir. Bu nedenle gelecekteki çalışmalar meydana gelen kazaların sosyolojik etkilerini inceleyebilirler.

Referanslar

- Aritan, A. E., & Ataman, M. (2017). Kaza oranları hesaplamalarıyla iş kazası analizi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17(1), 239-246. doi: 10.5578/fmbd.51762
- Balcı, B., Taçkın, E., Balcı, E. Ö., & Yerden, A. (2013). İş kazalarında mali kayıplar. İstanbul Sosyal Bilimler Dergisi, (6), 66-83.
- Bayram, S. (2018). Şantiyelerde yaşanan güncel iş kazaları, çalışan farkındalıkları ve eğitim seviyeleri arasındaki ilişki. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33(1), 241-252.
- Betsis, S., Kalogirou, M., Aretoulis, G.N., & Pertzimidou, M. (2019). Work accidents correlation analysis for construction projects in Northern Greece 2003–2007: a retrospective study. Safety, 5(2), 33-50. doi.org/10.3390/safety5020033
- Bilim, A., & ÇELİK, O. N. (2018). Türkiye’deki inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının genel değerlendirmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(2), 725-731. doi: 10.28948/ngumuh.444760
- Çavdar, U. , Manyaslı, M., Akkaya, E., Sevener, D. & Tüfekçi, Z. (2022). Yaşanan iş kazalarının kaza saatlerine ve cinsiyete göre istatistiki olarak değerlendirilmesi ve yorumlanması. International Journal of Engineering Research and Development, 14 (1) , 360-368 . doi: 10.29137/umagd.880158
- Çavuş, A. (2016). Türkiye’de inşaat sektöründeki iş kazalarının sınıflandırılarak nedenlerinin incelenmesi. Academic Platform Journal of Engineering and Science, 4(2). doi: 10.21541/apjes.80127
- Ceylan, H. (2014). Türkiye’de inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının analizi. International Journal of Engineering Research and Development, 6(1), 1-6.
- Ceylan, H. (2011). Türkiye’deki iş kazalarının genel görünümü ve gelişmiş ülkelerle kıyaslanması. International Journal of Engineering Research and Development, 3(2), 18-24.
- Gözüak, M. H. & Ceylan, H. (2021). Türkiye’de inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının iş sağlığı ve güvenliği bağlamında analizi: Güncel eğilimlere genel bir bakış. Sağlık Akademisyenleri Dergisi, 8 (2), 133-143. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/pub/sagakaderg/issue/62334/863926>
- Güllüoğlu, E.N. & Güllüoğlu, A.N. (2019). Türkiye inşaat sektöründe istihdam ve iş kazalarının analizi. Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi, 3(2), 65-81. doi: 10.33720/kisgd.622008
- Gümüş, R. (2017). Türkiye’de 2015 yılında meydana gelen iş kazalarının analizi ve 2014 yılı verileri ile karşılaştırılması. The Journal of Academic Social Science Studies, 55, 277-288. Doi number:<http://dx.doi.org/10.9761/JASSS6916>
- Hacıbektaşoğlu, S. E. (2018). İnşaat sektöründe yaşanan iş kazalarının analizi ve bu kazalara neden olan etkenlerin incelenmesi. Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 2(3), 159-177.
- International Labour Office (ILO), “16th International conference of labour statisticians, Geneva”, (1998).
- Koçali, K. (2021). Sosyal Güvenlik Kurumu’nun 2012-2020 yılları arası iş kazaları göstergelerinin standardizasyonu. Akademik Yaklaşımlar Dergisi, 12 (2), 302-327 doi: 10.54688/ayd.1012081
- Mohammed, Y.D., & Shamsul B.M.T. (2017). A Study pattern of construction occupation disease and nationality of the workers. International Journal of Advanced Engineering and Management Research, 2(3), 784-797.
- Özaslan, B. Ö. (2011). İş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemi ve lojistik sektöründe faaliyet gösteren işletmelerde bir araştırma. (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- SGK İstatistik Yıllıkları, http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari (E.T:06.11.2021)
- Tüik.gov.tr nace rev.2-altılı ekonomik faaliyet sınıflaması, 2022
- Tüik, <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/gayri-safi-yurtici-hasilanin-sektorel-dagilimi-i-85707> (E.T. 31.03.2022)
- Uzdil, O., & Güllüoğlu, A. N. (2020). Türkiye inşaat sektöründe 2016 ve 2017 yıllarında meydana gelen iş kazalarının istatistiksel olarak karşılaştırılması. International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences, 32(2), 137-144. doi: 10.7240/jeps.555736

Yağımlı, M., & Hacıbektaşoğlu, S. E. (2018). Türkiye’de inşaat sektöründe yaşanan iş kazaları ve ölümlü iş kazası sayılarının tahmini. *Gümüşhane University Electronic Journal of the Institute of Social Science*, 9(22), 142-156.



PI, PID ve GA-PID Kontrolör ile Rüzgâr Türbinin Kanat Hatve Açısı Kontrolü

Pitch Angle Control of Wind Turbine with PI, PID and GA-PID controller

Ismail Mohamed Sougueh ¹ , Göksu Görel ^{1*} 

¹Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Çankırı Karatekin Üniversitesi, 18100 Çankırı, Türkiye

Başvuru/Received: 14/12/2021

Kabul / Accepted: 24/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 24/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 24/07/2022

Öz
Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji piyasasındaki payı yükseliş içerisinde. Bu kaynakların en önemlisi ise rüzgâr enerjisidir. Rüzgâr hızına bağlı olarak rüzgâr türbin hız kontrolü önemli kontrol parametresidir. Bu hız parametresinin yüksek rüzgâr hızlarında türbin ve diğer önemli parçalara zarar vermemesi için denetim altında tutulması gerekmektedir. Bu çalışmada, PI, PID ve GA-PID kontrolör ile bir rüzgâr türbinin hatve açısını kontrol etmek için bir modelleme yapılmıştır. Yüksek rüzgâr hızlarında enerji sistemine zarar verilmemesi ve değişken rüzgâr hızının çıkış gücü etkisinin kabul edilebilir ölçülerde kalmasını sağlamak PI, PID ve GA-PID kontrolör yöntemi kullanılmıştır. Çıkış gücünün sabit tutulması hedeflenmiştir. Matlab/Simulink programında simülasyon olarak rüzgâr türbini modellenmiştir. Bu çalışmada çıkış gücü seviyesi (500 KW) GA-PID kontrolörün uygulanmasıyla daha optimum seviyede kalması sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Rüzgâr türbini, Genetik algoritma, Optimizasyon”

Abstract

Today, the share of renewable energy sources in the energy market is on the rise. The most important of these resources is wind energy. Depending on the wind speed, wind turbine speed control is an important control parameter. This speed parameter must be kept under control in order not to damage the turbine and other important parts at high wind speeds. In this study, a modeling has been made to control the pitch angle of a wind turbine with PI, PID and GA-PID controllers. PI, PID and GA-PID controller methods are used to ensure that the energy system is not damaged at high wind speeds and the effect of variable wind speed on output power remains acceptable. It is aimed to keep the output power constant. The wind turbine was modeled as a simulation in the Matlab/Simulink program. In this study, the output power point (500 KW) is kept at a more optimum level by applying the GA-PID controller.

Key Words

“Wind turbine, Genetic algorithm, Optimization”

1. Giriş

Dünyada elektrik üretmenin birçok yöntemi vardır. Enerjiler iki kategoriye paylaştırılmaktadır: yenilenemeyen enerjiler ve yenilenebilir enerjiler. Son yıllarda nüfus artması ve elektrik ihtiyacı olduğu için yeni bir doğal ve tükenilemez kaynaklar keşfedilmiştir (Civelek, 2013). Eski kaynakların (kömür, petrol vb.) çevreye zararlı olması nedeniyle yenilenebilir enerjiler tercih edilmektedir (Çiftçi & Dursun, 2017). Yenilenebilir enerjiler hem insanların ihtiyaçlarını karşılar hem de çevreyi korur. (Civelek et al, 2016). Farklı yenilenebilir enerjiler vardır (Güneş paneli, Hidrolik, Jeotermal, Rüzgâr türbini vb.) (Almaz, 2020). Son yıllarda küresel ısınmaya ve çevre kirliliğine neden olan yer yer altı kaynaklarının azalması ve sınırlandırılmasının gerçekleşmesi ile sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgi artmıştır. Günümüzde elektrikli cihazlar ve teknoloji artmasıyla elektrik enerjileri çok talep edilmektedir. Rüzgâr türbini yenilenebilir enerjilerini birisidir (Işık & Ünal, 2020). Rüzgâr türbini enerjisi günümüzdeki çok kullanılan bir enerjidir. Rüzgâr hareketinden (kinetik enerjiden) elektrik enerjisi üretmektedir. İki türlü rüzgâr türbin vardır, sabit hızlı rüzgâr türbini ve değişken hızlı rüzgâr türbini. Sabit hızlı rüzgâr türbini çıkış gücüne sabittir, değişken hızlı rüzgâr türbini hava hızına göre çıkış gücünü değiştirmektedir (Işık & Ünal, 2020). Çıkış gücünün ve değişken rüzgâr hızlarına bağlı olduğu doğrulanmıştır (Çiftçi & Dursun, 2017). Rüzgâr Enerji Santralleri (RES) dünyada çok yerlerde yerleştirilmiştir fakat çıkış gücüne ve değişken rüzgâr hızına bağlı olduğu için sorun ortaya çıkmıştır. Rüzgâr türbini tarafından üretilen güç sabit değilse, şebekede bozulmalar olacaktır. Bu problemin çözülmek için kontrolörün kullanılmaktadır ve farklı kontrolör vardır. Son yıllarda klasik PID, bulanık mantık vb. kontrolörler kullanılarak rüzgâr türbinin hatve açısını kontrol edildiği çok çalışma açıklanmıştır (Civelek, 2013). Rüzgâr türbinlerinin hatve kontrolü için en çok çalışılan kontrolör orantısal-integral-türev (PID) kontrolördür. Ancak rüzgâr türbini modellemesindeki ve rüzgâr hızı profillerindeki belirsizlikler nedeniyle daha etkin kontrolörlere ihtiyaç kaçınılmazdır. PID kontrolörün parametreleri genellikle bilinmez ve tasarımcı tarafından seçilmelidir, bu ne basit bir görev ne de optimaldir. Bu dezavantajlarla başa çıkmak için, bu yazıda, perde kontrol performansını iyileştirmek için bulanık PID (FPID) ve kesirli sıralı bulanık PID (FOFPID) olarak adlandırılan iki gelişmiş denetleyici önerilmiştir. Bu arada, kontrolörlerin parametrelerini bulmak için kaotik evrimsel optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Daha sonra yapılmış olduğu çalışmaların rüzgâr türbin hatve açısını kesirli bulanık PID kontrolörleri kullanılarak sistemin kontrol edilebildiği gösterilmiştir (Amirhossein et al, 2018). Hatve açısı kontrolü, rüzgâr hızı nominal hızın üzerindeyken rüzgâr türbininin aerodinamik torkunu ayarlamak için en yaygın araçtır ve rüzgâr hızı, jeneratör hızı ve jeneratör gücü gibi çeşitli kontrol değişkenleri seçilebilmektedir. Geleneksel adım kontrolü genellikle PI kontrolörü kullandığından, sistemin matematiksel modeli iyi bilinmelidir. Sistem hakkında iyi bilinmesi gerekmeyen ve doğrusal olmayan hassasiyeti telafi etmek için ortalama rüzgâr hızının kullanıldığı bir bulanık mantık eğim açısı kontrolörü geliştirilmiştir Bulanık mantık kontrol stratejisi, sistem rüzgâr türbülansının güçlü olması gibi güçlü doğrusal olmayanlık içerdiğinde veya kontrol hedefleri yorulma yüklerini içerdiğinde potansiyele sahip olabilmektedir. Bulanık mantık kontrolörün tasarımı ve çeşitli kontrol değişkenleri ile dönüşümlü adım açısı kontrol stratejileri ile karşılaştırmaları yapılmıştır. Simülasyon, bulanık mantık kontrolörün, daha düşük yorulma yükleri, daha düşük güç tepe noktası ve daha düşük tork tepe noktası gibi geleneksel adım açısı kontrol stratejilerinden daha iyi kontrol performansları elde edebileceğini göstermektedir (Jianzhong, Z. 2008). Rüzgâr türbini hatve açısı kontrol edilebilmek için kontrolörün kullanılarak kontrol edilebilmektedir. PI, PID ve GA-PID Ziegler Nichols yöntemi kullanılarak çıkış gücünün kontrol edilmiştir. Bu çalışmada ilk olarak kontrolsüz rüzgâr türbininin çıkış gücü incelenmiştir daha sonra PI, PID ve GA-PID kontrolörle uygulamasıyla çıkış gücü ayar noktası (500 KW) sabit tutulabildiği gösterilmiştir. PID kontrolörün katsayılarının genetik algoritması uygulanmasıyla sistemin optimize edilmektedir. Rüzgâr hız seviyelerinin aşırı durumlarında daha sağlıklı bir kontrol imkânı sağlamıştır.

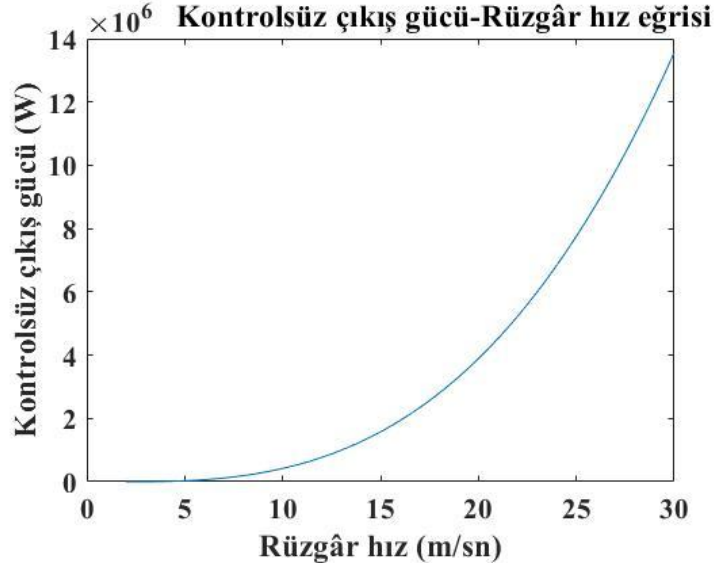
2. Materyal ve yöntem

2.1. Rüzgâr türbin modeli

Rüzgâr kinetik gücü (P) hava hızının (V) orantılıdır, denklem (1)'de verilmiştir.

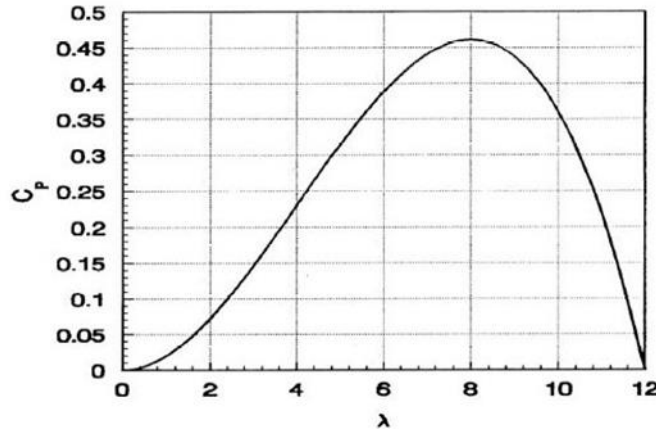
$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

Burada, V ve A sırasıyla hava yoğunluğu, sıcaklık değeri 15 ve atmosfer değeri 1 olmalıdır, Rüzgâr hızı (m/s) ve kanatlar süpürülen alandır (m). Şekil 1'de rüzgâr hızı-rüzgâr gücü değişim eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 1. Rüzgâr hızı-rüzgâr gücü eğrisi

Güç katsayısı C_p kanat hatve açısı β ve kanat uç hız oranı λ 'nın bir fonksiyonudur. Güç katsayısı Betz limitinin göre 0.59'u geçemez ve en fazla %59'unu enerjiye çevirebilir. Şekil 2'de C_p 'nin, λ 'ya göre değişim grafiği verilmiştir.

Şekil 2. C_p - λ eğrisi

Rüzgâr türbininden elde edilebilecek mekanik çıkış gücü rüzgâr hızının küpü ile orantılıdır ve denklem (2)'de verilmiştir.

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\beta, \lambda) \quad (2)$$

Burada, Güç katsayısı olan C_p , rüzgârın hacmi ρ ve rüzgâr hızı V ile mekanik çıkış gücüne orandır. $C_p(\beta, \lambda)$ ise, kanat hatve açısı ve kanat uç hız oranıdır (TSR). Rüzgâr türbinin güç katsayısı C_p denklem (3)'te verilmiştir.

$$C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (3)$$

Denklem (3)'te verilen C_p değeri, denklem (4)'te ve denklem (6)'da verilen değerler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)^{-1} \quad (4)$$

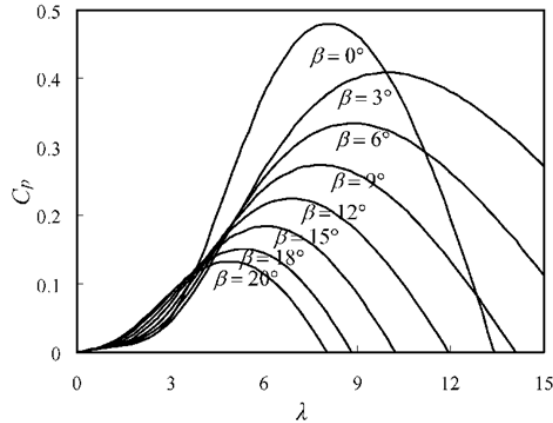
λ_i 'yi başka bir şekilde denklemin ifade edersek.

$$\frac{1}{\lambda_i} = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \quad (5)$$

TSR denklem (6)'da verilmiştir.

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_{ref}} \quad (6)$$

Kanat ucu hız oranı (Tip Speed Ratio), kanat açısız hızı ile rüzgâr hızının oranıdır. Burada; Ω türbin rotoru açısız hızı (rad/s), rüzgâr türbini kanat yarı çapıdır (m). Şekil 3'te değişik beta açısı değerleri için güç katsayısı ve kanat uç hız oranı değişim eğrileri verilmiştir.



Şekil 3. Farklı β değerleri için C_p - λ grafiği

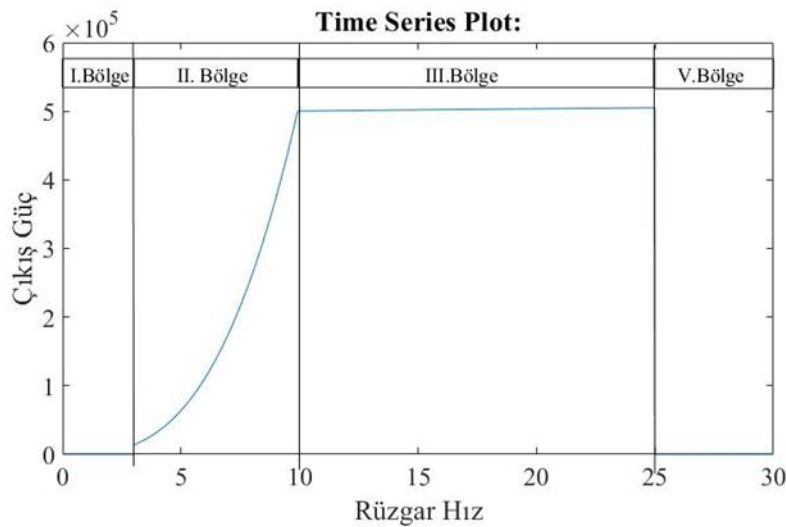
Aerodinamik tork birim açısız hız başına düşen güç miktarıdır. Rotoru süren aerodinamik tork denklem (7)'de verilmiştir.

$$T = \frac{P_m}{\Omega} \quad (7)$$

Eğer denklem (2) ve denklem (6)'e ilave edilirse denklem şöyle ifade edilmiştir.

$$T = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V^2 \frac{C_p(\beta, \lambda)}{\lambda} \quad (8)$$

Rüzgâr türbinin çıkış gücü kontrolü çalışması prensibi kısaca: Rüzgâr hız değişken olduğundan, mekanik çıkış gücü de değişkendir. Denklem (6)'e göre Ω veya V_{ref} 'deki herhangi değişim, λ 'yı değiştirir. Bu da C_p 'yi değiştirir, sonuçta elde edilebilecek güç miktarı değişecektir. Güç katsayısının değişimi hatve açısının değişimine bağlıdır böylece çıkış gücü kontrol edilmiştir. Şekil 4'te rüzgâr türbininin çeşitli çalışma bölgeleri görülmektedir.

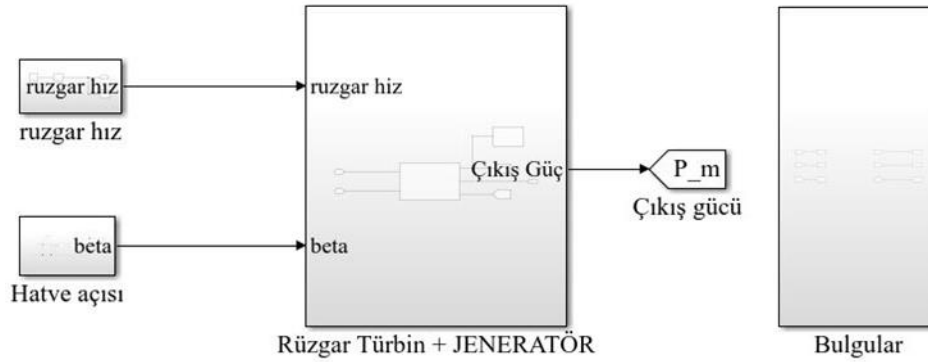


Şekil 4. Rüzgâr türbini çalışma bölgeleri

Rüzgâr türbinin çıkış gücü dört bölgeye ayrılmıştır. I bölgedeki "Cut-in" denir ve bu bölge de çıkış gücü sıfırdır. II bölge 'ise çıkış gücü sıfır ve nominal çıkış gücü arasında bir bölgedir. III bölgedeki rüzgâr türbininden üretilen güç nominal gücü eşitleştirildiği bölgedir. Sonuçta IV bölgede "Cut-out" denir ve bu bölgede rüzgâr hız limitin aşamasıdır dolayısıyla türbini güvenlik açısından kapatılır.

2.2. Rüzgâr türbine ve jeneratör modeli

Genel görüntü Matlab ortamında modellemesi Şekil 5'te görmektedir. Rüzgâr türbini üç farklı blok şeması içermektedir. Rüzgâr hız, hatve açısı, rüzgâr türbin ve jeneratör şema blok modellenmiştir.



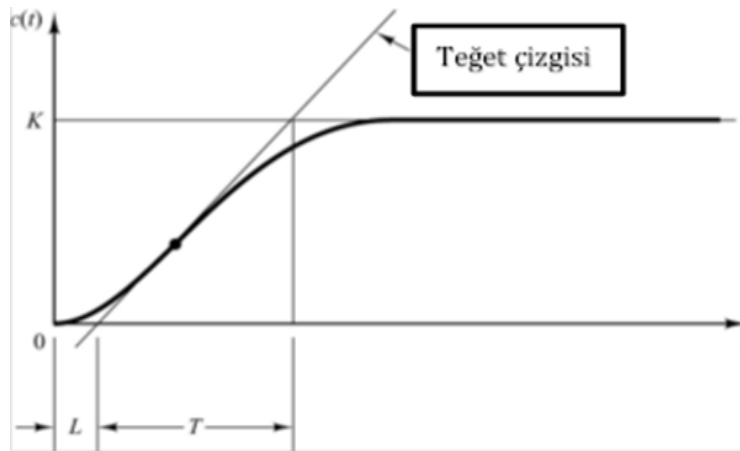
Şekil 5. Rüzgâr türbini sistemin genel görüntü

Rüzgâr türbinlerin herhangi kontrolörle kullanılmadan Şekil 1'de eğrisi göstermektedir. Bu çalışmada PI, PID ve GA-PID kontrolörle kullanarak Şekil 4'te gösterilen eğri gibi çıkış gücünü olacağı gösterilmiştir. Matlab ortamında simülasyon iç yapısı aşağıda açıklanmıştır:

Ramp ve saturation bağlanarak değişken rüzgâr hız sistemin bloğu modellenmiştir. Parametreleri düzenli yaparak rüzgâr hızı gitgide artmaktadır. Hatve açısı blok modeli çok şey içermektedir. DC Servo motor (Aktüatör), PI, PID ve GA-PID kontrolörler ve sinyal hata hesaplayan programı bulunmaktadır. Rüzgâr Türbini ve Jeneratör bloğu modeli iki kısımdan oluşmaktadır. Son olarak bulgular blok modeli görüntüleme cihazlarını (Scope, Toworkspace, vb.) içermektedir.

2.3. PI ve PID kontrolör tasarımı

PI ve PID kontrolörü için gerekli katsayılar hesaplanırken kullanılan L ve T değerleri Şekil 6'ya göre Matlab ortamında çıkış gücünün eğrisi sonuçları dikkate alınarak belirlenmiştir. Matlab ortamında rüzgâr türbinin sistemin hiçbir kontrolöre uygulamadan çıkış gücü eğrisi bakarak dört bölgeye paylaşılır. I bölgede Cut-in denir ve bu bölgede L değerinin bulunmaktadır. II bölgede ise T değerinin hesaplanabilir. IV bölgede Cut-out bölgesi denir ve K değerinin hesaplanabilir. Bu çalışmada Ziegler Nichols yöntemini kullanarak çıkış gücü eğrisi II bölgesinde teğet çizgisini çizerek T değerin hesaplanmıştır. L değerin ise I-II bölge arasında Cut-in kısmında x eksenini belirtmektedir. PI veya PID kontrolör kullanılarak L ve T değerlerini her zaman farklıdır. Bu kısımda hesaplandığı ya da belirttiği değerlerin rüzgâr sistemin hatve açısının sıfır olmalıdır. Bundan sonra tablo 1'de formülere göre K_p , K_i ve K_d kolay bir şekilde hesaplanmıştır.



Şekil 6. PI ve PID kontrolör katsayılarının L ve T eğrisi

PI ve PID katsayıları K_p , K_i ve K_d hesaplanmak için Tablo 1'e göre açık döngü sistemin kullanılarak hesaplanmıştır. L ve T değerlerin Matlab simülasyonunda bakarak bulunmaktadır.

Tablo 1. PI ve PID açık döngü katsayıların hesaplanması

Kontrolör	K _p	T _i =K _p /K _i	T _d =K _d /K _p
P	T/L	∞	0
PI	0.9T/L	L/0.3	0
PID	1.2T/L	2L	0.5L

Bu çalışmada sistemin açık döngüsü olmadığı için bu yöntem kullanılamamaktadır. Kapalı döngüsü yöntemin aşağıda ifade edilmiştir. PI ve PID kontrolörün kapalı döngüsün yöntemi aşağıdaki Tablo 2'ye göre katsayıların hesaplanmıştır:

Tablo 2. PI ve PID kapalı döngü katsayıların hesaplanması

Kontrolör	K _p	K _i	K _d
P	0.5K _u	0	0
PI	0.45K _u	1.2K _p /T _u	0
PID	0.6K _u	2K _p /T _u	K _p T _u /8

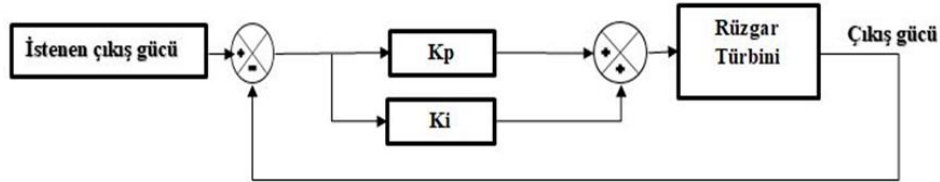
Ziegler Nichols kapalı döngü yöntemin uygulanarak ve K_u ve T_u değerinin Matlab'ta bakarak K_p, K_i ve K_d Tablo 2'ye göre hesaplanmıştır.

PI kontrolör tasarımı

PI kontrolörün transfer fonksiyonu Şekil 7'de gösterilmiştir. Kontrolörün integral kısmı kontrolör giriş işaret üretir. PI kontrolör, sistemin kararlı hal hatasını bir derece iyileştirir (Kumar et al, 2015).

PI kontrolörün transfer fonksiyonu Denklem (9)'de verilmiştir. Bu çalışmada Ziegler Nichols yöntemin uygulamasıyla rüzgâr türbini çıkış gücü ayar noktası tutulmak için iyi optimize eder. PI kontrolörün sadece K_p ve K_i içermektedir.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (9)$$

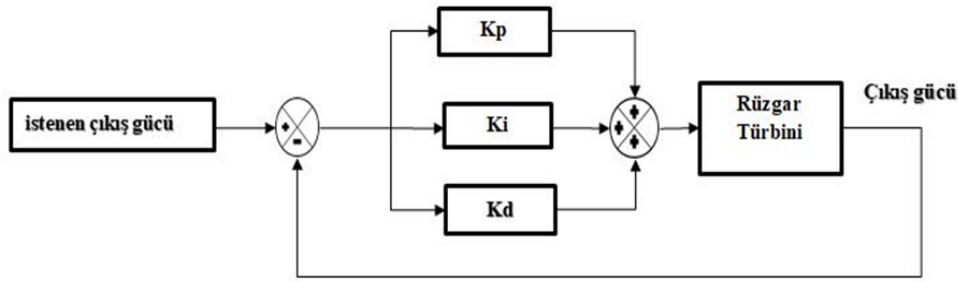
**Şekil 7.** PI kontrolörün transfer fonksiyonu

PID kontrolör tasarımı

PID kontrolörün 'ise K_p, K_i ve K_d içermektedir ve transfer fonksiyonunun Şekil 8'de gösterilmiştir. PID kontrolörünün integral kısmı kontrolör giriş işaretinin zaman integrali ile orantılı bir işaret üretir (Kumar et al, 2015).

PID kontrolörün transfer fonksiyonu Denklem (10)'de verilmiştir. Burada Ziegler Nichols yöntemin uygulamasıyla rüzgâr türbini çıkış gücü ayar noktası tutulmak için PI kontrolörden daha iyi optimize eder. PID kontrolörün içinde K_p, K_i ve K_d bulunmaktadır.

$$G_c(S) = K_p + K_d S + \frac{K_i}{S} \quad (10)$$



Şekil 8. PID kontrolörün transfer fonksiyonu

2.4. Aktüatör modeli

Bir DC motor kullanarak (servo-motor) hatve açısı kontrol etmektedir. Pitch aktüatör sistemleri hidrolik veya elektrikli olarak kontrol edilebilir. Elektrikli aktüatörde; her bıçak bir servo motor ile ayrı ayrı ayarlanabilir. Dünyanın en büyük rüzgâr türbini tedarikçileri, elektrikli eğim açısı kontrol sistemleri kullanmaktadır. Bu çalışmada aktüatör olarak (DC) servo motor kullanılmıştır. Servo motor tasarımında, pozisyon kontrol transfer fonksiyonu Denklem (11)'de verilmiştir (Civelek, 2013).

$$G_P S = \frac{1}{s(s+1)} \quad (11)$$

2.5. Rüzgâr türbinin optimizasyonu

Farklı olası çözümler arasında daha iyiyi veya en iyisini bulmak için optimizasyon kullanılmaktadır. Optimizasyon, koşulların en iyi ve en uygun olduğu optimum noktadır. Optimizasyon problemi: Belirli bir durumda mevcut olan bir dizi seçeneği temsil eden, bir kümeye göre bazı fonksiyonların maksimize veya minimize edilmektedir. İşlev, hangisinin "en iyi" olabileceğini belirlemek için farklı seçeneklerin karşılaştırılmasına olanak tanınmaktadır. Optimizasyon yöntemleri, bir mal veya hizmetin üretiminde maliyetleri en aza indirmek, karı en üst düzeye çıkarmak, bir malın geliştirilmesinde hammaddeyi en aza indirmek veya üretimi en üst düzeye çıkarmak gibi bazı çalışma parametrelerini en üst düzeye çıkararak veya en aza indiren çözümler bulmak için birçok çalışma alanında kullanılmaktadır. Rüzgâr türbinin optimize etmek için birçok yöntemin kullanılabilir. Bu çalışmada Genetik Algoritması (GA) yöntemini kullanarak sistemi optimize edilmiştir (Ben Jemaa, 2015).

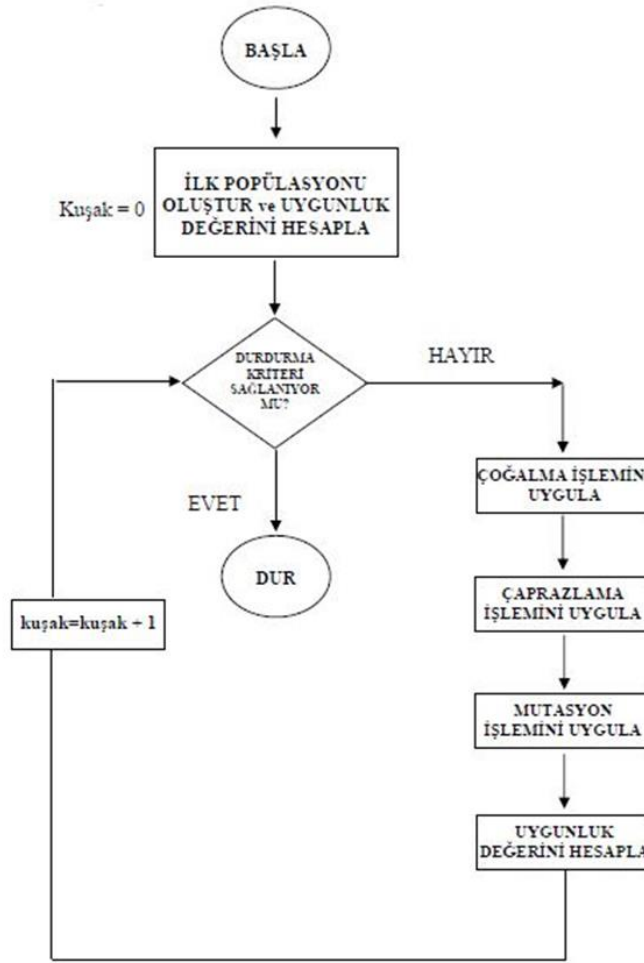
Genetik Algoritması optimizasyonu

Genetik Algoritması stokastik bir optimizasyondur. Genetik algoritması rüzgâr türbinin çıkış gücüne ayar noktası (500 KW) sabit tutulmak için en iyi K_p , K_i ve K_d kendisini hesaplanır ve en uygun sonuç vermektedir. Parametrelerin şöyle ayarlanmaktadır: Genetik algoritma (GA), bir seferde potansiyel çözümler popülasyonunu manipüle eden bir meta-sezgiseldir. Bir GA'nın çalışma modu, doğal seçilimin biyolojik ilkeleri ve çevreye en uygun bireylerin hayatta kalması üzerine modellenmiştir (Darwin, 1876). Doğal seçim, birbirini izleyen nesillerdeki değişikliklerin, türlerin maruz kaldığı dış baskılar (örneğin, kaynak kısıtlamaları, çevresel değişiklikler, avcılar ve parazitler, vb.). Sonuç olarak, çevreye en iyi uyum sağlayan bireyler daha uzun süre hayatta kalma ve daha sık üreme eğilimindedir. Bu mekanizmadan yararlanarak (Holland, 1975) "genetik algoritmalar" adı verilen optimizasyon yönteminin temellerini atılmaktadır. Bu yöntemin önerildiği sonuçları takiben, kombinatoriyal optimizasyon problemleri üzerine birçok çalışma ele alınmıştır. Genetik algoritma, doğal seçim ve genetikten ilham alan bir optimizasyon yöntemidir. Algoritma, arama uzayında rastgele başlatılan bir dizi olası çözümden başlamaktadır. Bireyler, tasarım değişkenleriyle veya bunların kodlanmasıyla (kromozom) temsil edilmiştir. İlk popülasyonun bazı çözümleri, genetik operatörlerden (çaprazlama, mutasyon vb.) yeni bir popülasyon oluşturmak için kullanılmıştır. Bu, yeni nüfusun öncekinden daha iyi olacağı umuduyla motive edilmiştir. Yeni çözümler oluşturmak için kullanılacak çözümler, değerlerine göre rastgele seçilir (oluşturulan probleme özgü, en aza indirilmesi veya en üst düzeye çıkarılması gereken bir amaç fonksiyonu ile temsil edilir): birey ne kadar iyi olursa, hayatta kalma şansı o kadar yüksek olur ve bir yakınsama kriteri sağlanana kadar yeniden üretmek (tipik olarak sabit sayıda nesil veya amaç fonksiyonu tarafından ulaşılan bir hedef değer). Genetik algoritmaların bazı avantajları aşağıda sayılmaktadır (Ben Jemaa, 2015):

- Hem sürekli hem de ayrık veya karışık problemlere uygulanabilir yöntemin genelliği.
- Yalnızca amaç fonksiyonunun değerini kullanırlar (türevini veya bir ara hesaplamayı kullanmazlar).
- Amaç fonksiyonunun olası süreksizliklerinin bu algoritmaların yakınsaması üzerinde çok az etkisi vardır.
- Yerel optimumlar tarafından kolayca tuzağa düşürülmezler.
- Çok sayıda parametreyi işleyebilirler ve paralel hesaplama için çok uygundur.

Tüm bu özellikler, çok çeşitli optimizasyon problemleri için genetik algoritmaların verimliliğine katkıda bulunmaktadır. Genetik algoritmalar genellikle üç tür genetik operatör kullanmaktadır. Bu operatörler, popülasyondaki bireylere genetik özelliklerini iyileştirmek ve çevrelere uyum sağlamalarını sağlamak amacıyla uygulanmaktadır (Ben Jemaa, 2015).

- ✓ Çaprazlama.
- ✓ Mutasyon.
- ✓ Seçim.



Şekil 9. Genetik algoritmasının akış şeması.

Amaç fonksiyonu

Genetik algoritma uygulamasındaki en önemli adım, her bir kromozomun uygunluğunu değerlendirmek için kullanılan amaç fonksiyonlarının seçilmesidir. Bazı çalışmalar performans indekslerini amaç fonksiyonu olarak kullanmaktadır. Amaç fonksiyonları olarak genellikle dört performans indeksi vardır. Mutlak Hata (MHZI) ile çarpılan Zamanın İntegrali, Hatanın Mutlak büyüklük İntegrali (HMI), Kare Hatasının (KHI) İntegrali ve Kare Hatası ile çarpılan Zaman İntegrali (KHZI). Burada, hata sinyalini minimize etmek için performans endeksleri olarak mutlak hata (MHZI) ile çarpılan zaman integralini kullanılmaktadır. Performans endeksleri şu şekilde tanımlanır (Ben Jemaa, 2015):

$$MHZI = \sum_0^{t_{max}} t |e(t)| \quad (12)$$

$$HMI = \sum_0^{t_{max}} |e(t)| \quad (13)$$

$$KHI = \sum_0^{t_{max}} e(t)^2 \quad (14)$$

$$KHZI = \sum_0^{t_{max}} t e(t)^2 \quad (15)$$

Kontrolör parametrelerinin optimizasyonu

Burada $e(t)$ zaman alanı hata sinyalidir. Bu çalışmada MHZI'nin kriteri kullanılmaktadır ve aşağıda kontrol kanununu hesaplama adımları algoritmada özetlenmiştir.

1) Aşağıdaki parametrelerin tanıtımı:

- max_{pop} Popülasyon başına düşen birey sayısı.
- Başlangıç popülasyonu.

- gen_{max} Jenerasyon sayısı.
- 2) Jenerasyon sayacının başlatılması ($gen = 1$).
- 3) Birey sayacının başlatılması ($j = 1$).
- 4) $t = 1$ sn'den t_{max} 'a, popülasyondaki j-inci bireyin etkinliğinin değerlendirilmesi.
- 5) Bireysel sayacın artışı ($j = j + 1$).
 - Eğer $j < max_{pop}$ 4. adıma geri dönün.
 - Aksi halde: yeni popülasyonun oluşumu için genetik operatörlerin (Seçim, Çaprazlama, Mutasyon) uygulanması
- 6) Üretim sayacının artışı $gen = gen + 1$,
Eğer $gen < gen_{max}$ 3. adıma dönün.
- 7) Son popülasyonun en iyi bireyine (en iyi uyumu oluşturan birey) karşılık gelen K_p , K_i ve K_d alın.

Aşağıda, genetik algoritma, 100'e eşit jenerasyon sayısı ile karakterize edilmiştir. Popülasyon çaprazlama kesri 0.8, popülasyon mutasyonu 0.08 ve popülasyon başına düşen birey sayısı 30'ye eşittir. Şimdi, Matlab'da en iyi katsayıları bulmak için adımlar aşağıdaki gibidir:

Önce Matlab'da optimtool yazılarak optimizasyon sayfada açılmıştır sonra GA optimizasyon seçilerek boş olan yerler parametreler doldurulmaktadır. Son olarak GA optimizasyonu "başlatma" tıklayarak başlamıştır. Yüz kere optimize ettikten sonra artık K_p , K_i ve K_d elde edilmektedir ve sonuçları aşağıda gösterilmiştir.

$$K_p = -0.9841851386559535 ;$$

$$K_i = -1.6419620431000405 e^{-5};$$

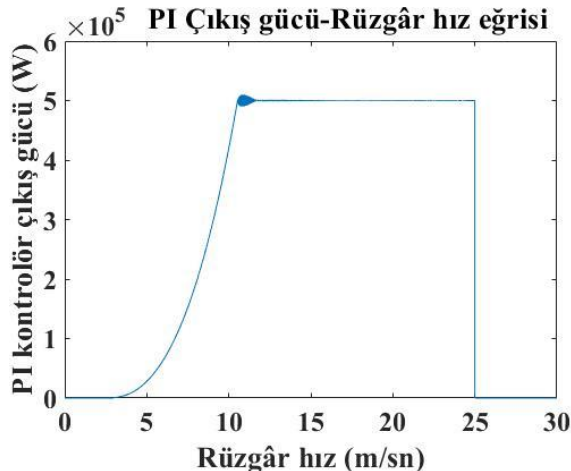
$$K_d = -0.9460994760497939 ;$$

3. Bulgular

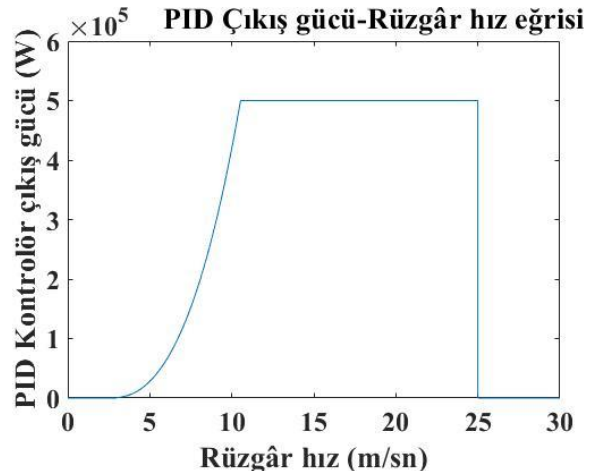
Bütün kontrolörün ve katsayılarının şöyle Tablo 3'te toplanmıştır.

Tablo 3. Kontrolörlerin katsayıları			
Kontrolör	PI	PID	GA-PID
K_p	-1	-0.9	-0.9841851386559535
K_i	-0.00001	-0.000016	-1.641962043100 e ⁻⁵
K_d		-0.9	-0.946099476049793

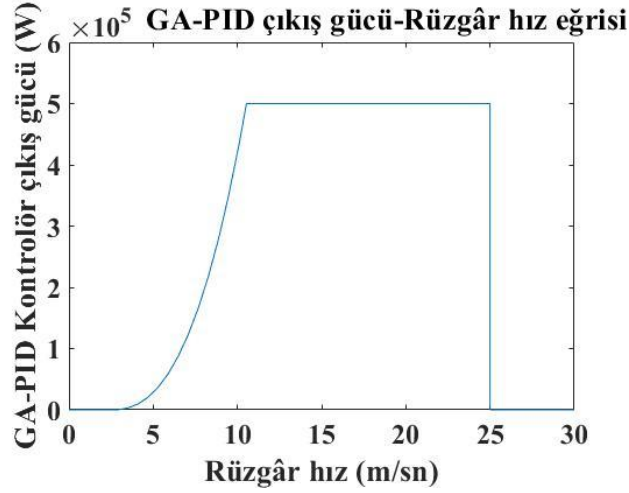
Simülasyon sonuçlarına göre Şekil 10'da görüldüğü gibi PI kontrolörle hatve açısının uygulamasıyla çıkış gücünü ayar noktası (500 KW) tutulmuştur ama 10-20 m/sn. arasında kararsızlığı görünmektedir. Rüzgâr türbini PI kontrolörü uygulandığında çıkış gücü $\pm 10\%$ yaklaşık ayar noktası geçtiği Şekil 10'da görünmektedir. PID kontrolörün kullanılarak istenen ve ayar noktası çıkış gücünü artık elde edilmiştir. PID kontrolöre PI kontrolörden daha iyi optimize ettiği Şekil 10'da ve Şekil 11'de görünmektedir. Genetik algoritması ile PID parametrelerinin ayarlayarak rüzgâr türbini çıkış gücü kontrolör sonucu Şekil 12'de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi PI ve PID kontrolörden daha optimum sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 10. PI rüzgâr türbinin çıkış gücü

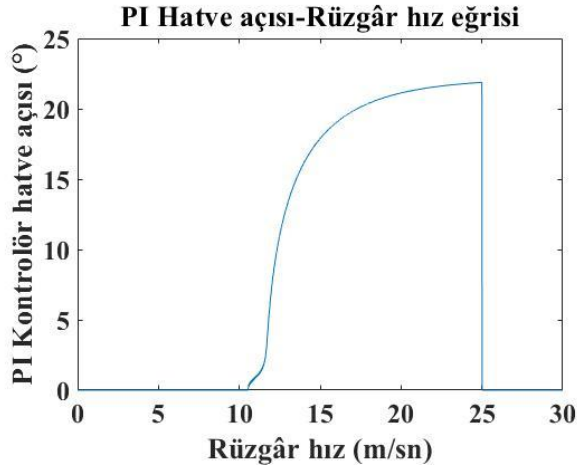


Şekil 11. PID rüzgâr türbinin çıkış gücü

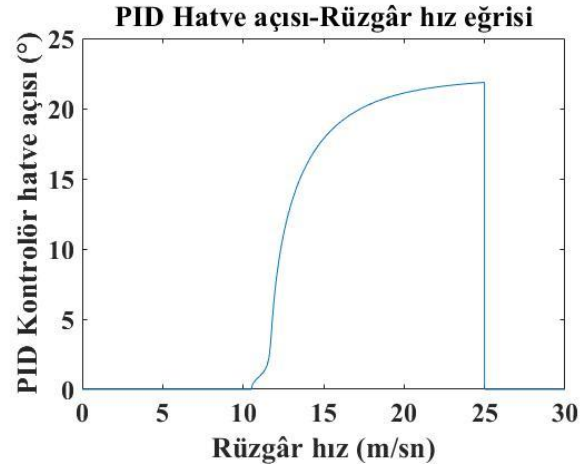


Şekil 12. PID-GA rüzgâr türbinin çıkış gücü

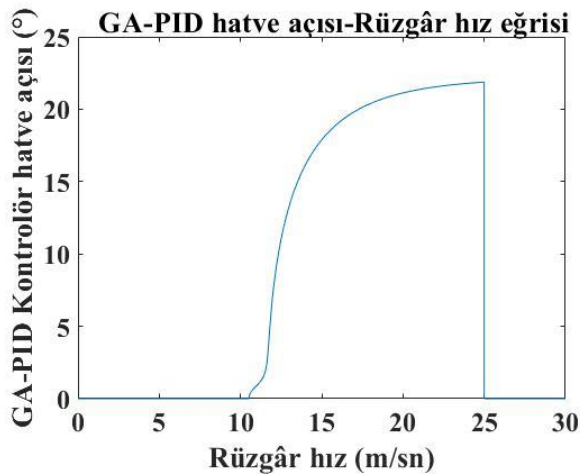
Şekil 13, 14 ve 15'te hatve açısının değişimi görülmektedir. Rüzgâr türbini nominal hız olduğunda (12 m/sn.) çıkış gücü (500 KW) tutulmak için servo motor tarafından hatve açısı değişmeye başlar. PI, PID ve GA-PID kontrolör kullanılarak servo motor tarafından uygun hatve açısı ayarlanmaktadır. Rüzgâr hız (≥ 25 m/sn.) olduğunda rüzgâr türbinin güvenlik açısından kapatılmaktadır.



Şekil 13. PI hatve açısı

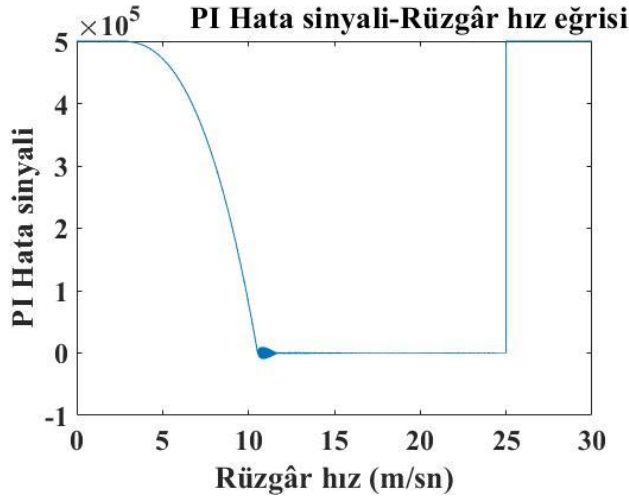


Şekil 14. PID hatve açısı

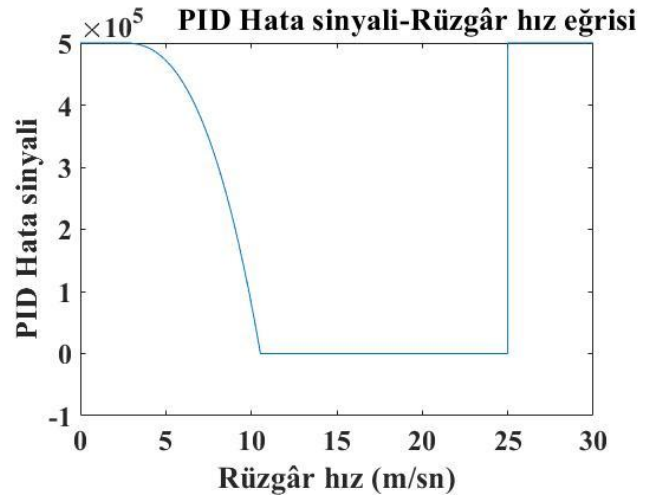


Şekil 15. PID-GA hatve açısı

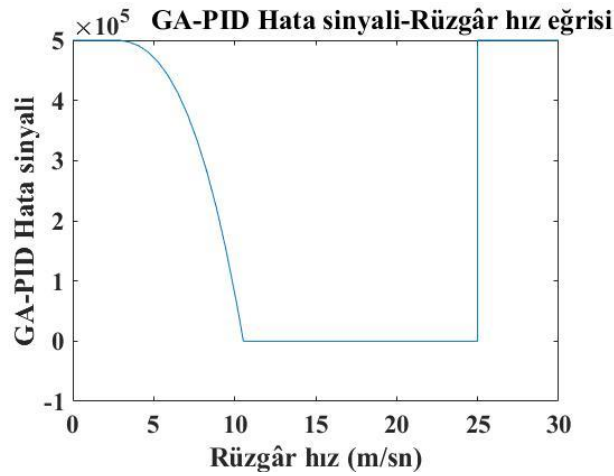
Şekil 16, 17 ve 18’de PI, PID ve GA-PID kontrolörler düzeltereğini hata değışimleri gösterilmektedir. Şekil 18’de Genetik Algoritması Genetik algoritmanın hata değeri klasik kontrolörlerden daha minimum değere indirdiğı gösterilmiştir. Genetik Algoritması kullanılmasıyla en iyi K_p , K_i ve K_d değeri ayarlanması sonucu en iyi çıkış gücü değışimi Şekil 12’de, en iyi hatve açısı değışimi Şekil 15’de ve en iyi hata sıfırda sınırlandırıldığı Şekil 18’de gösterilmiştir.



Şekil 16. PI hata sinyali



Şekil 17. PID hata sinyali



Şekil 18. PID-GA hata sinyali

4. Sonuçlar

Rüzgâr türbinin ürettiğı çıkış gücü kontrol edilmesi önemlidir. Rüzgâr türbinin hatve açısı kontrol edilebilmek için birçok yöntem vardır. PI kontrolörün Ziegler Nichols yöntemin kullanılarak K_p ve K_i hesaplanmasıyla çıkış gücü Şekil 10’da gösterilmiştir. İstenen sonuçlar elde edilmiştir ancak kararsızlık görülmektedir. Rüzgâr hızına bağlı olarak 12 m/sn’den 18 m/sn’ye arasında rüzgâr türbinin çıkış gücü eğrisi $\pm 10\%$ seviyesi (500 KW) geçtiğı görünür. Bu hata düzeltmek için PID kontrolörün Ziegler Nichols yöntemin kullanılarak yine de K_p , K_i ve K_d hesaplanmasıyla eğri daha optimum bir seviyede sabit tutulduğunu gözlenmiştir. Ancak Ziegler Nichols yöntemlerin PI ya da PID kontrolörün hesaplandığında K_p , K_i ve K_d katsayıların yaklaşık değeri verilmektedir. PID kontrolörün katsayılarını Genetik Algoritmasıyla ayarlayarak çıkış gücünün en iyi sonuç elde edilmiştir ve Şekil 12’de gösterilmiştir. PID kontrolörün katsayılarını GA ile ayarlayarak en iyi K_p , K_i ve K_d hesaplayarak rüzgâr türbin sistemi daha iyi optimize edilmiştir. Sonuçta rüzgâr türbinin hatve açısının kontrol edilebildiğı ve çıkış gücünü daha sabit seviyede tutulduğı gösterilmiştir.


Kaynakça

- Almaz, R. (2020). Değişken kanat açılı düşey eksenli rüzgâr türbini tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
- Baburajan, S., & Ismail, A. (2017). Design and control of the pitch of wind turbine through pid. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume 4, Issue 9.
- Ben Jemaa, A. (2015). Coopération méta heuristique et logique floue pour le dimensionnement d'une installation hybride. Thèse pour obtenir le grade de docteur, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, France.
- Boulegroune, I. (2020). Etude et réalisation d'une turbine éolienne. Mémoire de Fin d'Etudes Master, Université Mohamed Khider Biskra, Biskra, Algérie.
- Civelek, Z. (2013). Bulanık PID kontrolör ile rüzgâr türbininin hatve açısının kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye.
- Civelek, Z., & Lüy, M., & Çam, E., & Görel, G. (2016). A new fuzzy controller for adjusting of pitch angle of wind turbine. The Online Journal of Science and Technology, Volume 6, Issue.
- Çiftçi, A., & Dursun, M. (2017). Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılan sabit mıknatıslı senkron generatör ile maksimum güç noktası izleme algoritması. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Volume 5, Issue 2.
- Göktaş, M., & Kılıç, F. (2019). Savonius rüzgâr türbini çevresindeki hava akışının hesaplanabilir akışkanlar dinamiği yöntemi ile analizi. Politeknik dergisi 22(1): 11-17, (2019).
- Gupta, J., & Kumar, A. (2012). Fixed pitch wind turbine-based permanent magnet synchronous machine model for wind energy conversion systems. Journal of Engineering and Technology Volume 2, Issue 1.
- Hamad, C. (2017). Pitch angle control system design for wind turbine. Master thesis, Yüzüncü Yil University, Van, Türkiye.
- Hwas, A & Katebi, R. (2012). Wind Turbine Control Using PI Pitch Angle Controller. Industrial Control Centre, University of Strathclyde, Glasgow, UK. IFAC Proceedings Volumes, Volume 45, Issue 3.
- Iov, F., Daniela, A., Sorensen, P., & Blaabjerg, F. (2004). Wind Turbine Blockset in Matlab / Simulink General Overview and Description of the Models. Aalborg University, Denmark.
- Işık, E. & Ünal, O. (2020). Rüzgâr Türbini Kanat Tasarımı ve Analizi. Makina mekanik tasarım projesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.
- Jourieh, M. (2007). Developpement d'un modele representatif d'une eolienne afin d'etudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc eolien. These pour obtenir le grade de Docteur, l'Ecole Nationale Superieure d'Arts et Metiers, Paris, France.
- Kumar, P., Parimi, A., & Rao, U. (2015). Investigation of small pmsg based wind turbine for variabl wind speed, International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE).
- Leithead, W., & Connor, B. (2010). Control of variable speed wind turbines: dynamic models. International Journal of Control, Volume 73, Issue 13.
- Multon, B. (1999). L'énergie électrique: analyse des ressources et de la production, Journées de la section électrotechnique du club EEA 1999, Jan 1999, 22p. (hal-00674084), Paris, France.
- Rolan, A., Luna, A., Vazquez, G., Aguilar, D & Azevedo, G. (2009). Modeling of a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator, 2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 5-8 July 2009 conference. Seoul, Korea (South).
- Sami, K. (2018). Modélisation et commande d'un système éolien. Thèse de doctorat, Université 8 mai 1945 Guelma, Guelma, Algérie.
- Yin, M., Li, G., Zhou, M., and Zhao, C. (2007). Modeling of the Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator for Integration, IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, Florida, USA.



Depolarda Ürün Atama Problemlerinde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Kullanımı: Bir İşletme Uygulaması

Using Multi-Criteria Decision-Making Methods In Product Assignment Problems In Warehouses: A Case Study

Fatma Sümeyye Erarslan^{1*} , Mustafa Deste² 

¹Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Arapgir Meslek Yüksekokulu, Malatya, TÜRKİYE
²İnönü Üniversitesi, İktisadi İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Malatya, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 21/12/2021

Kabul / Accepted: 17/05/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Lojistik faaliyetlerinin etkinliğinde depolama süreçleri önemli bir yere sahiptir. Bu çerçevede, doğru yönetilemeyen depolama faaliyetlerinin işletmeler için zaman kaybı ve yüksek maliyetler oluşturabileceğini ifade etmek mümkündür. Dolayısıyla, işletmeler depolama şekillerini planlamayı, daha da önemlisi depo yönetimi algısını oluşturmayı başarmak zorundadırlar. Depolama alanlarındaki optimizasyon çalışmalarının giderek artması da depo yönetimi algısının olumlu sonuçları arasında gösterilebilmektedir. Depolama süreçlerindeki optimizasyon çalışmaları, ürün yükleme boşaltma işlemlerindeki iyileştirmeler ile etkili sonuçlar elde etmektedir.

Bu çalışmada, bir işletmenin depo alanında ürün atama problemi için Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri (ÇKKV) kullanılarak bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Uygulama çerçevesinde, ilk olarak literatür taraması yapılmış olup tarama sonucunda değerlendirme kriterleri; kârlılık, müşteri duyarlılığı, popülerlik, ağırlık ve talep kriterleri şeklinde belirlenmiştir. ÇKKV teknikleri kullanılırken gerekli olan kriter ağırlıkları işletmede çalışan uzmanlarla odak grup görüşmeleri sonrasında oluşturulmuştur. Dikey boyutta yapılan sınıflandırma çalışması için ELECTRE TRI yöntemi, yatay boyutta yapılan sıralama çalışması içinde TOPSIS ve VIKOR yöntemleri uygulanmıştır. Bu tekniklerin kullanımı sonucunda mevcut depo alanı ve üretilen ürün özelliklerine en uygun optimum yerleşim şekli belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Depolama, Ürün Atama, Çok Kriterli Karar Verme, TOPSİS, ELECTRE TRI, VIKOR”

Abstract

Storage processes have an important place in the effectiveness of logistics activities. In this context, it is possible to state that improperly managed storage activities can cause loss of time and high costs for businesses. Therefore, businesses have to be able to plan their storage styles and, more importantly, to create a perception of warehouse management. The gradual increase in optimization studies in storage areas can also be shown among the positive results of the perception of warehouse management. Optimization studies in storage processes achieve effective results with improvements in product loading and unloading processes.

In this study, an optimization study was carried out by using Multi-Criteria Decision Making Techniques (MCDM) for the product assignment problem in the warehouse area of an enterprise. Within the framework of the application, a literature review was made first and the evaluation criteria as a result of the scanning; profitability, customer sensitivity, popularity, weight and demand criteria. The criteria weights required when using MCDM techniques were created after focus group discussions with the experts working in the enterprise. The ELECTRE TRI method was used for the vertical classification study, and the TOPSIS and VIKOR methods were used for the horizontal scale classification study. As a result of the use of these techniques, the optimum layout that is most suitable for the existing warehouse area and the characteristics of the produced product has been determined.

Key Words

“Storage, Product Assignment, Multi Criteria Decision Making, TOPSIS, ELECTRE TRI, VIKOR”

1. Giriş

Depolama faaliyetleri, işletmelerin satışa hazır nihai ürünlerinin zarara uğramadan ilk günkü özellikleri ile saklanabilmesi ve hızlı bir şekilde sevk edilmeleri için gerçekleştirilen faaliyetlerdir. İşletmeler, faaliyet gösterdikleri piyasada rakip işletmeler ile rekabet edebilmek için kendilerini her anlamda sürekli iyileştirmek zorundadırlar. Ürünün maliyet fiyatını etkileyen her süreç göz önünde bulundurularak bu aşamalarda iyileştirmeler planlanmalıdır. Depolama maliyetleri de ürün için doğrudan gider olarak düşünülmesi de ürün maliyetini etkileyen önemli bir kavram olarak karşımıza çıkmaktadır. Depolama maliyetlerini azaltmak adına, işletmelerin depo yönetimi algısını benimsemeleri önem arz etmektedir. Depoların ve sevkiyat süreçlerinin planlanması, optimizasyonu ve kontrolü depo yönetimi olarak ifade edilmektedir.

Sevkiyat aşamasında istenilen ürünlere istenilen zamanda erişebilmek önemli bir faktördür. Depolama alanlarının etkili şekilde kullanılmaması, ürün arama süresinin uzunluğundan dolayı sipariş edilen ürünün sevkiyatının aksaması, yanlış ya da eksik ürün gönderimi gibi olumsuz durumların yaşanmasına sebebiyet vermektedir. Dolayısıyla, bu durum müşteri ile ilişkilerin aksamasına neden olmaktadır. Tam zamanında üretim sistemindeki mantık gibi depolardaki malzemelerin belirli bir alanının olması, çalışanların depolama alanını etkin kullanmalarını ve malzemelere istenilen zamanda ulaşmalarını sağlamak depolama maliyetlerinin azalmasına etki edecektir. Bu süreçlerde yapılacak olan iyileştirmeler depolama alanında optimizasyon çalışmasının temelini oluşturacaktır.

Bu çalışma, Malatya 2. Organize sanayinde cıvata imalatı yapan bir fabrikanın nihai ürün deposunda, sevkiyata hazır malzemelerin uygun yerlere atanması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın birinci bölümünde depo, depolama kavramları ve depo yönetiminde geleneksel karar problemleri ele alınmıştır. İkinci bölümde ise, ÇKKV yöntemleri ile çözülen ürün atama problemlerine yönelik bir literatür araştırması gerçekleştirilmiştir. Bu çerçevede uygulama kısmında kullanılan TOPSIS ve ELECTRE TRI, VIKOR yöntemlerine yönelik teorik bilgiler verilmiştir. Çalışmanın üçüncü ve son bölümünde araştırmanın amacı, önemi ve kapsamına değinilerek fabrika hakkında genel bilgiler, mevcut durum analizi ve ÇKKV tekniklerinin uygulama aşamaları sunulmuştur.

1.1 Depo yerleşim planı oluşturmanın amacı

Depo yerleşim planı oluşturmanın amaçlarına bakıldığında (Frazelle, 2002: 272);

- Mevcut durumlardaki depo alanını en verimli şekilde kullanmak,
- Ürün taşıma sürelerinin etkin bir şekilde gerçekleşmesini sağlamak,
- Stok bulundurma maliyetlerini en ekonomik şekilde gerçekleşmesi adına depo kullanım alanı, depo ekipmanları ve iş gücü maliyetlerinin minimum seviyede olmasını sağlamak,
- Değişen stok türü ve elleçleme ihtiyacını en esnek biçimde sağlamak.
- Depolama işlemlerinin eksiksiz bir biçimde gerçekleşmesi adına ortam düzenini sağlamak şeklinde sıralanabilir.

Depo yerleşim planı tasarlanırken bu beş maddeye dikkat edilerek kararlar verilmelidir. Etkili bir şekilde tasarlanmış depo yerleşim planı ile depo içerisinde gerçekleşen faaliyetler düzgün bir şekilde yürütülebilmektedir. Tüm bu sebeplerden dolayı işletmeler için depo yerleşim planı oldukça önemlidir. Düşünülmeden ve olası sıkıntılar ön görülmeden tasarlanmış olan depo yerleşim planları; depo alanı, kullanılacak ekipman ve gerekli iş gücü planlanmasını sıkıntıya sokacaktır.

Depolar işletmelerin hareketliliği yüksek olan bölümlerinin başında gelmektedir. Bu hareketlilik göz önünde bulundurularak depo yerleşim planının esnek bir yapıda olmasına özen gösterilmesi gerekmektedir.

1.1.1 Depo yerleşim planı aşamaları

Depo yerleşim planı tasarlanırken ilgili birimler ve kişilerin göz önünde bulundurması gereken faktörler ve takip edilmesi gereken aşamalar aşağıda sıralanmıştır. (Acar ve Çakmak, 2017: 78-79)

- Yerleşim planını sınırlandıran öğelerin tespiti
- Sevkiyat ve mal kabul lokasyonunun tespiti
- Gerekli koridor sayısı, ekipman ve ürünlerin yerleşim alanının belirlenmesi
- Hangi ürünün hangi alanda bulunacağına karar verilmesi

1.1.2 Depo yerleşim alanı düzenleme yaklaşımları

Depo yerleşim planları yapılırken göz önünde bulundurulması gereken önemli yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu yaklaşımlar yöneticiler ve depo tasarımını yapan ilgili kişilere yön gösterebilecek önemli kavramlardır. Bu yaklaşımlar incelendiğinde popülerlik yaklaşımı, benzerlik yaklaşımı, boyut yaklaşımı, ürün özellikleri yaklaşımı ve hacim kullanımı yaklaşımı olarak beş başlık altında incelendiği görülmektedir (Tompkins, 1996: 22).

Popülerlik Yaklaşımı: Popülerlik yaklaşımında depo işlem hacimleri sınıflandırıldığında depoda bulunduran ürünlerin %15' inin işlem hacimlerinin %85' ini, %10' luk işlem hacmini depo içerisindeki ürünlerin %30' u ve geri kalan %5' lik dilimini ise ürünlerin eksik kalan %55' lik kısmının oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu veriler incelendiğinde depodaki ürünler ABC sınıflandırılması yapıldığında işlem hacminin %85' lik dilimini oluşturan ürünler A sınıfı, %10' luk kısmını B sınıfı ürünler ve geri kalan %5' lik kısmını ise C sınıfı olarak tanımlamak mümkündür.

Benzerlik yaklaşımı: Bu yaklaşıma göre alım veya satım işlemleri sıklıkla birlikte gerçekleştirilen ürünlerin birbirlerine yakın yerleştirilmesi önerilmektedir. Benzer ürünleri birbirlerine yakın alanlarda muhafaza etmek depo içerisindeki dolaşım sürelerini kısaltarak gereksiz işgücü kaybı oluşturmayacaktır. Birbirlerine benzer özelliklerde olan ürünlerin yakın mesafede bulunmasının bir başka faydası ise elleçleme işlemlerinin aynı olabileceğinden verimli bir şekilde bu işlemleri gerçekleştirmek mümkün olacaktır.

Boyut yaklaşımı: Bu yaklaşıma göre, depolama işlemlerinde verimliliği arttırmak adına ağırlığı yüksek, büyük hacimli, taşınması güç olan ürünlerin işlem görecekları yerlere yakın yerleştirilmeleri gerekmektedir. Bu tür ürünlerin taşıma mesafesini minimize etmek depolama maliyetlerinin azaltılmasında önemlidir. Ürün ağırlıkları fazlalaştığında yatay boyutta giriş/çıkış kapılarına yakınlığı, dikey boyutta ise alt raflara yerleştirilmeleri önemli olmaktadır.

Ürün özellikleri yaklaşımı: Depolanacak ürünlerin özellikleri bazen onlara ayrıcalık tanınmasını gerektirmektedir. Raf ömrü kısa olan ürünlerin konumlandırılmaları yapılırken ürün sirkülasyon hızının yüksek olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Bu tür ürünlerde FİFO yaklaşımı uygulandığından üretim tarihi ilk olan ürünlerin sevkiyatlarının en önce yapılması gerekmektedir, son tüketim tarihleri yakınlaşmadan bu ürünlerin elden çıkarılması ve müşteriye ulaştırılması önemlidir.

Patlayıcı, sağlık açısından teması zararlı, ya da temizlik malzemelerinin de depolanmaları için özelliklerine uygun şartlar altında olmalıdır. Ek olarak özel depolama alanları gerektirebilmektedir. İşletmelerin ürünün dış görünüm olarak farklı olması boyutlarının simetrik olmaması gibi etkenlerde göz önünde bulundurularak depo yerleşim planı yapması gerekmektedir.

Hacim Kullanımı Yaklaşımı: Hacim kullanımı üç şeye bağlıdır: Hacmin korunması: kübik hacim kullanımını en yüksek düzeye çıkarmayı ve hücre yapısında yayılma durumu azaltmayı hedefler. Hacmi en büyükleyerek esneklik ve büyük boyutlu malzemelerin kapasitesini artırmak olanaklı olur. Hacmin sınırları: Hacim kullanımı tavan yükseklikleri, tavandaki yangın söndürme vanaları, zemin yükleri, sütunlar ve malzemelerin üst üste yüklenebilecekleri en güvenli düzey vb. gibi etmenler ile kısıtlanır. Sütunların kısıtlayıcı etkisini azaltmak için malzemeleri sütunların etrafına dizmek daha uygundur. Ulaşılabilirlik: Hacim kullanımına aşırı önem verilmesi, malzemelere ulaşılabilirliği azaltabilir. Örneğin koridorlar raflardaki malzemenin kolayca alınabilmesi için yeterli derecede geniş olmalıdır ve tüm rafların mutlaka koridora bakan bir kenarı olmalıdır. Tüm ana koridorlar düz olmalı ve kapılara doğru yönelmelidir. Koridorlar, kapısı bulunmayan bir duvara doğru yönelmemelidir.

2. Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Depolarda Ürün Atama Problemlerinin Çözümü

Bireysel, kurumsal ya da örgütsel olarak insanoğlu çok çeşitli alternatifler arasında seçim yapmak durumunda kalmaktadır. Bireysel konularda hangi alternatifin seçileceğinin kararını insanoğlu genellikle sezgisel olarak almakta, ancak kurumsal ya da örgütsel alınacak kararlar söz konusu olduğunda bilimsel yaklaşımlar kullanılarak alternatifler arasında tercihler yapılmaktadır. Bu bilimsel yöntemler literatürde Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri başlığı altında toplanmıştır. Çok kriterli karar verme teknikleri ile birçok alternatif arasından, mevcut koşullara en uygun olan tercihin seçimi yapılabilmektedir.

Çalışmamızda bir fabrikada üretilen ürünler için optimum ürün atama çalışması çok kriterli karar verme teknikleri ile yapılacaktır.

2.1 Depolarda ürün atama problemlerinde çok kriterli karar verme tekniklerini kullanan çalışmalar

Konu ile ilgili yapılan literatür çalışmasında bulunan çalışmalar kronolojik olarak Tablo 2.1 'de sıralanmıştır.

Tablo 2.1 Literatür Çalışmaları

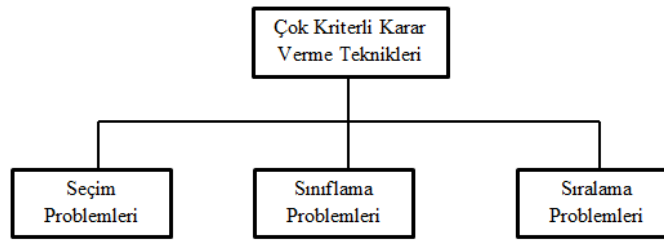
Yazar Adı	Yılı	Çalışma Adı	Kullanılan ÇKKV Tekniği
Sébastien Damart , Luis C. Dias, Vincent Mousseau.	2007	Supporting groups in sorting decisions: Methodology and use of a multi-criteria aggregation/disaggregation DSS/ Sıralama kararlarında destekleyici gruplar: Metodoloji ve çok kriterli toplama/ayırma KDS'nin kullanımı	ELECTRE TRI
Fontana, M. E., ve Cavalcante, C. A. V	2013	ELECTRE TRI Method Used To Storage Location Assignment Into Categories/ Kategorilere Göre Depolama Yeri Tayininde Kullanılan Electre TRI Yöntemi	ELECTRE TRI
Fontana, M. E., ve Cavalcante, C. A. V	2014	Using the Efficient Frontier to Obtain the Best Solution for the Storage Location Assignment Problem/ Depolama Yeri Atama Sorununa En İyi Çözümü Elde Etmek İçin Etkin Sınırın Kullanılması	PROMETHEE
Fontana, M. E., ve Cavalcante, C. A. V.	2014	Use of Promethee method to determine the best alternative for warehouse storage location assignment./ Depo depolama yeri atamasında en iyi alternatifi belirlemek için Promethee yönteminin kullanılması.	PROMETHEE

Tablo 2.2 (devam) Literatür Çalışmaları

Yazar Adı	Yılı	Çalışma Adı	Kullanılan ÇKKV Tekniği
			SMARTER
Da Silva, D. D., De Vasconcelos, N. V. C., ve Cavalcante,	2015	Multicriteria decision model to support the assignment of storage location of products in a warehouse./ Bir depodaki ürünlerin depolama yerinin atanmasını desteklemek için çok kriterli karar modeli.	
Fontana, M. E., ve Nepomuceno, V. S..	2016	Multi-criteria approach for products classification and their storage location assignment/ Ürün sınıflandırması ve depolama yeri ataması için çok kriterli yaklaşım	ELECTRE TRI-ELECTRE III
R. Micale, C.M. La Fata*, G. La Scalia	2019	A combined interval-valued ELECTRE TRI and TOPSIS approach for solving the storage location assignment problem/ Depolama yeri atama problemini çözmek için birleşik bir aralık değerli ELECTRE TRI ve TOPSIS yaklaşımı	ELECTRE TRI-TOPSİS
Sarıcan, B.	2019	Depolama Alanı Ürün Atama Problemi İçin En İyi Alternatif Konumun Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri İle Belirlenmesi	ELECTRE TRI- TOPSİS
Fontana, M. E., López, J. C. L., Cavalcante, C. A. V., ve Noriega, J. J. S.	2020	Model to Solve The Storage Location Assignment Problem./ Depolama Yeri Atama Problemini Çözecek Model.	ELECTRE III
Yerlikaya, M. A. (2020)..	2020	Storage Location Assignment with Fuzzy PROMETHEE Method in Warehouse Systems with Uncertain Demand./ Talep Belirsiz Depo Sistemlerinde Bulanık PROMETHEE Yöntemi ile Depo Yeri Tayini.	Fuzzy PROMETHEE
Asgari Siahboomy, M., Sarvari, H., Chan, D. W., Nasserredine, H., ve Chen, Z.	2021	A multi-criteria optimization study for locating industrial warehouses with the integration of BIM and GIS data./ BIM ve GIS verilerinin entegrasyonu ile endüstriyel depoların yerini belirlemek için çok kriterli bir optimizasyon çalışması.	Analytic Hierarchy Process (AHP)

2.2 Çok kriterli karar verme teknikleri

Çok kriterli karar verme teknikleri, üç ana problem türünde etkili bir şekilde kullanılabilir. Bu problem türleri; sınıflama, sıralama ve seçim problemleridir (Vassilev vd. 2005: 2).



Şekil 2.1 Çok Kriterli Karar Verme Problem Türleri

Seçim Problemleri: Seçim problemlerindeki temel amaç, alternatifler arasında en iyi olan seçeneğin belirlenmesidir. Personel seçimi, tedarikçi seçimi, depo yeri seçimi, araba seçimi işlemleri gibi çeşitli alanlarda kullanılabilen bir çalışmadır.

Sınıflama Problemleri: Bu çalışmanın yapılmasındaki amaç alternatiflerin belirli kriterler çerçevesinde toplamaktır. Personel verimliliğinin başarılı ya da başarısız şeklinde sınıflandırılması bu tür çalışmalara örnektir.

Sıralama Problemleri: Bu tür problemlerde alternatifler en iyi olandan en kötü olana doğru sıralanır. Türkiye’deki eğitimde en başarılı şehir çalışması bu tür problemlere örnek verilebilmektedir.

Çok kriterli karar verme problemlerinin çözümü için kullanılacak oldukça fazla problem çözüm tekniği bulunmaktadır. Herhangi bir problemle karşı karşıya kalan karar vericiler, gelişen teknoloji ile birlikte problem çözme tekniklerini kullanarak hızlı ve etkili şekilde alternatifler arasından en uygun seçeneğe ulaşmaktadırlar.

Problem türleri için kullanılacak çok kriterli karar verme teknikleri Tablo 2.2’de tasnif edilmiştir (Yıldırım ve Önder, 2018: 19).

Tablo 2.3 Çok Kriterli Karar Verme Problemleri ve Teknikleri

Seçim Problemleri	Sıralama Problemleri	Sınıflama Problemleri
AHP	AHP	AHPSort
ANP	ANP	UTADIS
MAUT/ UTA	MAUT/ UTA	Flowsort
MACBETH	MACBETH	ELECTRE-TRI
PROMETHEE	PROMETHEE	
ELECTRE I	ELECTRE III	
TOPSİS	TOPSİS	
Hedef Programlama	VIKOR	

2.3 Çalışmada kullanılan çok kriterli karar verme teknikleri

Çok kriterli karar verme teknikleri; sıralama, seçme, sınıflama problemleri için kullanılabilen yöntemlerdir. Çalışmada kullanılacak olan çok kriterli karar verme teknikleri seçilirken, yapılacak olan işlemler göz önünde bulundurulmuştur. Dikey boyutta sınıflandırma çalışması için ELECTRE TRI tekniği, yatay boyutta sıralama işlemleri için ise VIKOR ve TOPSIS teknikleri tercih edilmiştir. Sıralama, seçim ve sınıflandırma problemleri için kullanılacak diğer alternatifler olan çok kriterli karar verme teknikleri Tablo 2.2' de gösterilmiştir. Kullanılacak tekniklerin seçiminde işletme yapısı, ürün özellikleri ya da depo özellikleri seçeceğimiz tekniği etkilememektedir.

3. Cıvata Fabrikası Deposunda Bir Uygulama

3.1. Araştırmanın amacı ve önemi

Depolama yönetimi işletmeler için en önemli faaliyetlerden birisidir. İşletmelerin müşterileri ile irtibatının yüksek olduğu bölüm olarak nitelendirilebileceğimiz depo alanları sipariş ürünlerin müşteriye hatasız ve en kısa sürede eksiksiz iletilmesinin sağlandığı kısımlardır. Bu kapsamda, uygulamayı gerçekleştireceğimiz depo alanı Malatya 2. Organize sanayinde cıvata imalatı yapan bir fabrikanın depolama alanıdır. Bu işletmenin depolama alanının verimliliğini arttırmak, ürünlerin taşınması esnasında boşa geçen zamanı azaltmak ve ürünlerin bu amaçlar doğrultusunda yerleştirilmesini sağlamak çalışmamızın ana amaçlarını oluşturmaktadır.

Bu çalışma, fabrikadaki verimliliğe olumsuz yönde etki eden depolama faaliyetlerinin belirlenmesi ve iyileştirmesine yönelik önerilerin geliştirilebilmesi açısından önemli olacaktır. Ayrıca çalışma, fabrikalar için depolama faaliyetlerinde oluşan problemlere sistematik yaklaşım açısından örnek olma özelliği taşıyacaktır.

Depolarda ürün atama problemleri üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde çalışmaların uygulama olarak yapılmadığı genel olarak varsayımsal depolama özelliklerine göre gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir. Çalışmanın özgün değerini, gerçek depolama alanı özelliklerinin baz alınarak yapılması oluşturmaktadır. Malatya sanayinde benzer bir çalışmanın yapılmamış olması çalışmanın diğer işletmeler için de farkındalık oluşturması açısından son derece önemlidir. Ayrıca, çalışmanın gerçekleştirildiği depolama alanı ile ilgili sıkıntıların belirlenmesi ve incelemeler sonucunda elde edilecek sonuçlar ele alındığında uygulamanın farklı sektörler için de uygulanabilecek bir çalışma olduğu gözlemlenmiştir. Bu çerçevede, uygulamanın hem literatüre hem de işletmelerin gelişmesine katkı sağlayacağını ifade etmek mümkündür.

3.2. Araştırmanın yöntemi

Ürün atama problemlerinde optimizasyon için birçok yöntem kullanılabilir. Bu çalışmada, ÇKKV teknikleri kullanılmıştır. Dikey boyutta sınıflandırma çalışması için ÇKKV tekniklerinden ELECTRE TRI yöntemi kullanılacaktır. Yatay boyutta sıralama çalışması için de ÇKKV tekniklerinden TOPSIS ve VIKOR yöntemleri ayrı ayrı uygulanarak çıkan sonuçların tutarlılığı değerlendirilecektir.

Ürün önceliklendirilmesi ve bu önceliklendirmeye dayanarak yapılacak çalışma için beş ayrı kriter kullanılacaktır. Kriterler literatür taraması aşamasında bulunan çalışmalardan derlenerek uygulamanın yapılacağı ürün özelliklerine uygun olanlar seçilerek oluşturulmuştur (Micale vd., 2019: 207; Fontana vd., 2013: 294).

Bu kriterler ağırlık, müşteri duyarlılığı, kârlılık, popülerlik ve talep olarak belirlenmiştir. Kriter ağırlıklandırma için fabrikada bulunan uzman isimlerle görüşülmüş, odak grup görüşmeleri tekniği kullanılarak sonuca varılmıştır. Dikey boyutta sınıflandırma çalışması yapılırken kullanılacak kriterler; ağırlık, talep, kârlılık ve popülerlik, yatay boyutta sıralama çalışmasında kullanılacak kriterler müşteri duyarlılığı, kârlılık, popülerlik ve talep kriterleri olarak belirlenmiştir.

3.3. Kriter ağırlıklandırma

Depolama alanı konumlandırma problemi için yatay ve dikey boyutta kullanılmasına karar verilen kriterlerin ağırlıklandırmaları yapılırken Tablo 3.1 ve 3.2' de bulunan görüş bildirim formları kullanılmıştır.

Tablo 3.4 Dikey Boyut Kriter Ağırlıklandırma Formu

Kriterler	Dikey Boyut Kriterleri	Ağırlıkları
K₁ (Ağırlık)		
K₃ (Talep)		
K₄ (Karlılık)		
K₅ (Popülerlik)		
	Kriter 1 (K₁) - Ağırlık	
	Her bir ürün grubunun ağırlığını temsil eder ve dikey seviyede ürünün atamasını belirler. Bu değer ne kadar yüksekse, ürünün yerleştirilmesi gereken seviye o kadar düşük olur. Bu nedenle, K ₁ kriteri, artan bir tercihe karşı karakterize edilir. K ₁ kriteri ile ilgili olarak değerlendirmeler kg cinsinden ifade edilir.	
	Kriter 3 (K₃) - Talep	
	K ₃ kriterinin hem yatay hem de dikey boyutlarla ilgili olarak her ürünün atamasını oluşturduğu düşünülmektedir. K ₃ kriterinde yüksek değerler ile karakterize edilen ürünler, alt raflara ve giriş/çıkış istasyonuna yakın olarak atanmalıdır. Bu tür bir kriter, her iki boyuta göre artan bir tercihe sahiptir.	
	Kriter 4 (K₄) - Karlılık	
	K ₄ kriterinde yüksek değerler ile karakterize edilen ürünler, alt raflara ve giriş/çıkış istasyonuna yakın olarak atanmalıdır. Tüketicinin taleplerini hızlı bir şekilde karşılamak için geri alma süresinin en aza indirilmesini sağlar. Bu nedenle, bu kriterin hem yatay hem de dikey boyutlarla ilgili olarak ürünlerin konumlandırmasını oluşturduğu kabul edilir ve her iki boyuta göre artan bir tercihle karakterize edilir.	
	Kriter 5 (K₅) - Popülerlik	
	Belirli bir zaman diliminde her ürün kategorisinin hizmet verdiği ortalama tüketici sayısını temsil eder. Her iki boyutla ilgili olarak artan bir tercihle karakterize edilir, yani popülerlik ne kadar yüksekse, raf seviyesi o kadar düşük ve giriş/çıkış istasyonuna ürün o kadar yakındır.	

Tablo 3.5 Yatay Boyut Kriter Ağırlıklandırma Formu

Kriterler	Yatay Boyut Kriterleri	Ağırlıkları
K₂ (Müşteri Duyarlılığı)		
K₃ (Talep)		
K₄ (Karlılık)		
K₅ (Popülerlik)		
	Kriter 2 (K₂)- Müşteri Duyarlılığı	
	Bir müşterinin belirli ürünü, örneğin siparişinin yavaş teslimatı gibi hizmet düzeyine duyarlı olabilir. Bu kriterde ürünler, çok, orta, az, çok az olan dilsel değişkenler aracılığıyla değerlendirilir.	
	Kriter 3 (K₃) - Talep	
	Bir ürün kategorisinin istenilen bir zaman aralığında gerekli olan ortalama ürün miktarını ifade eder. K ₃ kriterinin hem yatay hem de dikey boyutlarla ilgili olarak her ürünün atamasını oluşturduğu düşünülmektedir. K ₃ kriterinde yüksek değerler ile karakterize edilen ürünler, alt raflara ve giriş/çıkış istasyonuna yakın olarak atanmalıdır.	
	Kriter 4 (K₄) - Karlılık	
	K ₄ kriteri, şirketin karlılığına katkısı açısından her ürün kategorisinin önemini dikkate alır. K ₄ kriterinde yüksek değerler ile karakterize edilen ürünler, alt raflara ve giriş/çıkış istasyonuna yakın olarak atanmalıdır. İkincisi, tüketicinin taleplerini hızlı bir şekilde karşılamak için geri alma süresinin en aza indirilmesini sağlar. Bu nedenle, bu kriterin hem yatay hem de dikey boyutlarla ilgili olarak ürünlerin konumlandırmasını oluşturduğu kabul edilir ve her iki boyuta göre artan bir tercihle karakterize edilir.	
	Kriter 5 (K₅) - Popülerlik	
	Hem yatay hem de dikey boyutlarla ilgili olarak her ürünün atamasını oluşturmak için K ₅ kriteri dikkate alınmalıdır. Belirli bir zaman diliminde her ürün kategorisinin hizmet verdiği ortalama tüketici sayısını temsil eder. Her iki boyutla ilgili olarak artan bir tercihle karakterize edilir, yani popülerlik ne kadar yüksekse, raf seviyesi o kadar düşük ve giriş/çıkış istasyonuna ürün o kadar yakındır.	

Görüş formları fabrika içerisinde çalışan dokuz alanında uzman kişi tarafından puanlanmıştır. Hesaplamalar yapılırken kriter ağırlıkları hakkında görüş bildiren uzmanların her birinin önem derecesi eşit seviyede kabul edilip hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Puanlamaların aritmetik ortalamaları alınarak ÇKKV tekniklerinde kullanılacak olan kriter ağırlıkları Tablo 3.3' te ve 3.4' te hesaplanmıştır.

Tablo 3.6 Dikey Boyutta Kullanılacak Kriter Ağırlık Değerleri

Kriterler	Ağırlıkları	Dikey Boyut								
		1. Görüş	2. Görüş	3. Görüş	4. Görüş	5. Görüş	6. Görüş	7. Görüş	8. Görüş	9. Görüş
K₁	0,38	0,2	0,4	0,3	0,4	0,5	0,35	0,35	0,4	0,5
K₃	0,31	0,5	0,2	0,4	0,3	0,2	0,25	0,25	0,4	0,3
K₄	0,14	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,15	0,25	0,05	0,1
K₅	0,17	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,25	0,15	0,15	0,1
Toplam	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tablo 3.7 Yatay Boyutta Kullanılacak Kriter Ağırlık Değerleri

Kriterler	Ağırlıkları	Yatay Boyut								
		1. Görüş	2. Görüş	3. Görüş	4. Görüş	5. Görüş	6. Görüş	7. Görüş	8. Görüş	9. Görüş
K₂	0,24	0,2	0,35	0,2	0,2	0,3	0,1	0,25	0,35	0,2
K₃	0,38	0,3	0,25	0,4	0,3	0,4	0,5	0,4	0,4	0,45
K₄	0,17	0,2	0,15	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,05	0,1
K₅	0,22	0,3	0,25	0,2	0,3	0,1	0,2	0,15	0,2	0,25
Toplam	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Depo konumlanmasında dikey konumda en alt raf C_1 sınıfı olarak tanımlanmıştır. Bir üstteki raf C_2 sınıfı, üçüncü seviye C_3 sınıfı ve son olarak dördüncü seviye C_4 sınıfı olarak belirtilmiştir. Çalışmamızın gerçekleştiği civata fabrikasında üretilen 25 farklı ürün çeşidi alternatiflerimizi ($a_1, a_2, a_3, \dots, a_{25}$) temsil etmektedir. Mevcut durumda depolama alanında dikey boyutta alternatiflerin dört kademeli sınıflama çalışması ELECTRE TRI yöntemi sonucu $a_4, a_5, a_7, a_8, a_{21}, a_{23}$ C_1 sınıfı, $a_1, a_3, a_6, a_9, a_{19}, a_{22}, a_{24}$ C_2 sınıfı, $a_2, a_{15}, a_{17}, a_{18}, a_{25}$ C_3 sınıfı ve son olarak $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{16}, a_{20}$ alternatifleri C_4 sınıfı şeklinde gerçekleşmiştir.

Yirmibeş alternatifin popülerlik, kârlılık, talep, ağırlık kriter değerleri fabrikanın veri tabanından alınan veriler incelenerek oluşturulmuştur. Kârlılık kriterinde işletmeye en çok kâr getiren üründen en az kârli ürüne göre azalan bir sıralama yapılmıştır. Talep kriteri değerlendirilirken üretim miktarları yüksek olan üründen az olan ürüne doğru azalan şekilde sıralama yapılmıştır. Popülerlik kriterinde en çok satışı gerçekleşen üründen daha az satışı olan ürüne doğru azalan bir sıralama gerçekleştirilmiştir. Ağırlık kriteri değerlendirilirken, ürünler ağırlıklarına göre azalan bir şekilde sıralanmıştır. Bu azalan sıralama sonucunda ağırlıklı ortalama yapılarak alternatiflerin kriterler değerleri hesaplanmıştır. Müşteri duyarlılığı kriteri, çok, orta, az, çok az olan dilsel değişkenler aracılığıyla değerlendirilip, çok az için 0-25, az için 25-50, orta için 50-75 ve son olarak çok için 75-100 arasında dört kademeli şekilde müşteri ile birebir teması olan saha çalışanlarının puanlamaları sonucu elde edilmiştir. Müşteri duyarlılığı yüksek ürünlere 100'e yakın puanlama duyarlılığı düşük olan ürüne daha düşük puanlar verilmesi talep edilmiştir. Tüm kriterlerin puanlamaları sonucu normalizasyon işlemleri yapılarak kriterlerin veri bütünlüğü sağlanmıştır.

3.4. Mevcut durum analizi

İşletme depo alanının mevcut durumuna bakıldığında, raflarda boşluklar olmasına rağmen rafların önünde ürünlerin yerlerde bulunduğu bu sebeple de ürün taşıma ve sevkiyata ürün hazırlama sürelerinin uzun olduğu gözlemlenmiştir. Kayıp zamana yol açacak şekildeki bu tip yerleşimler sevkiyat hızını azaltacağından ürünlerin özelliklerine göre tahsis edilmiş alanlara konumlandırılması bu tür kayıpların önüne geçecektir.

Mevcut depoda, ürün konumlandırma işleminin raflarda hangi alan boş ise oraya yerleştirme şeklinde gelişigüzel gerçekleştiği; müşteri duyarlılığı, kârlılık, popülerlik ve talep kriterlerinin göz önünde bulundurulmadan konumlandırıldığı belirlenmiştir. Kriter özelliklerine bakıldığında;

Popülerlik kriteri; belirli bir zaman diliminde her ürün kategorisinin hizmet verdiği ortalama tüketici sayısını temsil etmektedir. Her iki boyutla ilgili olarak artan bir tercihle karakterize edilir, yani popülerlik ne kadar yüksekse, raf seviyesi o kadar düşük ve giriş/çıkış istasyonuna ürün o kadar yakın olmalıdır.

Kârlılık kriteri, şirketin karlılığına katkısı açısından her ürün kategorisinin önemini dikkate alır. Kârlılık kriterinde yüksek değerler ile karakterize edilen ürünler, alt raflara ve giriş/çıkış istasyonuna yakın olarak atanmalıdır. Ayrıca, tüketicinin taleplerini hızlı bir şekilde karşılamak için geri alma süresinin en aza indirilmesi sağlanmalıdır.

Talep kriteri, bir ürün kategorisinin istenilen bir zaman aralığında gerekli olan ortalama ürün miktarını ifade eder. Talep kriterinde yüksek değerler ile karakterize edilen ürünler, alt raflara ve giriş/çıkış istasyonuna yakın olarak atanmalıdır.

Müşteri duyarlılığı kriteri, bir müşterinin belirli ürünü, örneğin siparişinin yavaş teslimatı gibi hizmet düzeyine duyarlı olabilmesi durumudur. Bu tür durumlarda sevkiyatın gecikmemesi adına duyarlılığı yüksek ürünlerin erişiminin kolay olması gerekmektedir.

Müşteri kayıplarına neden olabilecek hatalara sebebiyet vermemek adına, ürünlerin özellikleri göz önünde bulundurularak giriş/çıkış kapısına yakın konumlandırılmalarının yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

3.5. Dikey boyutta sınıflandırma

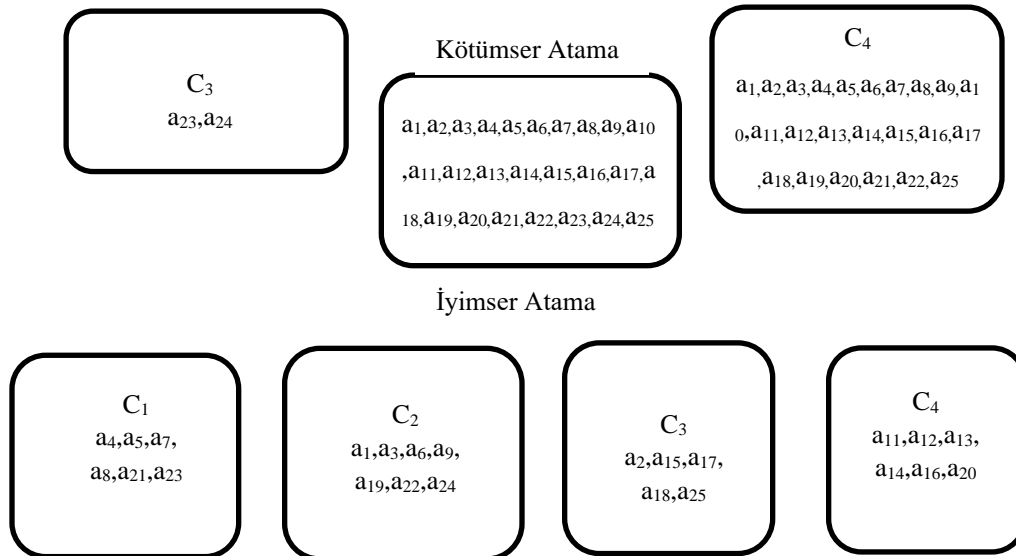
Çalışma kapsamında ELECTRE TRI yöntemi kullanılarak, depo kullanım alanının dikey yerleşiminde ürün gruplarının sınıflarının belirlenmesi çalışması yapılmıştır. En alt seviyedeki raflar C_1 sınıfı olmak üzere ikinci seviyedeki raflar C_2 sınıfını, üçüncü seviyedeki raflar C_3 sınıfını ve son olarak dördüncü seviyede bulunan raflar C_4 sınıfını oluşturmaktadır.

b_1 , b_2 ve b_3 profilleri, C_1 ve C_2 (b_1), C_2 ve C_3 (b_2), C_3 ve C_4 (b_3) sınıfları arasındaki sınırlardır. Bu çalışmada kullanılan, C_1 , C_2 , C_3 , C_4 sınıflarına ait profil değerleri ve tüm kriterler Tablo 3.5'te görülebilir. Çıkarılan profiller ve kriter ağırlıkları için kayıtsızlık eşiği $q = 1$, tercih eşiği $p = 2$ ve kesme seviyesi $\lambda = 0.76$ olarak literatür taraması ile belirlenmiştir. (Micale vd. 2019:207; Fontana vd. 2013: 294)

Tablo 3.8 ELECTRE TRI Tercih Parametreleri

Kriterler	Ağırlıklar	Eşik Değerleri		Profil Değerleri		
		q	p	b_1	b_2	b_3
K_1 (Ağırlık)	0,38	1	2	25	50	75
K_3 (Talep)	0,31	1	2	25	50	75
K_4 (Karlılık)	0,14	1	2	15	45	65
K_5 (Popülerlik)	0,17	1	2	4	6	8

Depo konumlanmasında dikey konumda en alt raf C_1 sınıfı olarak tanımlanmıştır. Bir üstteki raf C_2 sınıfı üçüncü seviye C_3 sınıfı ve son olarak dördüncü seviye C_4 sınıfı olarak belirtilmiştir. Fabrikanın depolama alanında bulunan rafların seviyeleri A rafında beş seviye, B ve C raf hizasında altı seviye, H raf bölümünde ise dört seviyedir. ELECTRE TRI uygulaması çalıştırılırken dört seviye üzerinden uygulama gerçekleştirilmiş olup C_4 sınıfına atanan ürün gruplarının beşinci ve altıncı seviyelere de konulmasının mümkün olabileceği düşünülmüştür. Şekil 3.1'de ELECTRE TRI 2.0 yazılımı yardımıyla hesaplanan ELECTRE TRI yönteminin iyimser ve kötümser versiyonu ile nihai sonuç gösterilmektedir.



Şekil 3.1 ELECTRE TRI Atama Görseli

ELECTRE TRI atama çıktısına baktığımızda kötümser atama gerçekleştirildiğinde çoğu ürün grubunun C_4 seviyesine atandığı, yalnızca a_{23} ve a_{24} ürünlerinin bir alt basamak olan C_3 seviyesinde kaldığı gözlemlenmektedir. Kötümser atamada bu durumun gerçekleşme sebebi; ürün grupları değerlendirilirken kriter derecelendirme aşamasında bazı kriterlerde çok iyi olan alternatifler ve diğer kriterlerde

çok kötü derecelendirmeye sahip olabilmesi şeklinde açıklanabilir. İyimsen atama gerçekleştirildiğinde daha makul atamaların gerçekleştiği dört sınıfa ürün grubu atanması yapıldığı gözlemlenmektedir. İyimsen atama ile gerçekleştirilen atama politikası, depolama konumu atanmasını analiz etmek için daha iyi bir seçenek olarak düşünülmüştür.

3.6. Yatay boyutta sıralama

ELECTRE TRI tekniği ilk olarak ürün gruplarını raf seviyelerine atamak için kullanılırken, TOPSIS ve VIKOR teknikleri daha sonra ürün gruplarının her seviyeye yerleştirildiği belirli yatay depolama konumlarını belirlemek için uygulanır. ELECTRE TRI bakış açısına göre, raf seviyeleri, alternatiflerin (yani ürün gruplarının) atanacağı sınıfları temsil ederken, TOPSIS ve VIKOR teknikleri, depolama alanında giriş çıkış kapısına yakınlık çerçevesinde ürün konumlandırmak için her sınıfta (C_1, C_2, C_3, C_4) uygulanır.

Yatay boyutta ÇKKV teknikleri uygulanırken dikkate alınacak olan kriterler ve ağırlıkları Tablo 3.6' da gösterilmiştir.

Tablo 3.9 Yatay Boyut Kriterleri ve Ağırlıkları

Kriterler	Ağırlıkları
K₂ (Müşteri Duyarlılığı)	0,24
K₃ (Talep)	0,38
K₄ (Karlılık)	0,17
K₅ (Popülerlik)	0,22

Çalışma içerisinde, satır ve sütun adreslerinin takibi ve formülasyonların daha iyi anlaşılması açısından tablolar excel formatında gösterilmiştir.

3.6.1 TOPSIS uygulaması

$C_1, C_2, C_3,$ ve C_4 sınıfları için TOPSIS tekniğinin altı aşaması tek tek uygulanmış ve aşağıda sonuçları ile birlikte tablanmıştır. Excel formülasyonları yalnızca C_1 sınıfı için ayrıntılı olarak gösterilmiş diğer sınıflarda aynı şekilde uygulanarak sonuçlar elde edilmiştir.

• C_1 Sınıfı için TOPSIS Uygulaması

C_1 sınıfına atanan $a_4, a_5, a_7, a_8, a_{21}, a_{23}$ ürün gruplarının K_2, K_3, K_4 ve K_5 kriterleri için puanlama çalışmaları fabrika içerisinde ve akademik hayatta bulunan uzman kişiler tarafından değerlendirilip oluşturulmuştur. C_1 Sınıfı içerisinde bulunan ürün gruplarına ait puanlama Tablo 3.7' de gösterilmiştir.

Tablo 3.10 C_1 Sınıfı Alternatiflerin Kriter Değerleri

Alternatifler	Müşteri Duyarlılığı	Talep	Karlılık	Popülerlik
a4	0	53,608	100,000	22,222
a5	40	1,166	6,384	11,111
a7	0	10,317	32,229	77,778
a8	40	11,530	26,786	55,556
a21	60	100,000	74,068	100
a23	60	74,000	64,985	88,889

Kriter puanları yukarıdaki tabloda görülen alternatiflerin TOPSIS uygulaması excel çalışma kitabı üzerinden altı aşamada gerçekleştirilmiş olup tablolar ile gösterilmiştir. Bu aşamalar sonucunda C_1 sınıfı için giriş/çıkış kapısına yakın olması gereken ürün grubu Tablo 3.16'de gösterilmiştir.

Tablo 3.11 C_1 Sınıfı karar matrisi

A	B	C	D	E	F
		Kriterler			
1	Ağırlık	0,24	0,38	0,17	0,22
2	Alternatifler	K₂ (Müşteri Duyarlılığı)	K₃ (Talep)	K₄ (Karlılık)	K₅ (Popülerlik)
3	a4	0,000	53,608	100,000	22,222
4	a5	40,000	1,166	6,384	11,111
5	a7	0,000	10,317	32,229	77,778
6	a8	40,000	11,530	26,786	55,556
7	a21	60,000	100,000	74,068	100
8	a23	60,000	74,000	64,985	88,889

C_1 sınıfı için atanan alternatif değerlerin kriter puanları ve kriter ağırlıkları Tablo 3.8' deki gibi bir Excel sayfasına yazılarak karar matrisi elde edilir.

Karar matrisi elde edildikten sonra ikinci aşamada normalize matrisin bulunması için işlemler yapılır.

Tablo 3.12 Normalizasyon işlemi C₁ sınıfı Değerleri

A	B	C	D	E	F
10					
11			Kriterler		
	Alternatifler	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅
12	a ₄	0	2873,803	10000	493,827
13	a ₅	1600	1,358	40,759	123,456
14	a ₇	0	106,445	1038,702	6049,382
15	a ₈	1600	132,946	717,469	3086,419
16	a ₂₁	3600	10000	5486,136	10000
17	a ₂₃	3600	5476,064	4223,074	7901,234
18	Normalize	101,980	136,347	146,649	166,295

Normalizasyon matrisinin elde edilmesi aşamasında her alternatifin kriter değerlerinin kareleri alınır, daha sonra kareleri alınan kriter değerleri sütun sonunda toplanıp toplanan sayının karekökü alınır. Bu değerler Tablo 3.9’ da gösterilmiştir. İlgili hücelere ait excel formülleri;

C12 hücresi için $C12 = C3 * C3$ formülasyonu ile gerçekleştirilen işlem C13, C14, C15, C16 ve C17 hücreleri için ve ayrıca D12, E12, F12 hücreleri içinde uygun hücreler seçilerek gerçekleştirilir.

$C18 = \text{KAREKÖK}(\text{TOPLA}(C12:C17))$, C18 hücresinde gerçekleştirilen işlem D18, E18 ve F18 hücreleri içinde gerçekleştirilerek tüm karar kriterlerine ait $\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}$ değerleri hesaplanır.

Tüm hücrelerde bulunan değerler için $\frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}}$ işlemi gerçekleştirilerek Tablo 3.10 ‘da Normalize edilmiş değerler tablosu elde edilir.

C21 hücresi için $C21 = C3 / C18$ formülasyonu ile gerçekleştirilen işlem C22, C23, C24, C25 ve C26 hücreleri için ve ayrıca D21, E21, F21 hücreleri için uygun hücreler seçilerek gerçekleştirilir.

Tablo 3.13 Normalize edilmiş C₁ sınıfı Değerleri matrisi

A	B	C	D	E	F
19					
20			Kriterler		
	Alternatifler	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅
21	a ₄	0,000	0,393	0,682	0,134
22	a ₅	0,392	0,009	0,044	0,067
23	a ₇	0,000	0,076	0,220	0,468
24	a ₈	0,392	0,085	0,183	0,334
25	a ₂₁	0,588	0,733	0,505	0,601
26	a ₂₃	0,588	0,543	0,443	0,535

C30 hücresi için $C30 = C27 * C21$ formülasyonu ile gerçekleştirilen işlem C31, C32, C33, C34 ve C35 hücreleri için ve ayrıca D30, E30, F30 hücreleri içinde uygun hücreler seçilerek gerçekleştirilir.

Bu işlemler sonucunda da ağırlıklandırılmış normalize matris Tablo 3.11 elde edilmiş olur.

Tablo 3.14 Ağırlıklandırılmış Normalize Matris

A	B	C	D	E	F
27	Ağırlık	0,24	0,38	0,17	0,22
28			Kriterler		
29	Alternatifler	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅
30	a ₄	0,000	0,149	0,116	0,029
31	a ₅	0,094	0,003	0,007	0,015
32	a ₇	0,000	0,029	0,037	0,103
33	a ₈	0,094	0,032	0,031	0,073
34	a ₂₁	0,141	0,279	0,086	0,132
35	a ₂₃	0,141	0,206	0,075	0,118

Ağırlıklandırılmış normalize matris oluşturulma işleminden sonra ideal çözüm değerleri ve negatif ideal çözüm değerleri hesaplanır. İdeal çözüm değerlerini elde etmek için her sütuna ait en yüksek değerler göz önünde bulundurulurken, negatif ideal çözüm değerleri içinde her sütuna en düşük değerler göz önünde bulundurulur. İdeal çözüm değerlerini ve Negatif ideal çözüm değerlerini bulmak için;

$C38 = \text{MAK}(C30:C35)$, C38 hücreleri için yapılan işlem D38, E38 ve F38 hücreleri için de tekrardan yapılır.

$C42 = \text{MIN}(C30:C35)$, C43 hücreleri için yapılan işlem D42, E42 ve F42 hücreleri içinde tekrar edilir. Bu işlemler sonucunda Tablo 3.12’ deki İdeal çözüm değerleri ve Negatif İdeal çözüm değerleri elde edilmiş olacaktır.

Tablo 3.15 İdeal ve Negatif İdeal Çözüm Değerleri

A	B	C	D	E	F
36	İdeal Çözüm Değerleri				
37		K ₂	K ₃	K ₄	K ₅
38		0,141	0,279	0,116	0,132
40	Negatif İdeal Çözüm Değerleri				
41		K ₂	K ₃	K ₄	K ₅
42		0,000	0,003	0,007	0,015

İdeal ve Negatif ideal çözüm değerleri hesaplamaları elde edildikten sonra;

C45 hücresi için $C45=(C30-\$C38\$)^2$ formülasyonu ile gerçekleştirilen işlem C46, C47, C48, C49 ve C50 hücreleri için ve ayrıca D45, E45, F45 hücreleri içinde uygun hücreler seçilerek gerçekleştirilir.

İdeal uzaklığın hesaplanmasında $S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2}$ formülü kullanılmaktadır. Bu formülasyon uygulandıktan sonra tüm karar kriterlerine ait ideal uzaklıklar Tablo 3.13' de ki gibi hesaplanır.

G45=TOPLA(C45:F45), G45 hücreleri için gerçekleştirilen işlem G46, G47, G48, G49 ve G50 hücreleri için, H4=KAREKÖK(G45), H45 hücreleri için gerçekleştirilen işlem H46, H47, H48, H49 ve H50 hücreleri için aynı işlem yapılır.

Tablo 3.16 İdeal Uzaklıklar Tablosu

A	B	C	D	E	F	G	H
43	İdeal Uzaklıklar Tablosu						
44		K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	Toplam	S _i *
45	a4	0,019	0,016	0,000	0,010	0,047	0,217
46	a5	0,002	0,075	0,011	0,013	0,103	0,322
47	a7	0,019	0,062	0,006	0,000	0,089	0,299
48	a8	0,002	0,060	0,007	0,003	0,073	0,271
49	a21	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,030
50	a23	0,000	0,005	0,001	0,000	0,007	0,084

C53 hücresi için $C53=(C30-\$C42\$)^2$ formülasyonu ile gerçekleştirilen işlem C54, C55, C56, C57 ve C58 hücreleri için ve ayrıca D53, E53, F53 hücreleri içinde uygun hücreler seçilerek gerçekleştirilir.

Negatif ideal uzaklığın bulunması için $S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}$ formülasyonu ilgili hücrelere uygulanır. Bu işlem sonucunda her bir karar kriterine ait negatif uzaklıklar Tablo 3.14' deki gibi hesaplanır.

Tablo 3.17 Negatif ideal uzaklıkların elde edilmesi

A	B	C	D	E	F	G	H
51	Negatif İdeal Uzaklıklar Tablosu						
52		K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	Toplam	S _i -
53	a4	0,000	0,021	0,012	0,000	0,033	0,182
54	a5	0,009	0,000	0,000	0,000	0,009	0,094
55	a7	0,000	0,001	0,001	0,008	0,009	0,096
56	a8	0,009	0,001	0,001	0,003	0,014	0,117
57	a21	0,020	0,076	0,006	0,014	0,116	0,340
58	a23	0,020	0,041	0,005	0,011	0,076	0,276

G53 = TOPLA(C53:F53), G53 hücreleri için gerçekleştirilen işlem G54, G55, G56, G57 ve G58 hücreleri için aynı işlem yapılır. H53 = KAREKÖK(G53), H53 hücreleri için gerçekleştirilen işlem H54, H55, H56, H57 ve H58 hücreleri için aynı işlem yapılarak S_i⁻ değerleri elde edilir.

S_i^{*} ve S_i⁻ değerleri Tablo 3.15' teki gibidir.

Tablo 3.18 İdeal ve Negatif ideal çözüm değerleri tablosu

	S _i *	S _i -
a4	0,217	0,182
a5	0,322	0,094
a7	0,299	0,096
a8	0,271	0,117
a21	0,030	0,340
a23	0,084	0,276

İdeal çözüme göreli yakınlığın hesaplanmasında $C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+}$ formülü kullanılmaktadır.

E60 = D60/(D60+C60), E60 hücreleri için gerçekleştirilen işlem E61, E62, E63, E64 ve E65 hücreleri için aynı işlem yapılır. Ürünlerin yatay boyutta en uygun şekilde sıralanması Tablo 3.16' da F sütununda gösterilmiştir.

Tablo 3.19 C₁ Sınıfı TOPSIS Uygulaması Sonucu

A	B	C	D	E	F
59	Alternatifler	Si*	Si-	Ci*	Sıralama
60	a4	0,217	0,182	0,456	3
61	a5	0,322	0,094	0,226	6
62	a7	0,299	0,096	0,244	5
63	a8	0,271	0,117	0,301	4
64	a21	0,030	0,340	0,918	1
65	a23	0,084	0,276	0,766	2

Bu sıralama sonucunda giriş/çıkış kapısına hem yatay hem dikey düzlemde en yakın seviyede bulunması gereken ürün grubu a₂₁ olarak çıkmış, a₅ ürün grubunun ise dikey düzlemde en alt sevide olabileceği ancak yatay seviyede giriş/çıkış kapısına uzak kalabileceği sonucuna varılmıştır.

C₂, C₃ ve C₄ sınıfları içinde TOPSIS uygulaması excel formatında gerçekleştirilerek, Tablo 3.17' deki olası ürün konumlandırması elde edilmiştir.

Tablo 3.17 TOPSIS yöntemi depolama alanı olası ürün konumlandırması

	1	2	3	4	5	6	7
C ₄	a10	a11	a14	a16	a13	a12	a20
C ₃	a2	a18	a25	a15	a17		
C ₂	a22	a24	a19	a9	a3	a6	a1
C ₁	a21	a23	a4	a8	a7	a5	

3.6.2 VIKOR uygulaması

TOPSIS yöntemi ile yapılan sıralama sonuçları ile karşılaştırmak adına VIKOR yöntemi C₁, C₂, C₃, C₄ sınıfları için ayrı ayrı uygulanmıştır. İlgili sınıflara ait sıralama sonuçları elde edilmiştir. C₁ sınıfı için VIKOR uygulaması aşamalı olarak açıklanacak C₂, C₃ ve C₄ sınıflarının sonuçları tablo olarak verilecektir.

• C₁ Sınıfı VIKOR Uygulaması

C₁ sınıfına atanan a₄, a₅, a₇, a₈, a₂₁, a₂₃ ürün gruplarının K₂, K₃, K₄ ve K₅ kriterleri için puanlama çalışmaları fabrika içerisinde ve akademik hayatta bulunan uzman kişiler tarafından değerlendirilip oluşturulmuştur. C₁ Sınıfı içerisinde bulunan ürün gruplarına ait VIKOR yöntemi uygulama sonucu Tablo 3.24'de gösterilmiştir.

VIKOR analizine başlamadan önce kullanılacak kriterlerin özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Çalışmamızda, maliyet özelliğine sahip kriterlerimiz bulunmamakta olup, kriter değerlerimiz fayda özelliği taşıyan kriterler olduğundan "max" olarak gösterilmiştir. Maliyet özelliğine sahip kriterimiz bulunsaydı "min" olarak gösterim yapmamız gerekecekti.

Tablo 3.18 C₁ Sınıfı ürün konumlandırma problemine ait karar matrisi

Alternatifler	Kriterler			
	K ₂ (Müşteri Duyarlılığı)	K ₃ (Talep)	K ₄ (Karlılık)	K ₅ (Popülerlik)
	Ağırlıklar	0,24	0,38	0,17
	Max	Max	Max	Max
a4	0	53,608	100,000	22,222
a5	40	1,166	6,384	11,111
a7	0	10,317	32,229	77,778
a8	40	11,530	26,786	55,556
a21	60	100,000	74,068	100
a23	60	74,000	64,985	88,889

Tablo 3.18' de gösterilen karar matrisi oluşturulduktan sonra, kriterlerin maliyet ve fayda özelliklerini bulundurma durumları göz önünde bulundurularak, tüm kriterler için en iyi ve en kötü değerlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu değerlerin belirlenmesi aşamasında excel çalışma sayfasında kriter özelliklerine göre hesaplama yapan mantıksal sınıma işlevi kullanılmıştır.

En iyi ve en kötü değerlerin hesaplanmasında, kriterler için;

$$C10 = \text{EĞER}(C3 = \text{"min"}; \text{MIN}(C4:C9); \text{MAX}(C4:C9))$$

C11= EĞER (C3="min";MAK(C4:C9);MIN(C4:C9)) formülasyonları kullanılarak f_j^* ve f_j^- değerlerinin bulunduğu Tablo 3.19' da gibidir.

Tablo 3.20 En iyi ve en kötü kriter değerleri

A	B	C	D	E	F
1	Alternatifler	K ₂ (Müşteri Duyarlılığı)	K ₃ (Talep)	K ₄ (Karlılık)	K ₅ (Popülerlik)
2	Ağırlıklar	0,24	0,38	0,17	0,22
3		Max	Max	Max	Max
4	a4	0	53,608	100,000	22,222
5	a5	40	1,166	6,384	11,111
6	a7	0	10,317	32,229	77,778
7	a8	40	11,530	26,786	55,556
8	a21	60	100,000	74,068	100
9	a23	60	74,000	64,985	88,889
10	fj*	60	53,608	100,000	22,222
11	fj-	0	1,165	6,384	11,111

Kriterlerin birimlerinden arınması amacı ile gerçekleştirilen normalizasyon işlemi lineer normalizasyon işlemi, esasına dayanmakta olup $r_{ij} = \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-}$ formülasyonu ile tüm değerler normalize edilmiştir. Excel çalışma sayfasında normalize edilmiş tablo oluşturulurken;

Tablo 3.20 Normalizasyon Matrisi

A	B	C	D	E	F
12					
13	Alternatifler	K ₂ (Müşteri Duyarlılığı)	K ₃ (Talep)	K ₄ (Karlılık)	K ₅ (Popülerlik)
14	Ağırlıklar	0,24	0,38	0,17	0,22
15		Max	Max	Max	Max
16	a4	1,000	0,469	0,000	0,875
17	a5	0,333	1,000	1,000	1,000
18	a7	1,000	0,907	0,724	0,250
19	a8	0,333	0,895	0,782	0,500
20	a21	0,000	0,000	0,277	0,000
21	a23	0,000	0,263	0,374	0,125

C16 = (C\$10-C4)/(C\$10-C\$11) işlemi gerçekleştirilmiş bu işlem C16:F21 hücre aralığında kopyalanarak normalizasyon işlemi gerçekleştirilmiş, Tablo 3.20' de gösterilmiştir.

Normalize edilmiş karar matrisi her bir kritere ait ağırlık değerleri ile çarpılarak ağırlıklandırılmıştır.

C26=C16*C\$24 işlemi gerçekleştirilerek, C26 hücresine ait normalize edilmiş skor değeri kritere ait ağırlık değeri ile çarpılmış ve ilgili alternatiflere ait ağırlıklı normalize edilmiş değer bulunmuştur. Bu işlem C26: F31 hücre aralığında kopyalanarak tüm alternatiflere ait ağırlıklandırılmış değerlerin hesaplaması yaptırılıp Tablo 3.21' de gösterilmiştir.

Tablo 3.21 Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi

A	B	C	D	E	F
22					
23	Alternatifler	K ₂ (Müşteri Duyarlılığı)	K ₃ (Talep)	K ₄ (Karlılık)	K ₅ (Popülerlik)
24	Ağırlıklar	0,24	0,38	0,17	0,22
25		Max	Max	Max	Max
26	a4	0,240	0,178	0,000	0,193
27	a5	0,080	1,000	0,170	0,220
28	a7	0,240	0,907	0,123	0,055
29	a8	0,080	0,895	0,133	0,110
30	a21	0,000	0,000	0,047	0,000
31	a23	0,000	0,263	0,064	0,028

Tüm alternatif için ortalama ve en kötü grup skorlarını gösteren S_i ve R_i değerlerinin hesaplanmasında;

$$G35 = \text{TOPLA}(C35: F35),$$

$$H35 = \text{MAK} (C35: F35), \text{ formülasyonları kullanılmıştır.}$$

G35 hücresinde yer alan formül G35:G40 hücreleri aralığında, H35 hücresinde yer alan formül H35:H40 hücreleri aralığında kopyalanarak ilgili alternatiflere ait ortalama grup ve en kötü grup değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 3.22' de gösterilmiştir.

Tablo 3.22 S_i ve R_i Değerleri

A	B	C	D	E	F	G	H
32			Kriterler			Ortalama	
33	Ağırlıklar	0,24	0,38	0,17	0,22	Grup	En Kötü Grup
34	Alternatifler	K_2	K_3	K_4	K_5	Değerleri	Değerleri
35	a4	0,24	0,178	0	0,192	S_i	R_i
36	a5	0,08	0,380	0,17	0,22	0,610	0,24
37	a7	0,24	0,344	0,123	0,055	0,850	0,38
38	a8	0,08	0,340	0,132	0,11	0,762	0,344
39	a21	0	0	0,047	0	0,663	0,340
40	a23	0	0,099	0,063	0,0275	0,047	0,047
41	S_i^*	0,047				0,1911	0,099
42	S_i^-	0,850					
43	R_i^*	0,047					
44	R_i^-	0,047					

S_i değerleri hesaplandıktan sonra, $C41 = \text{MIN}(G35:G40)$ formülasyonu ile S_i^* değeri, $C42 = \text{MAK}(G35:G40)$ formülasyonu ile S_i^- değeri bulunmuştur.

R_i değerleri hesaplandıktan sonra, $C43 = \text{MIN}(H35:H40)$ formülasyonu ile R_i^* değeri, $C44 = \text{MAK}(H35:H40)$ formülasyonu ile R_i^- değeri bulunmuştur.

S_i^* , S_i^- , R_i^* ve R_i^- değerleri hesaplandıktan sonra, $q = \{0,00; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0\}$ parametrelerine göre farklı grup faydası değerleri Q_i hesaplanmış Tablo 3.23' de gösterilmiştir.

Tablo 3.23 Hesaplanan S_i , R_i ve Q_i değerleri

A	B	C	D	E	F	G	H	I
45				0	0,25	0,5	0,75	1
46	Alternatifler	S_i	R_i	$q=0,0$	$q=0,25$	$q=0,5$	$q=0,75$	$q=1$
47	a4	0,610	0,240	0	0,175	0,351	0,526	0,702
48	a5	0,850	0,380	0	0,250	0,5	0,750	1
49	a7	0,762	0,344	0	0,222	0,445	0,668	0,891
50	a8	0,663	0,340	0	0,191	0,383	0,575	0,767
51	a21	0,047	0,047	0	0	0	0	0
52	a23	0,191	0,099	0	0,044	0,089	0,134	0,179

$$E47 = (((E\$45 * (\$C47 - \$B\$41)) / (\$B\$42 - \$B\$41)) + (((1 - E\$45) * (D\$47 - \$B\$43)) / (\$B\$44 - \$B\$43)))$$

E47 hücresi için yazılan formülasyon ile ilgili alternatifin Q_i değeri hesaplanmıştır. E47 hücresinde yer alan formül E47:I52 aralığına kopyalanarak farklı q değerlerini göz önünde bulunduran Q_i değerleri hesaplanmış olur.

Tüm alternatifler için Q değerleri bulunduktan sonra, bu değerler göz önünde bulundurularak alternatifler sıralanırlar. Oluşturulan sıralamanın uzlaşık çözümü yansıtmıyorsa yansıtmadığını belirlemek üzere, kabul edilebilir avantaj ve kabul edilebilir istikrar koşullarını sağlayıp sağlamadığına bakılır. Bu kapsamda excel üzerinde yapılan çözümlemeler ve sıralama sonuçları Tablo 3.24' deki gibidir

Tablo 3.24 C_1 Sınıfı VIKOR Uygulama Sonucu

	0	0,25	0,5	0,75	1
Alternatifler	$Q_i(q=0,00)$	$Q_i(q=0,25)$	$Q_i(q=0,5)$	$Q_i(q=0,75)$	$Q_i(q=1)$
a4	1	3	3	3	3
a5	1	6	6	6	6
a7	1	5	5	5	5
a8	1	4	4	4	4
a21	1	1	1	1	1
a23	1	2	2	2	2
$Q(A2)$	0	0,044	0,089	0,134	0,179
$Q(A1)$	0	0	0	0	0
$Q(A2) - Q(A1)$	0	0,044	0,089	0,134	0,179
DQ	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166
Koşul 1	YANLIŞ	YANLIŞ	YANLIŞ	YANLIŞ	DOĞRU
Koşul 2	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU

C₁ sınıfında alternatiflerin yatay düzlemde giriş/çıkış kapısına yakınlık seviyesini belirlemek için yapılan VIKOR analizi sonucunda $q=1,00$, değeri için Kabul Edilebilir Avantaj ve Kabul Edilebilir İstikrar Koşulları' nı aynı anda sağlayan yerleşim şekli en iyi alternatif olarak bulunmuştur.

VIKOR uygulama sonucu uygulandığında Tablo 3.25' deki gibi yerleşim yapılması önerilmektedir. $q=0,000$, $q=0,25$, $q=0,5$ ve $q=0,75$ değerleri kabul edilebilir avantaj koşulunu sağlamadığından değerlendirmeye alınmamıştır.

Tablo 3.25 VIKOR yöntemi C₁ sınıfı ürün konumlandırması

1	2	3	4	5	6
a ₂₁	a ₂₃	a ₄	a ₈	a ₇	a ₅

C₂, C₃ ve C₄ sınıfları içinde VIKOR uygulaması excel formatında gerçekleştirilerek, Tablo 3.26' daki olası ürün konumlandırması elde edilmiştir.

Tablo 3.26 VIKOR yöntemi depolama alanı olası ürün konumlandırması

	1	2	3	4	5	6	7
C ₄	a ₁₀	a ₁₆ /a ₁₁	a ₁₁ /a ₁₆	a ₁₄ /a ₁₃	a ₁₃ /a ₁₄	a ₂₀ /a ₁₂	a ₁₂ /a ₂₀
C ₃	a ₂	a ₁₈	a ₂₅	a ₁₅	a ₁₇		
C ₂	a ₂₄	a ₂₂	a ₁₉	a ₉	a ₁	a ₆ /a ₃	a ₃ /a ₆
C ₁	a ₂₁	a ₂₃	a ₄	a ₈	a ₇	a ₅	

Tablo 3.27 TOPSİS ve VIKOR yöntemi depolama alanı karşılaştırması

VIKOR							
	1	2	3	4	5	6	7
C ₄	a ₁₀	a ₁₆ /a ₁₁	a ₁₁ /a ₁₆	a ₁₄ /a ₁₃	a ₁₃ /a ₁₄	a ₂₀ /a ₁₂	a ₁₂ /a ₂₀
C ₃	a ₂	a ₁₈	a ₂₅	a ₁₅	a ₁₇		
C ₂	a ₂₄	a ₂₂	a ₁₉	a ₉	a ₁	a ₆ /a ₃	a ₃ /a ₆
C ₁	a ₂₁	a ₂₃	a ₄	a ₈	a ₇	a ₅	

TOPSİS							
	1	2	3	4	5	6	7
C ₄	a ₁₀	a ₁₁	a ₁₄	a ₁₆	a ₁₃	a ₁₂	a ₂₀
C ₃	a ₂	a ₁₈	a ₂₅	a ₁₅	a ₁₇		
C ₂	a ₂₂	a ₂₄	a ₁₉	a ₉	a ₃	a ₆	a ₁
C ₁	a ₂₁	a ₂₃	a ₄	a ₈	a ₇	a ₅	

TOPSİS ve VIKOR yöntemleri Tablo 3.27' de görüldüğü üzere TOPSİS ve VIKOR yöntemlerinin gerçekleştirdiği ürün grubu sıralamalarında büyük farklılıkların olmadığı gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak depo alanı belirleme çalışmamızın etkili bir sonuca ulaşabileceği kanaatine varılmıştır.

4. Sonuç

Dünya çapında rekabet gücünün artmasıyla birlikte, şirketler, başarılarının stratejik itici güçleri olarak, maliyet azaltma ve verimlilik optimizasyonuna giderek daha fazla önem vermeye başlamıştır. Bu kapsamda, şirketler son yıllarda depoların yeniden yapılandırılmasının yanı sıra süreçlerin yeniden mühendisliğini ve optimizasyonunu devreye almışlardır. Depo yeniden yapılandırılmasıyla ilgili olarak, Depo Konumu Atama Probleminin (SLAP) çözümü, siparişlerin teslimat süresi, genel lojistik maliyetleri ve müşteri memnuniyeti gibi farklı perspektifler altında depo yönetimi verimliliğini ve etkinliğini artırmak için esastır.

Bu çalışmada depolama faaliyetleri gerçekleştirilirken oluşması muhtemel zaman kayıpları, iş gücü kaybı, taşıma maliyetleri ve sevkiyat gecikmesi ya da ürün yok satma gibi müşteriler ile ilişkilerin zedelenmesine sebep olabilecek olumsuz koşulların engellenmesi adına depo yönetimi çalışmasını gerçekleştirmek amaçlanmıştır. Bu kapsamda civata üretimi yapan bir fabrikada örnek uygulama gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında depolama alanında bulunan ürünlerin çok katmanlı bir depoda, depolama yeri tahsis için ağırlık, talep, karlılık, popülerlik ve müşteri duyarlılığı özelliklerini dikkate alan çok kriterli karar verme tekniklerini kullanarak bir ürün konumlandırma çalışması yapılmıştır.

Kullanılan çok kriterli karar verme teknikleri ELECTRE TRI ve TOPSİS ve VIKOR yöntemleridir. ELECTRE TRI teknik kullanılarak ürünlerin dört seviyeden oluşan rafların hangi basamağında olması gerektiği çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışma sonrasında TOPSİS ve VIKOR yöntemleri kullanılarak yatay boyutta giriş/çıkış kapısına yakınlıkları sıralanmıştır. Her boyut için ortak kullanılan kriterler; karlılık, talep ve popülerliktir. Ağırlık kriteri dikey seviyede yerleşim yapılırken dikkate alınmış, müşteri duyarlılığı kriteri ise yatay konumlandırma aşamasında dikkate alınmıştır.

Çalışma yapılmadan önce literatür taraması gerçekleştirilmiş ancak uygulamalı olarak depo yerleşim alanı tahsis eden herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yerli ve yabancı kaynak taramasında bulunan çalışmalarda genel olarak varsayımsal depo tasarımları ve

ürün grupları oluşturularak yöntemler uygulanmış ve tavsiyelerde bulunulmuştur. Bu çerçevede yapılan çalışmanın, sahadaki uzman görüşleri ve gerçek verilere dayalı olarak oluşturulmasının literatüre özgün bir katkı sunduğunu ifade etmek mümkündür.

Depolama alanında yapılan ürün atama çalışmasının, ağır olan ürünlerin giriş/çıkış kapısına ve dikey konumda yere yakınlığı ürün taşıma mesafesini ve ürün taşıma süresini azaltarak optimum sürede sevkiyata hazır olmasını sağlayacağı düşünülmektedir. Aynı mantıkla müşteri duyarlılığının yüksek olduğu bir ürünün giriş/çıkış kapısına yakınlığı ürün hazırlama zamanından tasarruf sağlayarak işletmeye katkıda bulunacaktır.

Yapılan çalışmanın işletmeye maliyet açısından ne kadar katkı sağlayacağını öngörebilmek açısından küçük bir operasyon bazında maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz çerçevesinde, giriş/çıkış kapısına en yakın ve dikey boyutta en alt rafta bulunması gereken a_{21} ürününün, bunun tam tersi olarak giriş/çıkış kapısına en uzak ve en üst rafta konumlandırılması sonucu, dikey boyutta ürün taşıma süresinin 0,33 dakika daha fazla sürdüğü, yatay boyutta ise 2 dakika fazla sürdüğü ölçülmüştür. Bu süre farklılıklarını işçilik maliyetleri ve taşıma süresi olarak değerlendirdiğimizde, işçilik maliyetinde yaklaşık % 14, taşıma süresinde ise yaklaşık % 85 oranında bir iyileştirmenin olacağı öngörülmüştür.

TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinin gerçekleştirdiği ürün grubu sıralamalarında C_1 ve C_3 sınıfında bulunan ürünler için herhangi bir fark olmadığı ancak C_2 ve C_4 sınıflarındaki ürün yerleştirmelerinde farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklılıklara bakıldığında VIKOR uygulamasının işletme ürün özelliklerine daha uygun atamalar yaptığı gözlemlenmiştir. Örneğin; C_2 sınıfının ilk rafına VIKOR yönteminde a_{24} ürünü, TOPSIS uygulamasında a_{22} ürünü atanmıştır. a_{24} ürününün talep değeri 34, a_{22} ürününün talep değeri 15'tir. Yatay boyutta talep kriterinin ağırlığı 0,38 olduğu bilinmektedir. Bu verilere göre a_{24} ürününün ilk konumda yer almasının daha uygun olduğu gözlemlenmiştir.

Hali hazırda depolama alanında bulunan ürün konumlandırma işlemleri belirli bir sistem ile gerçekleştirilmemektedir. Üretim alanından depo alanına taşınan ürünler uygun görülen boş alanlara yerleştirilmektedir. Bu yüzden ki, çalışmamız sonucu tavsiye edilen ürün konumlandırma planı fabrika için belirli bir düzen oluşturacak ve ürün gruplarına yer tahsisi sağladığından zaman kayıpları, iş gücü kayıpları azaltılacaktır.

Kaynakça

Acar A. Z., Çakmak E., (2013) "Depolama ve Depo Yönetimi", Nobel Yayınevi, İstanbul

Asgari Siahboomy, M., Sarvari, H., Chan, D. W., Nassereddine, H., & Chen, Z. (2021). A multi-criteria optimization study for locating industrial warehouses with the integration of BIM and GIS data. *Architectural Engineering and Design Management*, 17(5-6), 478-495.

Da Silva, D. D., De Vasconcelos, N. V. C., ve Cavalcante, C. A. V. (2015), "Multicriteria Decision Model To Support The Assignment of Storage Location Of Products in a Warehouse", *Mathematical Problems in Engineering* 10.1155 /2015/481950.

Fontana, M. E., ve Nepomuceno, V. S. (2017), "Multi-Criteria Approach for Products Classification and Their Storage Location Assignment", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(9-12), 3205-3216.

Fontana, M. E., & Cavalcante, C. A. V. (2013), "ELECTRE TRI Method Used to Storage Location Assignment Into Categories", *Pesquisa Operacional* 33(2): 283-303

Fontana, M. E., ve Cavalcante, C. A. V. (2014) "Using The Efficient Frontier to Obtain The Best Solution for The Storage Location Assignment Problem", *Mathematical Problems in Engineering*, <https://doi.org/10.1155/2014/745196>

Fontana, M. E., López, J. C. L., Cavalcante, C. A. V., & Noriega, J. J. S. (2020). Multi-Criteria Assignment Model to Solve The Storage Location Assignment Problem. *Revista Investigación Operacional*, 41(7), 1019-1029.

Frazelle, E. (2002), "Supply Chain Strategy: The Logistics of Supply Chain Management", McGraw-Hill, Usa.

Micale, R., La Fata, C.M. ve La Scalia, G., 2019, " A Combined Interval-Valued Electre Tri and Topsis Approach for Solving The Storage Location Assingment Problem". *Computers & Industrial Engineering*, 135, 199-210

Sarıcan, B., (2019), "Depolama Alanı Ürün Atama Problemi için En İyi Alternatif Konumun Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri İle Belirlenmesi", (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi), Konya Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı/ Endüstri Mühendisliği, Konya (Türkiye)

Sébastien Damart, Vincent Mousseau, Luis Dias (2007), "Supporting Groups in Sorting Decisions: Methodology and Use of a Multi-Criteria Aggregation-Disaggregation Dss. *Decision Support Systems*", Elsevier, 43 (4), 1464-1475. [Hal-00165840](https://doi.org/10.1016/j.dss.2007.05.001)

Tompkins, J. A. *Facilities Planning*,(1996), New York: Wiley, 2. Basım Pp.22- 59

Vassilev, V,Genova, K, M, (2005), “A Brief Survey of Multicriteria Decision Making Methods”, *Bulgarian Academy of Sciences Cybernetics and Information Technologies*, 5(1), 4.

Yang, D., Wu, Y., & Ma, W. (2021). Optimization of storage location assignment in automated warehouse. *Microprocessors and Microsystems*, 80, 103356.

Yerlikaya, M. A. (2020). Storage Location Assignment with Fuzzy PROMETHEE Method in Warehouse Systems with Uncertain Demand. *Journal of the Institute of Electronics and Computer*, 2(1), 142-150.

Yıldırım, F. ve Önder, E. (2018). “Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri”, (3. Baskı), Dora Yayınları, Bursa.



F Sınıfı Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu İkamesinin Çimento Harç Özelliklerine Etkisi

Effect of Substitution of Class F Fly Ash and Blast Furnace Slag on Cement Mortar Properties

İlhami Demir¹

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71451 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 23/12/2021

Kabul / Accepted: 22/02/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Betonun hammaddesi olan çimentonun üretimi, hazır beton teknolojisinin gelişimiyle birlikte son yıllarda oldukça artmıştır. Ancak çimento üretimindeki bu artış beraberinde çevresel sorunları getirmektedir. Türkiye'nin çimento üretiminde, Avrupa'da ilk sıralarda yer aldığı bilinmektedir. Bu sebeple çimento üretiminin oluşturmuş olduğu çevresel sorunlar ülkemiz için büyük bir sorun teşkil etmektedir. Bu sorunların başında ise klinker üretimi sırasında açığa çıkan karbondioksit (CO₂) salınımı gelmektedir. CO₂ salınımını azaltma yöntemlerinden birisi daha az klinker üretmektir. Bu ise çimentoya yakın özelliklere sahip mineral katkıların çimento yerine ikame edilmesiyle mümkün olmaktadır. Mineral katkıları, kendi başlarına bağlayıcılık özelliği çok az olan ancak çimento gibi bir bağlayıcı malzemeyle kullanıldıklarında bağlayıcılık kazanan malzemelerdir. Bu katkıların kullanımıyla hem CO₂ salınımı azaltılmakta hem de çimento kullanımından önemli tasarruflar sağlanmaktadır. Bu çalışmada, Sugözü Termik Santrali'ne ait F sınıfı uçucu kül (UK) ve Bolu Çimento'dan temin edilen yüksek fırın cürufu (YFC); %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çimento yerine ikame edilerek çimento harçları üretilmiştir. Harç numuneleri için yayılma deneyi, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde; %5 ve %10 YFC ikameli harçların 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarının, referans karışımından yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca mikroyapı analizlerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, YFC'nin UK'ya kıyasla hidrasyon gelişiminin daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

"Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, SEM"

Abstract

The production of cement, which is the raw material of concrete, has increased considerably in recent years with the development of ready-mixed concrete technology. However, this increase in cement production brings environmental problems. It is known that Turkey ranks first in cement production in Europe. For this reason, environmental problems caused by cement production constitute a major problem for our country. At the beginning of these problems is the emission of carbon dioxide (CO₂) released during clinker production. One of the ways to reduce CO₂ emissions is to produce less clinker. This is possible by substituting mineral additives with properties close to cement instead of cement. Mineral additives are materials that have little binding property on their own but gain binding when used with a binding material such as cement. With the use of these additives, both CO₂ emissions are reduced and significant savings are achieved in the use of cement. In this study, cement mortars were used by substituting F class fly ash (FA) of Sugözü Thermal Power Plant and blast furnace slag (BFS) from Bolu Cement at 0%, 5%, 10%, 15% and 20% ratios. produced. Flow test, compressive strength, flexural strength and microstructure analyzes were performed for the mortar samples. When the results obtained are examined; It was observed that the 28-day compressive and flexural strength results of 5% and 10% BFS substituted mortars were higher than the reference mixture. In addition, when the results obtained from the microstructure analyzes were examined, it was determined that the hydration development of BFS was better than FA.

Key Words

"Fly ash, blast furnace slag, compressive strength, flexural strength, SEM"

1.Giriş

Dünyada sudan sonra kişi başına en çok tüketilen malzemenin, beton olduğu yapılan istatistiksel analizler sonucunda tespit edilmiştir (Bozkurt & Sayın, 2021). Özellikle teknolojik gelişmelere bağlı olarak hazır betondaki üretim artışı, kişi başına düşen beton tüketimini her yıl daha da artırmaktadır. Avrupa Hazır Beton Birliği 2019 verileri incelendiğinde, Türkiye 67 milyon metreküp beton üretimi ile AB ülkeleri arasında birinci sırada yer almaktadır. Kişi başına düşen hazır beton üretimi ise AB ülkelerinde ortalama 0.6 metreküp iken Türkiye’de kişi başı hazır beton üretimi 0.8 metreküptür (THBB, 2021). Beton genel olarak çimento, agrega, su ve kimyasal katkılardan oluşmaktadır. Bunlar içerisinde betonun maliyetini belirleyen en önemli bileşen ise çimentodur. Çimento endüstrisi, kurulduğu günden bugüne, insanoğlunun birçok ihtiyacına cevap veren en önemli sektör haline gelmiştir. Ancak çimento üretiminin vermiş olduğu bazı çevresel zararlar bulunmaktadır. Bunların başında atmosfere salınan karbondioksit (CO₂) gazı ve yüksek enerji tüketimi gelmektedir (Bozkurt & Sayın, 2021). Klinker üretimi esnasında ortaya çıkan CO₂ miktarı, insan tarafından atmosfere salınan CO₂ miktarının %5-%8’ini oluşturmaktadır (Damtoft vd., 2008; Schneider vd., 2011; Schöler vd., 2015; Ustabaş & Kaya, 2018). Ayrıca üretilen her ton portland çimentosunun atmosfere neredeyse bir ton CO₂ saldıdığı yapılan incelemeler sonucunda tespit edilmiştir (Uzal vd., 2007; Sevim & Şengül, 2021). CO₂ emisyonunu azaltmanın en önemli yöntemlerinden birisi, çimento üretiminde endüstriyel yan ürünlerin çimentoya ikame edilmesidir. Bu sayede CO₂ emisyonu önemli ölçüde azaltılabilmektedir (Schöler vd., 2015; Ustabaş & Kaya, 2018).

Puzolan adı verilen bu endüstriyel yan ürünler, bağlayıcılık özelliği hiç olmayan veya çok az olan silisli ve alüminli malzemelerdir. Puzolanlar, daha iyi bağlayıcılık özelliği kazanabilmesi için çimento esaslı malzemelerle birlikte kullanılırlar (ASTM C618, 2017; Bumanis vd., 2020; Sevim vd., 2021). Puzolanik malzemelerin çimentoya ikame edilmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre puzolanların, betonun bazı mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını artırdığı görülmüştür (Binici, 2013; Demir vd., 2018; Sevim & Demir, 2019; Kou vd., 2021; Yun vd., 2020). Çimentoya ikame edilen en yaygın puzolanlar ise uçucu kül ve yüksek fırın cürufudur. Uçucu kül (UK), kömürle çalışan elektrik santrallerinin bacalarındaki filtreler tarafından tutulan, atık kül parçalarından oluşan bir yan üründür. Yapılan çalışmalarda UK, çimentolu kompozitlerde genel olarak çimento ikame malzemesi şeklinde kullanılmış ve bu kompozitlerin mekanik ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir (Demir vd., 2020; Kim vd., 2018; Delikkurt & Sevim, 2015) Yüksek fırın cürufu (YFC) ise pik demir üretimi sırasında açığa çıkan atık malzemedir. YFC’ nin de birçok kullanım alanı mevcuttur. Yapılan çalışmalarda YFC’nin, betonun bazı mekanik ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür (Bilim & Atiş, 2011; Yazıcı vd., 2008; Özbay vd., 2016; Binici vd., 2010). Burada bahsedilen puzolanlar, çimentonun hidrasyonundan kaynaklanan kalsiyum hidroksit jellerini azaltarak bağlayıcı özellikler sağlayan kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jelleri üretmektedir (Sevim vd., 2021). UK ve YFC’nin betonda katkı malzemesi olarak kullanılması ile ilgili literatürde birçok araştırma yapılmıştır. Beton ve çimentoda kullanılan hem ekonomik yönden hem de ekolojik yönden katkı sağlayan bu malzemenin ileride birçok araştırmaya katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Bilim & Atiş (2011) yapmış oldukları çalışmada, farklı oranlarda YFC içeren harçların aşınma ve mukavemet özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak Portland çimentosu yerine kısmen YFC kullanılmasının, kür koşullarının uygun ve yeterli olması halinde dayanım ve aşınma direncinde avantajlar sağladığı görülmüştür. Delikkurt & Sevim (2015) Sugözü termik santraline ait UK’nın betonda mineral katkı olarak kullanımını araştırmıştır. Binici vd. (2013) UK, YFC ve silis dumanı (SD) içeren betonların durabilite özelliklerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, YFC katkısının dayanıklılığa ve dayanıma olumlu katkı sağladığı tespit edilmiştir. Sevim & Demir (2019), UK’nın parçacık boyut dağılımını optimize etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, UK’nın optimize edilmesiyle dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin geliştirilebileceği ve daha yüksek ikame oranlarında kullanılabilmesi görülmüştür. Hashmi vd. (2021) düşük kalsiyumlu UK içeren betonların basınç dayanımı, elastisite modülü vs. gibi mekanik özelliklerini incelemişlerdir. UK’nın mekanik özellikleri geliştirebileceği tespit edilmiştir. Sevim vd. (2021) partikül boyut dağılımı ile belirlemiş oldukları UK ve YFC inceliğinin harçlar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak inceliğin artmasıyla fiziksel ve mekanik özelliklerin geliştirilebileceği görülmüştür.

Yapılan literatür taraması sonucunda, Bolu Çimento’ya ait YFC ile Sugözü Termik Santrali’ne ait F sınıfı UK ikameli çimento harçlarının taze ve sertleşmiş durum özelliklerine etkisinin kıyaslanması ile ilgili bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışmada, Bolu Çimento’ya ait YFC ve Sugözü Termik Santrali’ne ait UK; çimentoya ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ikame edilmiştir. UK ve YFC içeren çimento esaslı kompozitlerin yayılma özellikleri ile basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve SEM analizleri 3, 7 ve 28 günlük su kürleri için elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

2. Deneysel Program

2.1. Materyal

Çalışma kapsamında üretilen harç numunelerinde çimento olarak CEM I 42.5 R Portland çimentosu (PÇ), UK, YFC, standart kum ve içilebilir su kullanılmıştır. Kullanılan PÇ, UK ve YFC’nin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. PÇ, UK ve YFC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim (%)	PÇ	UK	YFC
SiO ₂	20.85	58.21	35.73
Al ₂ O ₃	5.08	21.17	18.31
Fe ₂ O ₃	3.65	5.13	0.68
CaO	63.16	3.34	37.12
MgO	1.85	1.92	5.16
Na ₂ O	0.33	2.05	0.44
K ₂ O	0.42	1.83	1.47
SO ₃	2.89	0.44	0.51
Fiziksel Özellikler			
Özgül Ağırlık	3.13	2.27	2.91
Blaine inceliği (cm ² /g)	3350	2900	3900
Kızdırma Kaybı (%)	1.78	2.45	1.52

Çimento harcı karışımlarında kullanılması planlanan UK, Sugözü Termik Santrali'nden; YFC ise Bolu Çimento'dan temin edilmiştir. ASTM C618 (2017) standardına göre SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ değerinin %70'in üzerinde ve CaO miktarının %10'dan az olması durumunda, UK'nın sınıfı "F (düşük kireçli)" olarak belirtilmiştir. Tablo 1' de verilen kimyasal analiz verileri incelendiğinde Sugözü Termik Santrali'ne ait UK'nın F sınıfı olduğu görülmektedir.

2.2. Metot

2.2.1. Karışım içeriği

Çalışma sırasında çimento harçları TS EN 196-1'e uygun olarak hazırlanmıştır. Çimento harçları, çimento ağırlığına %0 (Referans), %5, %10, %15 ve %20 oranında UK ve YFC harçlara ayrı ayrı ikame edilerek üretilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen harçların su/bağlayıcı oranı (S/B) 0.50'dir. Tablo 2'de karışımların malzeme miktarları gösterilmiştir.

Tablo 2. Çimento harcı malzeme miktarları

Karışım Kodu	Su (g)	UK(%)	YFC (%)	UK (g)	YFC (g)	Çimento (g)	Kum(g)
Ref	225	0	-	0.0	-	450.0	1350
UK5	225	5	-	22.5	-	427.5	1350
UK10	225	10	-	45.0	-	405.0	1350
UK15	225	15	-	67.5	-	382.5	1350
UK20	225	20	-	90.0	-	360.0	1350
YFC5	225	-	5	-	22.5	427.5	1350
YFC10	225	-	10	-	45.0	405.0	1350
YFC15	225	-	15	-	67.5	382.5	1350
YFC20	225	-	20	-	90.0	360.0	1350

2.2.2. Yayılma deneyi

Bu kısımda mini çökme testi ile harç karışımlarının işlenebilirlik ölçümleri yapılmıştır. Deney yapılırken TS EN 196-1'e uygun şekilde hazırlanan harç karışımları, akış tablası üzerindeki kesik koniye doldurulmuştur. Doldurma işlemi 2 kat halinde ve her katta 25 sıkıştırma işlemi uygulanarak yapılmıştır. Kesik konik kalıp yavaşça yukarı kaldırıldıktan sonra sarsma cihazı döndürmek suretiyle TS EN 1015-3'e uygun şekilde 15 saniyede 25 kez vuruş yapılmıştır. Son olarak tabla üzerindeki yayılmış harcın her iki doğrultusundaki yayılma çapı ölçülerek bu değerlerin ortalaması alınmıştır.

2.2.3. Harç numunelerinin eğilme ve basınç dayanımının belirlenmesi

Çimento harçlarının eğilme ve basınç dayanımları TS EN 196-1'e uygun olarak belirlenmiştir. Eğilme dayanımı için 3, 7 ve 28 gün normal su kürüne tabi tutulan 40×40×160 mm ölçülerindeki prizmatik çimento harçları kullanılmıştır. Basınç dayanımları ise eğilme dayanımı deneyi sonucunda oluşan altı adet 40×40 mm ölçülerindeki numuneler kullanılarak tespit edilmiştir. Eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygun kapasitede ve TS EN 196-1'e uygun sırasıyla eğilme için 50 N/s ve basınç için 2400 N/s yükleme hızlarında ayarlanarak gerçekleştirilmiştir.

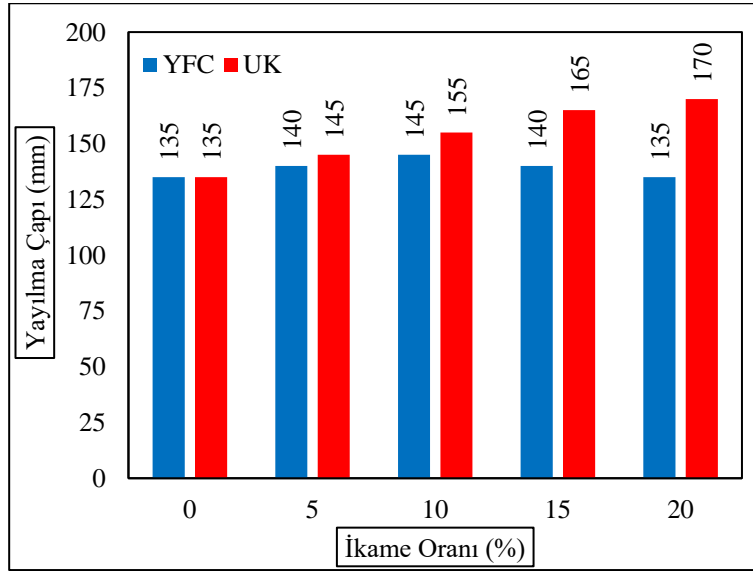
2.2.4. Mikroyapı analizi

Bu kısımda, 7 ve 28 günlük su kürüne tabi olan Ref, UK10, UK20, YFC10 ve YFC20 kodlu harçların mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Mikroyapı analizleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir.

3. Deneysel Bulgular ve Tartışma

3.1. Yayılma deneyi bulguları

Şekil 1’de UK ve YFC ikameli harçların yayılma çapları gösterilmiştir.

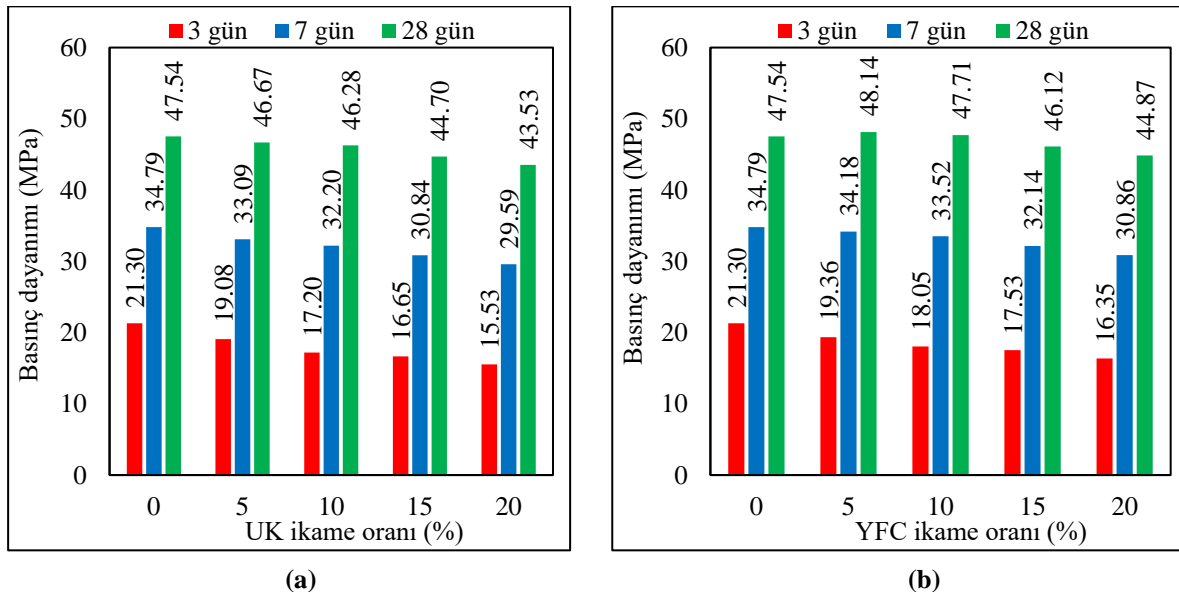


Şekil 1. Harçların yayılma çapları

UK ikameli harçlara ait sonuçlar incelendiğinde, ikame oranı arttıkça yayılma çaplarının arttığı görülmektedir. Bu durumun nedeni olarak UK’nın sahip olduğu küresel morfolojik özellik gösterilebilir. Literatürde UK ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, ikame oranı arttıkça harçların yayılma çapının arttığı, dolayısıyla elde edilen sonuçların literatürdeki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür (Sevim vd., 2021; Sevim ve Demir, 2019). UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların yayılma çapları, “Ref” kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %7.41, %14.81, %22.2 ve %25.93 oranlarında artış göstermiştir. YFC ikameli harçların yayılma çapları incelendiğinde; YFC5, YFC10 ve YFC15 kodlu harçların yayılma çapları artarken YFC20 kodlu harçların yayılma çapı “Ref” kodlu harçlarla aynı çıkmıştır. Bunun nedeni olarak YFC’nin blaine inceliğinin, çimentonun ve UK’nın blaine inceliğinden daha yüksek olması ve belirli bir oranı aştıktan sonra YFC ikameli harçların akıcılığının azalması ve dolayısıyla yayılma çapının düşmesi gösterilebilir. YFC5, YFC10 ve YFC15 kodlu harçların yayılma çapları “Ref” kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %3.7, %7.41 ve %3.7 oranlarında artış göstermiştir.

3.2. Basınç dayanımı bulguları

Şekil 2’de UK ve YFC ikameli harçların 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları gösterilmiştir.



(a)

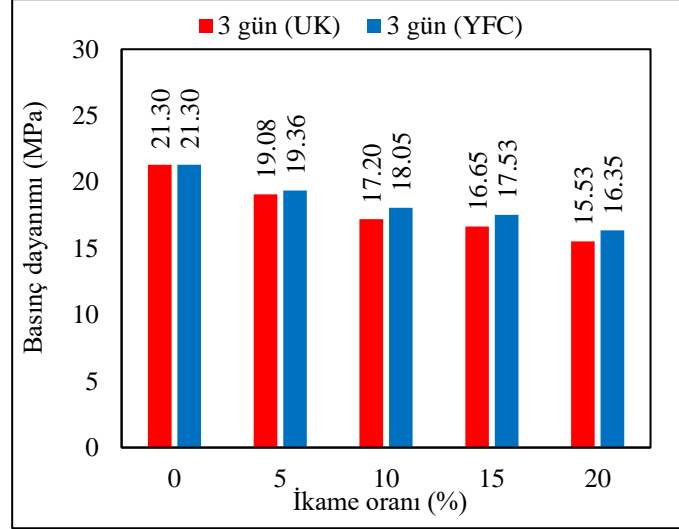
(b)

Şekil 2. (a) UK ve (b) YFC ikameli harçların basınç dayanımları

Basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, UK ikame oranının artmasıyla basınç dayanımlarının 3, 7 ve 28 günlük su kürleri için sürekli olarak azaldığı görülmüştür. YFC ikameli harçlarda ise 3 ve 7 günlük su kürlere basınç dayanımları referans harçlara göre azalmıştır. Ancak 28 günlük su kürlünde ise YFC5 ve YFC10 kodlu harçlar, “Ref” kodlu harçların basınç dayanımını geçmiştir. Bu durum puzolanların hidrasyon reaksiyonunun geç olduğunu, özellikle 28 gün ve sonrasındaki kür yaşı için basınç dayanımlarında artış sağlayabileceğini bir kez daha ispatlar niteliktedir.

3.2.1. 3 günlük basınç dayanımı verileri

Şekil 3’te UK ve YFC ikameli harçların 3 günlük basınç dayanımı sonuçları kıyaslanmıştır.

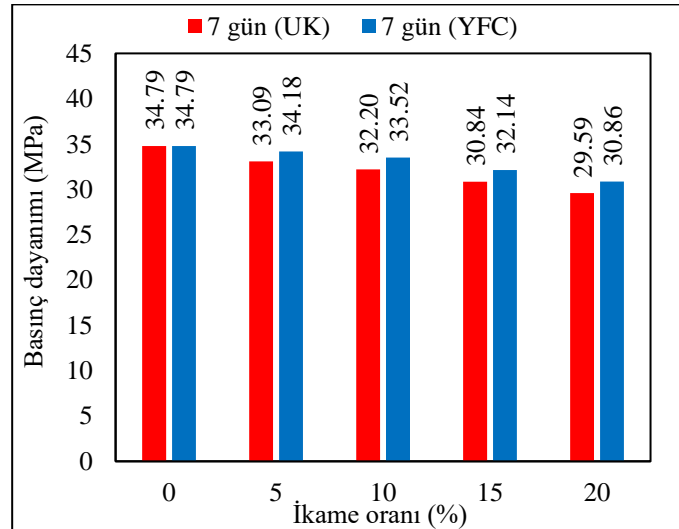


Şekil 3. UK ve YFC ikameli harçların 3 günlük basınç dayanımı sonuçları

Şekil 3 incelendiğinde hem UK hem de YFC ikame oranının artmasıyla basınç dayanımının azaldığı görülmektedir. Bu durumun ana nedeni olarak UK ve YFC gibi puzolanların hidrasyonunu geç tamamlaması, bu nedenle de erken yaşlardaki dayanımları düşürmesi söylenebilir. Fakat YFC kullanılması durumunda basınç dayanımındaki bu azalışların, UK’ya kıyasla daha düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni ise YFC’nin blaine inceliğinin UK’dan daha yüksek yani daha ince olması ve hidrasyon gelişiminin UK’dan daha yüksek olmasıdır. Şekil 3 incelendiğinde UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların basınç dayanımlarının, “Ref” kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %10.42, %19.25, %21.83 ve %27.09 oranlarında daha düşük olduğu görülmektedir. YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların basınç dayanımlarının ise “Ref” kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %9.11, %15.26, %17.7 ve %23.24 oranlarında daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca aynı ikame oranlarına sahip UK ve YFC’li harçların dayanım değerleri kendi içerisinde kıyaslandığında ise UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların dayanımları; YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların dayanımlarından sırasıyla %1.45, %4.71, %5.02 ve %5.02 oranlarında daha düşük çıkmıştır.

3.2.2. 7 günlük basınç dayanımı verileri

Şekil 4’te UK ve YFC ikameli harçların 7 günlük basınç dayanımı sonuçları kıyaslanmıştır.

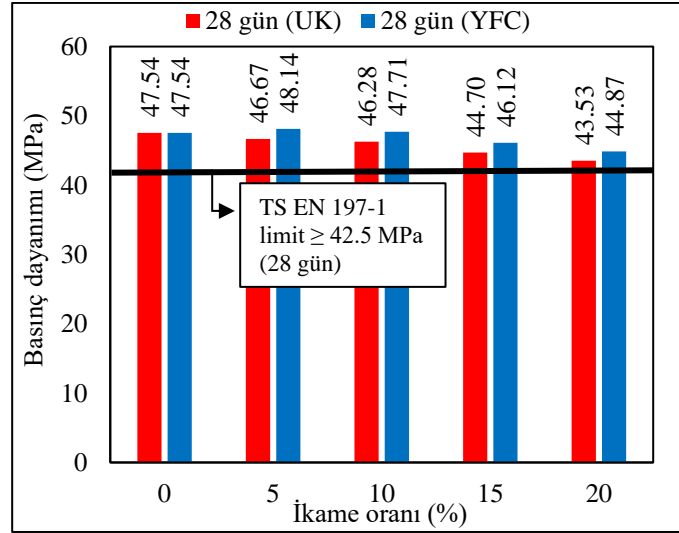


Şekil 4. UK ve YFC ikameli harçların 7 günlük basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4 incelendiğinde hem UK hem de YFC ikame oranının artmasıyla basınç dayanımının azaldığı görülmektedir. Bu durumun ana nedeni olarak 3 günlük dayanımlarda olduğu gibi puzolanların hidrasyonunu geç tamamlaması, bu nedenle de erken yaşlardaki dayanımları düşürmesi gösterilebilir. Yine 3 günlük dayanım gelişiminde olduğu gibi YFC kullanılması durumunda basınç dayanımındaki azalışların, UK'ya kıyasla daha düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Şekil 4 incelendiğinde; UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların basınç dayanımlarının, "Ref" kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %4.89, %7.44, %11.35 ve %14.95 oranlarında daha düşük olduğu görülmektedir. YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların basınç dayanımlarının ise "Ref" kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %1.75, %3.65, %7.62 ve %11.30 oranlarında daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca aynı ikame oranlarına sahip UK ve YFC'li harçların dayanım değerleri kendi içerisinde kıyaslandığında ise UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların dayanımları; YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların dayanımlarından sırasıyla %3.19, %3.94, %4.04 ve %4.12 oranlarında daha düşük çıkmıştır.

3.2.3. 28 günlük basınç dayanımı verileri

Şekil 5'te UK ve YFC ikameli harçların 28 günlük basınç dayanımı sonuçları kıyaslanmıştır.



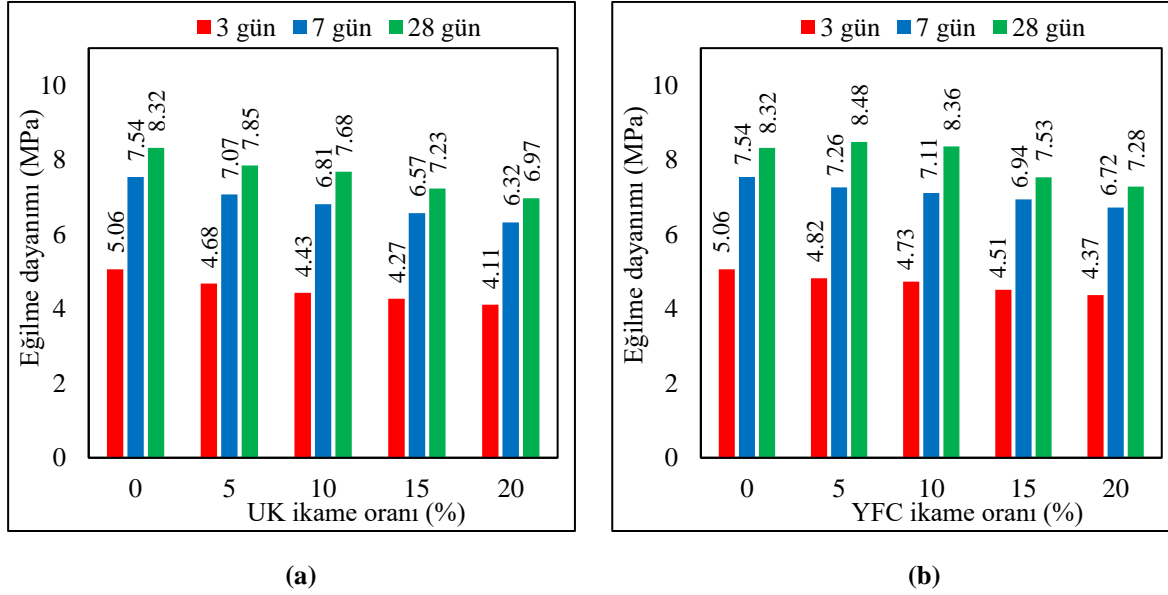
Şekil 5. UK ve YFC ikameli harçların 28 günlük basınç dayanımı sonuçları

3 ve 7 günlük su kürüne tabi tutulan harçlarda olduğu gibi UK ikame oranı arttıkça basınç dayanımları düşmüştür. YFC ikameli harçların 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, YFC5 kodlu harçların en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu, YFC10 kodlu harçların basınç dayanımının ise "Ref" kodlu harçların basınç dayanımından daha yüksek olduğu görülmektedir. Yine 3 ve 7 günlük numunelerde olduğu gibi YFC ikameli harçların basınç dayanımı değerleri UK ikameli harçlara kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Şekil 5 incelendiğinde; UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların basınç dayanımlarının, "Ref" kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %1.83, %2.65, %5.97 ve %8.44 oranlarında daha düşük olduğu görülmektedir. YFC5 ve YFC10 kodlu harçların basınç dayanımlarının, "Ref" kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %1.26 ve %0.36 oranlarında daha yüksek olduğu görülmüştür. YFC15 ve YFC20 kodlu harçların basınç dayanımlarının ise "Ref" kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %2.99 ve %5.62 oranlarında daha düşük olduğu görülmüştür. Aynı ikame oranlarına sahip UK ve YFC'li harçların dayanım değerleri kendi içerisinde kıyaslandığında ise UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların dayanımları, YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların dayanımlarından sırasıyla %3.05, %3.0, %3.08 ve %2.99 oranlarında daha düşük çıkmıştır. Ayrıca tüm harç gruplarının basınç dayanımları, TS EN 197-1'de verilen minimum basınç dayanımı (42.5 MPa) değerinin üzerinde kalmıştır.

Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te verilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, UK ve YFC gibi yüksek miktarlardaki atık haldeki puzolanların değerlendirilmesi ile çimento kullanımından önemli tasarruflar sağlanabileceği görülmüştür. Çimento üretiminin dünyada yaklaşık %7 oranında sera gazı emisyonundan sorumlu olduğu göz önüne alınırsa, atık haldeki puzolanların kullanılmasıyla bu oranın önemli ölçüde azaltılabileceği düşünülmektedir. Bu durum sürdürülebilir bir çevre açısından büyük önem arz etmektedir.

3.3. Eğilme dayanımı bulguları

Şekil 6'da UK ve YFC ikameli harçların 3, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları gösterilmiştir.

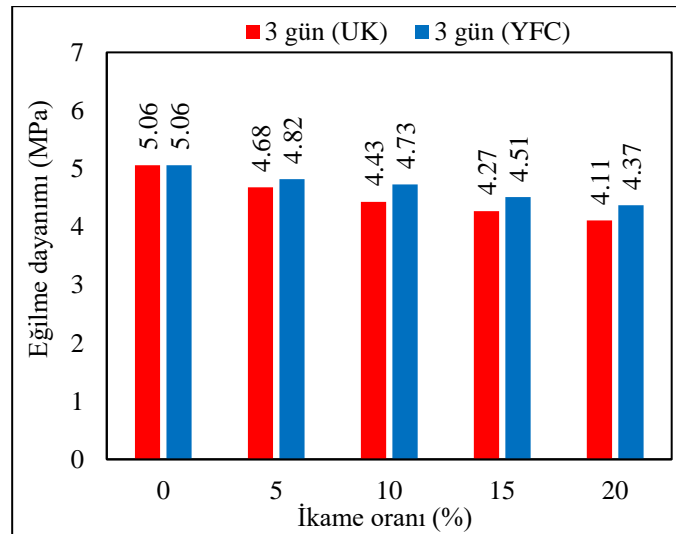


Şekil 6. (a) UK ve (b) YFC ikameli harçların eğilme dayanımları

Eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde, UK ikame oranının artmasıyla eğilme dayanımlarının 3, 7 ve 28 günlük su küreleri için sürekli olarak azaldığı görülmüştür. YFC ikameli harçlarda ise 3 ve 7 günlük su kürelerinde eğilme dayanımları “Ref” harçlarına göre azalmıştır. Ancak 28 günlük su kürelerinde YFC5 ve YFC10 kodlu harçlar “Ref” harçlarının eğilme dayanımını geçmiştir. Elde edilen sonuçlar basınç dayanımlarının sonucuna benzer çıkmıştır.

3.3.1. 3 günlük eğilme dayanımı verileri

Şekil 7’de UK ve YFC ikameli harçların 3 günlük eğilme dayanımı sonuçları kıyaslanmıştır.

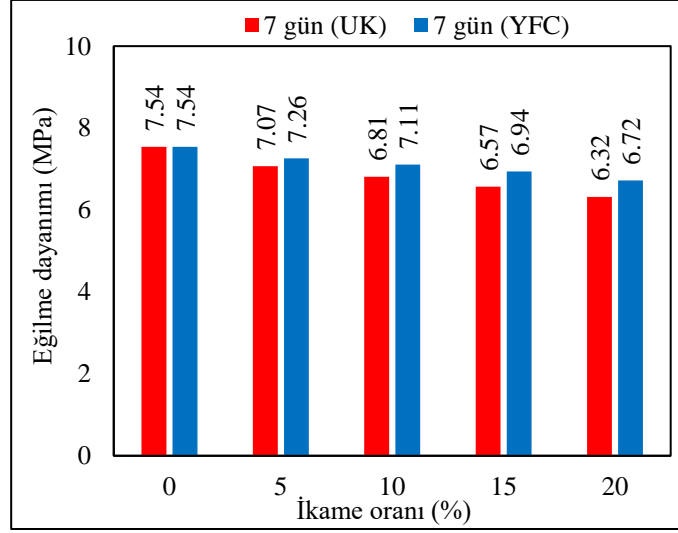


Şekil 7. UK ve YFC ikameli harçların 3 günlük eğilme dayanımı sonuçları

Şekil 7 incelendiğinde hem UK hem de YFC ikame oranının artmasıyla eğilme dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Bu durumun ana nedeni olarak UK ve YFC gibi puzolanların hidratasyonunu geç tamamlaması, bu nedenle de erken yaşlardaki dayanımları düşürmesi söylenebilir. Fakat YFC kullanılması durumunda eğilme dayanımındaki bu azalışların, UK’ya kıyasla daha düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni, basınç dayanımında olduğu gibi YFC’nin UK’dan daha ince olması ve hidratasyon gelişiminin UK’dan daha yüksek olması şeklinde yorumlanabilir. Şekil 7 incelendiğinde; UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların eğilme dayanımlarının, “Ref” kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %7.51, %12.45, %15.61 ve %18.77 oranlarında daha düşük olduğu görülmektedir. YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların eğilme dayanımlarının ise “Ref” kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %4.74, %6.52, %10.87 ve %13.64 oranlarında daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca aynı ikame oranlarına sahip UK ve YFC’li harçların dayanım değerleri kendi içerisinde kıyaslandığında ise UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların dayanımları; YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların eğilme dayanımlarından sırasıyla %2.90, %6.34, %5.32 ve %5.95 oranlarında daha düşük çıkmıştır.

3.3.2. 7 günlük eğilme dayanımı verileri

Şekil 8’de UK ve YFC ikameli harçların 7 günlük eğilme dayanımı sonuçları kıyaslanmıştır.

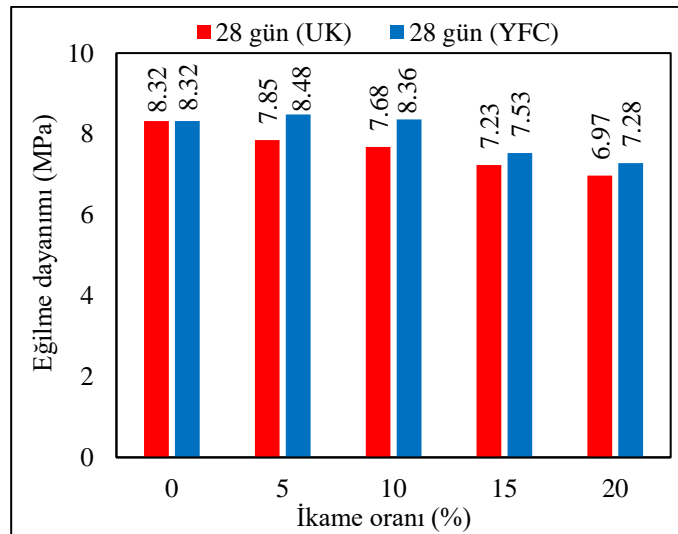


Şekil 8. UK ve YFC ikameli harçların 7 günlük eğilme dayanımı sonuçları

Şekil 8 incelendiğinde hem UK hem de YFC ikame oranının artmasıyla eğilme dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Bu durumun ana nedeni olarak 3 günlük dayanımlarda olduğu gibi puzolanların hidratasyonunu geç tamamlaması gösterilebilir. Yine 3 günlük dayanım gelişiminde olduğu gibi YFC kullanılması durumunda eğilme dayanımındaki azalışların, UK’ya kıyasla daha düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Şekil 8 incelendiğinde; UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların eğilme dayanımlarının, “Ref” kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %6.23, %9.68, %12.86 ve %16.18 oranlarında daha düşük olduğu görülmektedir. YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların eğilme dayanımlarının ise “Ref” kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %3.71, %5.70, %7.96 ve %10.88 oranlarında daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca aynı ikame oranlarına sahip UK ve YFC’li harçların dayanım değerleri kendi içerisinde kıyaslandığında UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların dayanımları; YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların eğilme dayanımlarından sırasıyla %2.62, %4.22, %5.33 ve %5.95 oranlarında daha düşük çıkmıştır.

3.3.3. 28 günlük eğilme dayanımı verileri

Şekil 9’da UK ve YFC ikameli harçların 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları kıyaslanmıştır.



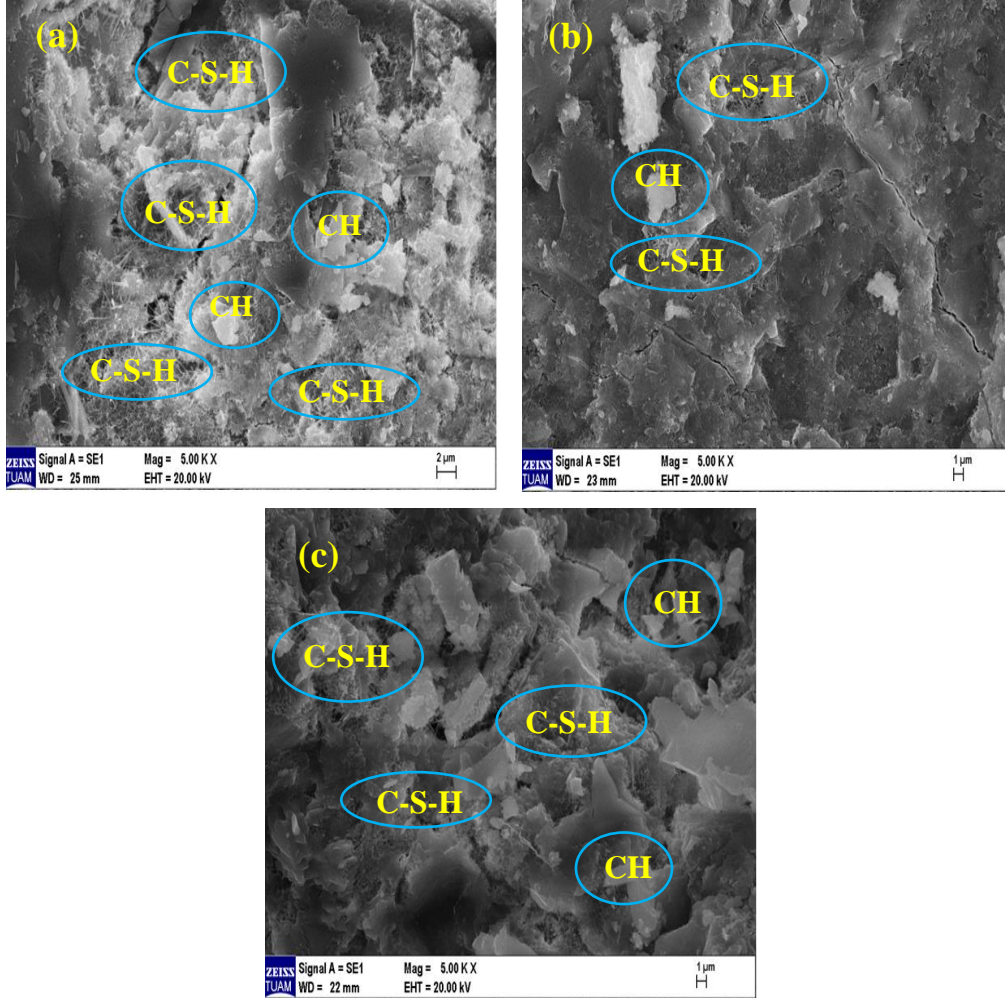
Şekil 9. UK ve YFC ikameli harçların 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları

3 ve 7 günlük su kürüne tabi tutulan harçlarda olduğu gibi UK ikame oranı arttıkça eğilme dayanımları düşmüştür. YFC ikameli harçların 28 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde ise basınç dayanımında olduğu gibi YFC5 kodlu harçların en yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu, YFC10 kodlu harçların eğilme dayanımının ise “Ref” kodlu harçlarınkinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Yine 3 ve 7 günlük numunelerde olduğu gibi YFC ikameli harçların eğilme dayanımı değerleri UK ikameli harçlara kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Şekil 9 incelendiğinde; UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların eğilme dayanımlarının, “Ref” kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %5.65, %7.69, %13.10 ve %16.23 oranlarında daha düşük olduğu görülmektedir. YFC5 ve YFC10

kodlu harçların eğilme dayanımlarının, "Ref" kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %1.92 ve %0.48 oranlarında daha yüksek olduğu görülmüştür. YFC15 ve YFC20 kodlu harçların eğilme dayanımlarının ise "Ref" kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %9.50 ve %12.5 oranlarında daha düşük olduğu görülmüştür. Aynı ikame oranlarına sahip UK ve YFC'li harçların dayanım değerleri kendi içerisinde kıyaslandığında ise UK5, UK10, UK15 ve UK20 kodlu harçların eğilme dayanımları; YFC5, YFC10, YFC15 ve YFC20 kodlu harçların dayanımlarından sırasıyla %7.43, %8.13, %3.98 ve %4.26 oranlarında daha düşük çıkmıştır.

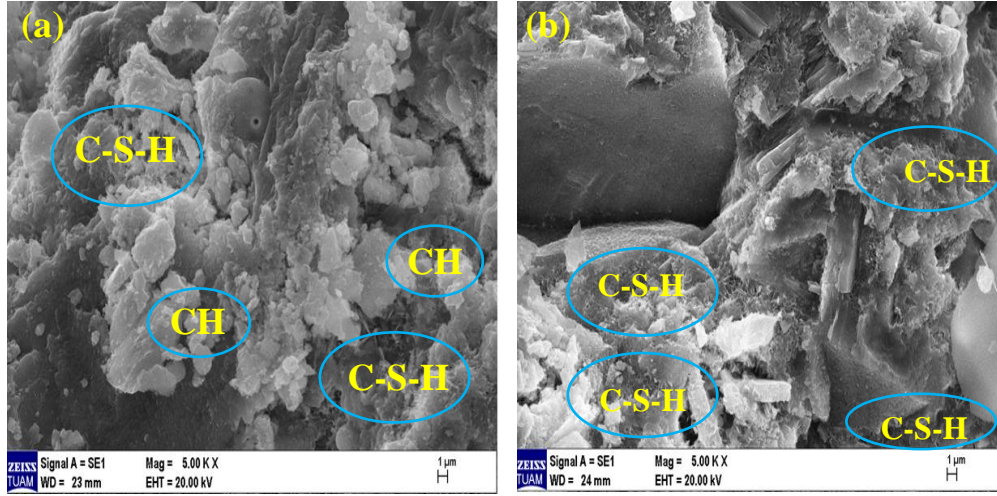
3.4. Mikroyapı analizi

3.4.1. 7 günlük SEM görüntüleri



Şekil 10. (a) Ref, (b) UK10 ve (c) YFC10 kodlu harçlara ait 7 günlük SEM görüntüleri

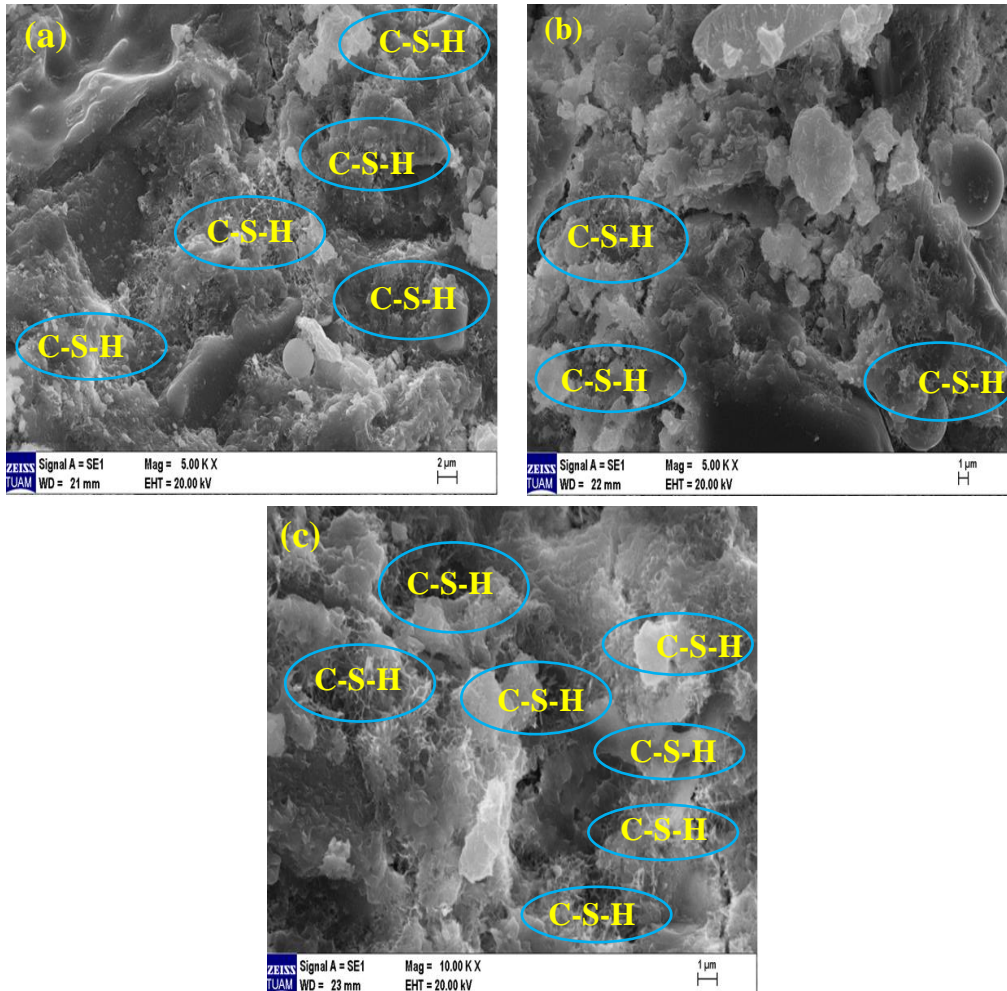
Şekil 10'da Ref, UK10 ve YFC10 kodlu harçların 7 günlük su kürü sonucundaki SEM analizlerine ait görüntüler verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde; referans karışımlarda, ikameli karışımlara kıyasla daha yoğun CSH görülmektedir. İkameli karışımlarda CSH yoğunluğunun az olması, puzolanların hidrasyon gelişiminin ilk günlerde yavaş olmasına bağlanabilir. Ayrıca YFC10 kodlu harçlardaki CSH yoğunluğunun, UK10 kodlu harçlardan daha yoğun olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni olarak YFC'nin blaine inceliğinin, UK'dan daha yüksek olmasına ve bu nedenle de hidrasyon gelişiminin yüksek olmasına bağlanabilir.



Şekil 11. (a) UK20 ve (b) YFC20 kodlu harçlara ait 7 günlük SEM görüntüleri

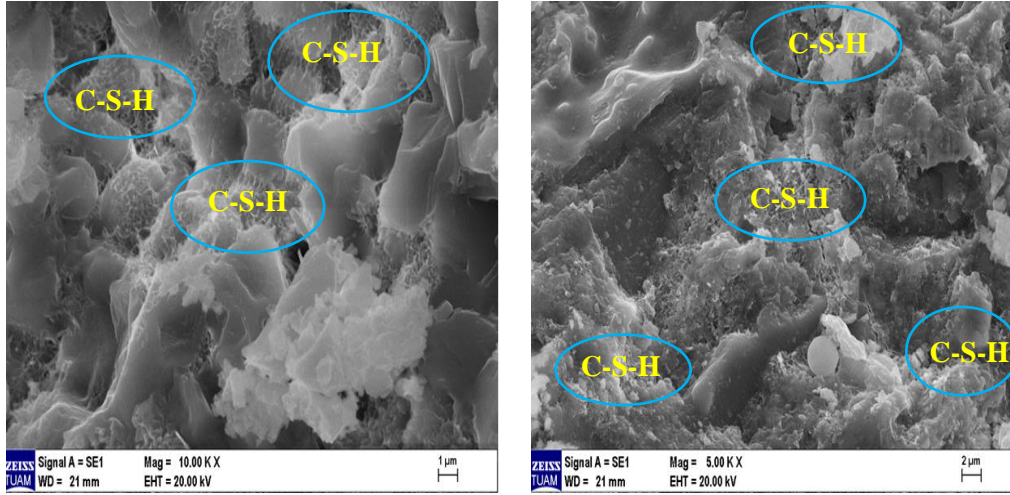
Şekil 11’de UK20 ve YFC20 kodlu harçların 7 günlük su kürü sonucundaki SEM analizlerine ait görüntüler verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde; Şekil 10 (a)’ da verilen referans karışımının CSH yoğunluğunun, UK20 ve YFC20 kodlu harçlara kıyasla daha yoğun olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 10’da verilen UK10 ve YFC10 kodlu harçlardaki CSH yoğunluğunun, Şekil 11’de verilen UK20 ve YFC20 kodlu harçlardan daha yoğun olduğu görülmektedir. Bunun nedeni şudur: puzolanların erken yaşlardaki hidrasyon gelişimi yavaş olduğu için ikame oranı arttıkça hidrate eleman miktarı azalmaktadır. Son olarak YFC20 kodlu harçlarda, UK20 kodlu harçlara göre CSH yoğunluğunun daha fazla olduğu görülmüştür.

3.4.2. 28 günlük SEM görüntüleri



Şekil 12. (a) Ref, (b) UK10 ve (c) YFC10 kodlu harçlara ait 28 günlük SEM görüntüleri

Şekil 12’de Ref, UK10 ve YFC10 kodlu harçların 28 günlük su kürü sonucundaki SEM analizlerine ait görüntüler verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde; YFC10 kodlu harçlarda, Ref ve UK10 kodlu harçlara kıyasla daha yoğun CSH görülmektedir. 7 günlük SEM görüntüleriyle kıyaslandığında daha yoğun bir CSH oluştuğu, puzolanların hidrasyon gelişimlerinin sonraki günlerde daha iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca Ref kodlu harçlara ait CSH yoğunluğunun, UK10 kodlu harçlardan daha yoğun olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar, basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarını da destekler niteliktedir.



Şekil 13. (a) UK20 ve (b) YFC20 kodlu harçlara ait 28 günlük SEM görüntüleri

Şekil 13’te UK20 ve YFC20 kodlu harçların 28 günlük su kürü sonucundaki SEM analizlerine ait görüntüler verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde; Şekil 12 (a)’ da verilen referans karışımının CSH yoğunluğunun, UK20 ve YFC20 kodlu harçlara kıyasla daha yoğun olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 12’de verilen UK10 ve YFC10 kodlu harçlardaki CSH yoğunluğunun, Şekil 13’te verilen UK20 ve YFC20 kodlu harçlardan daha yoğun olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak ikame oranı arttıkça hidrate eleman miktarının azaldığı gösterilebilir. Son olarak YFC20 kodlu harçlarda, UK20 kodlu harçlara göre CSH yoğunluğunun daha fazla olduğu görülmüştür.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, UK ve YFC ikameli harçların taze ve sertleşmiş özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla yayılma deneyi, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- UK ikame oranı arttıkça yayılma çapları artmıştır. UK’nın küresel morfolojik yapısından dolayı işlenebilirliği önemli ölçüde artırabileceği tespit edilmiştir.
- YFC ikame oranı arttıkça belirli bir orana kadar yayılma çapı artarken sonrasında düşüşe geçmiştir. Bu durumun nedeni YFC’nin inceliğinin yüksek olması ve dolayısıyla yüksek oranda kullanılmasında su ihtiyacını artırarak işlenebilirliği düşürmesine bağlanmıştır.
- 3 ve 7 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, ikame oranı arttıkça basınç dayanımlarının düştüğü tespit edilmiştir. Puzolanların ilk günlerdeki hidrasyon gelişimlerinin düşük olması bu durumun nedeni olarak gösterilebilir.
- 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, UK ikame oranının artmasıyla basınç dayanımlarının düştüğü görülmüştür. YFC5 ve YFC10 kodlu harçların basınç dayanımları ise referans numunelerin basınç dayanımından daha yüksek çıkmıştır. Elde edilen bu sonuçlar puzolanların hidrasyon gelişimlerinin ileriki yaşlarda daha iyi olduğunu destekler niteliktedir. Ayrıca tüm karışımların TS EN 197-1’de verilen 28 günlük minimum basınç dayanımı (42.5 MPa) değerini geçtiği tespit edilmiştir.
- Genel olarak YFC ikameli karışımların basınç dayanımı değerlerinin UK ikameli karışımlardan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak YFC’nin inceliğinin yüksek olması ve hidrasyon gelişiminin UK’ya kıyasla daha iyi olduğu gösterilebilir.
- 3 ve 7 günlük eğilme dayanımlarına bakıldığında, basınç dayanımı ile paralellik göstermiştir. UK ve YFC ikame oranı arttıkça eğilme dayanımları düşmüştür.
- 28 günlük eğilme dayanımlarında ise en yüksek değer YFC5 kodlu harçlarda görülmüştür.
- 7 günlük SEM görüntüleri incelendiğinde; UK10, UK20, YFC10 ve YFC20 kodlu harçların CSH yoğunluğunun, referans karışımlarına göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum puzolanların erken yaşlarda hidrasyon gelişimlerinin düşük olmasına bağlanmıştır.
- 28 günlük SEM görüntüleri incelendiğinde YFC10 kodlu harçların, referans karışımlarına kıyasla CSH yoğunluğunun daha fazla olduğu; referans karışımların CSH yoğunluğunun ise UK10 kodlu harçlardan daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

- Genel olarak elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, puzolanların hidratasyon gelişimlerinin ilk günlerde yavaş sonraki günlerde ise daha hızlı olduğu görülmüştür. Ayrıca YFC ikameli karışımların hidratasyon gelişiminin UK ikameli karışımlardan daha iyi olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak; Sugözü Termik Santrali'ne ait UK ile Bolu Çimento'dan temin edilen YFC'nin çimentoya %20 oranına kadar ikame edilerek kullanılabilmesi görülmüştür. Bu puzolanlar basınç dayanımında düşümlere neden olsa da 28 günlük değerler kontrol edildiğinde tüm karışımların minimum değer (42.5 MPa) üzerinde kaldığı görülmüştür. Ayrıca, çimento üretiminin dünyadaki CO₂ salınımının %7'sine sebep olduğu düşünüldüğünde, bu puzolanların değerlendirilmesiyle hem çevre kirliliği büyük ölçüde azaltılacak hem de çimento üretim maliyetleri önemli ölçüde düşürülecektir.

Referanslar

ASTM C618-17a, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

Bilim C. & Atış C. D. (2011). "Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren harçların aşınma ve mukavemet özellikleri" Politeknik Dergisi, 14(2), 101-107.

Binici H., Eken M. & Dinçer A. (2013). "Silis Dumanı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonların Bazı Durabilite Özellikleri" Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28 (1), 11-20.

Binici H., Sevinç A. H. & Durgun, M. Y. (2010). "Barit, bazaltik pomza, kolemanit ve yüksek fırın cürufu katkılı betonların özellikleri" KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(1), 2010.

Bozkurt N. & Sayın N. (2021). "Günümüz Teknolojileri Çerçevesinde Çimento Dünyasındaki Gelişmelerin Araştırılması" Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9 (2021), 1159-1173.

Bumanis G., Vitola L., Stipniece L., Locs J., Korjakins A. & Bajare D. (2020) "Evaluation of Industrial by-products as pozzolans: A road map for use in concrete production" Case Studies in Construction Materials, 2020, 13, e00424

Damtoft J.S., Lukasik J., Herfort D., Sorrentino D. & Gartner E.M. (2008). "Sustainable development and climate change initiatives" Cement and Concrete Research, 38 (2), 115-127.

Delikkurt B. C. & Sevim U. K. (2015). "Sugözü uçucu külünün betonun mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi" Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 4(1), 47-58.

Demir I., Sevim O., Özel G. & Dogan O. (2020). "Microstructural, physical and mechanical properties of aerated concrete containing fly ash under high temperature and pressure" Revista Română de Materiale/Romanian Journal of Materials, 2020, 50(2), 240-249.

Demir İ., Güzelkücük S. & Sevim Ö. (2018). "Effects of sulfate on cement mortar with hybrid pozzolan substitution" Eng. Sci. Tech., Int. J. 21 (3), 275-283.

Hashmi A. F., Shariq M. & Baqi, A. (2021). "An investigation into age-dependent strength, elastic modulus and deflection of low calcium fly ash concrete for sustainable construction" Construction and Building Materials, 283(2021), 122772.

Kim T., Davis J.M., Ley M.T., Kang S. & Amrollahi P. (2018). "Fly ash particle characterization for predicting concrete compressive strength" Construction and Building Materials, 165, 560-571.

Kou R., Guo M-Z., Han L., Li J-S., Li B., Chu H., Jiang L., Wang L., Jin W. & Poon C. S., "Recycling sediment, calcium carbide slag and ground granulated blast-furnace slag into novel and sustainable cementitious binder for production of eco-friendly mortar" Construction and Building Materials. 305(2021), 124772.

Özbay E., Erdemir M. & Durmuş H.I. (2016). "Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties—A review" Construction and Building Materials, 105, 423-434.

Schneider M., Romer M., Tschudin M. & Bolio H. (2011). "Sustainable cement production at present and future" Cement and Concrete Research, 41 (7), 642-650.

Schöler A., Lothenbach B., Winnefeld F. & Zajac M. (2015). "Hydration of quaternary portland cement blends containing blast-furnace slag, siliceous fly ash and limestone powder" Cement and Concrete Composites 55 (2015), 374-382.

- Sevim Ö. & Demir İ. (2019). “Physical and permeability properties of cementitious mortars having fly ash with optimized particle size distribution” *Cement and Concrete Composites*, 96 (2019), 266-273.
- Sevim Ö. & Demir İ. (2019).” Optimization of fly ash particle size distribution for cementitious systems with high compactness” *Construction and Building Materials*, 195, 104-114.
- Sevim Ö. & Sengul C. G. (2021). “Comparison of the influence of silica-rich supplementary cementitious materials on cement mortar composites: Mechanical and microstructural assessment” *Silicon*, 13, 1675-1690.
- Sevim Ö., Baran M. & Demir Ş. (2021) “Mechanical and physical properties of cementitious composites containing fly ash or slag classified with help of particle size distribution” *Romanian Journal of Materials*, 51 (1), 67-77.
- TS EN 1015-3, Kagir harcı- Deney metotları-Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile)
- TS EN 196-1, Çimento deney metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 2016.
- Türkiye Hazır Beton Birliği. (2021). Dünyada Sektör. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.thbb.org/sektor/dunyada-sektor/>
- Ustabaş İ. & Kaya, A. (2018). “Comparing the pozzolanic activity properties of obsidian to those of fly ash and blast furnace slag” *Construction and Building Materials*, 164 (2018), 297-307.
- Uzal B., Turanlı L. & Mehta P.K. (2007) “High-volume natural pozzolan concrete for structural applications” *ACI Mater J* 104 (5), 535-538;
- Yazıcı H., Yiğiter H., Karabulut A.Ş., Baradan B. (2008). “Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete” *Fuel*, 87(12), 2401-2407.
- Yun C. M., Rahman M. R., Phing C. Y. W., Chie A. W. M. & Bakri M.K.B. (2020). “The curing times effects on the strength of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) mortar” *Construction and Building Materials*. 260 (2020), 120622.



The Effect of Cu Doping On The Structural Properties and Electrical Resistivity Of MAPbI₃ Perovskite Thin Films

Satiye Korkmaz¹

¹Department of Electrical-Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Karabük University, 78050, Karabük, TURKEY

Başvuru/Received: 29/12/2021

Kabul / Accepted: 24/03/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Abstract

Perovskite thin films have good power conversion efficiency because they have high carrier mobility and a long carrier lifetime. As a result of the research, the yield of perovskite materials has recently reached a maximum efficiency of 31% in the laboratory environment. To investigate the effects of doping on perovskite thin films' structural, surface, and electrical resistivity, structural properties of undoped and 10% Cu-doped perovskite thin films were characterized with XRD, FESEM, EDX, and AFM. Their electrical measurements are carried out using four-point probe method. The resistivity of undoped and 10% Cu-doped perovskite thin films decreased asymptotically with voltage increase.

Key Words

“Perovskite thin film, methylamine lead iodide, electrical resistivity”

1. Introduction

Gustav Rose discovered a mineral species with a different crystal structure in the Ural Mountains in 1839; this mineral was CaTiO_3 . It is named "Perovskite" after the Russian mineralogist Lev Perovski, and this name is used for the structure instead of calling it mineral (Gustav, 1840). The crystal structure of perovskite, which Victor Goldschmidt first defined, is represented by the formula ABX_3 , where A and B represent cations and X the anion (Goldschmidt, 1926). Structures with different properties can be created with other elements; therefore, each perovskite structure may exhibit different electrical, optical, and physical properties. Thanks to their high efficiency and low cost, they have been widely used and applied in photovoltaic devices. As shown in Figure 1, in the perovskite compound (ABX_3), A, B, and X form the 3D structure (methylammonium (MA), lead (Pb), and iodide (I), respectively). In general, it has a cubic structure and α phase, where Pb has six nearest neighbors I ions (octahedral), and MA has a twelve-fold coordination region. Of the organic-inorganic hybrid lead perovskites, methylammonium lead halides (MAPbX_3) ($\text{X}=\text{I}, \text{Br}, \text{Cl}$) are attention-grabbing with their high absorption coefficients in a wide spectral range, high charge carrier mobility, and low exciton binding energies.

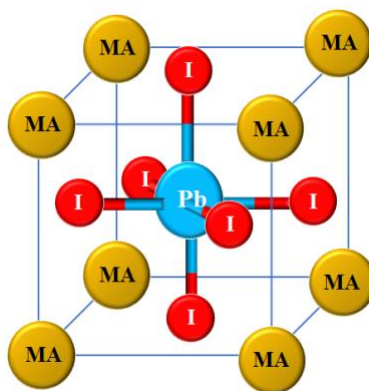


Fig. 1. Structure of MAPbI_3 perovskite (Soucase et al., 2016).

Perovskite films are produced using organic/inorganic materials via different methods such as spray pyrolysis, spin coating, and chemical vapor deposition (Chen et al. 2014; Barrows et al. 2014; Chen et al. 2014; Docampo et al., 2014; Leyden et al., 2014). Various techniques have been proposed, especially for the spin coating method. The most widely used method is the anti-solvent method (Jeon et al., 2014; Xiao et al., 2014; Zhou et al., 2015; Liu et al., 2015; Sun et al., 2016).

Brenner et al. investigated the relationship between the crystal structure and synthesis conditions. They concluded that the two-step method is more effective for synthesizing high-quality perovskites than one-step and multi-step perovskite film preparation methods (Brenner et al., 2016). Burschka et al. found that in MAPbI_3 solar cells, the perovskite morphology formed by the reaction of PbI_2 with MAI is determined by the morphology of the first PbI_2 layer (Chen, 2017; Burschka et al., 2013; Chen et al., 2015). Perez et al. obtained perovskite films with various crystal sizes using the simple and cost-effective method they developed to produce MAPbI_3 thin films. They demonstrated the relationship between film morphologies, grain size, and high yield by controlling the transformation parameters (Perez et al. 2020). H. Choi et al.'s objective were to increase heterojunction hybrid solar cells' efficiency by doping cesium into MAPbI_3 perovskite thin films. They produced a high-performance hybrid solar cell by doping 10% cesium to the MAPbI_3 perovskite structure via thermal evaporation under a high vacuum (Choi et al., 2014). J. Costa et al. described a physical vapor deposition method for producing high-purity crystalline MAPbI_3 perovskite thin films under high vacuum conditions. Perovskite thin-film production via optimized physical vapor deposition method provided a homogeneous, stable, and pure perovskite layer. Compared to other methods, two or more components are deposited simultaneously, which offers advantages such as multilayer deposition, layer thickness control, stoichiometry control, prevention of solvents, and potentially low production costs (Costa et al., 2018).

In this study, fluorine tin oxide (FTO) substrates were coated with undoped and 10% Cu-doped perovskite films. The films' structural properties were determined by XRD, composition analysis by EDX, surface morphology by FESEM, and film thickness by AFM analysis. Electrical resistivity measurements were performed using the four-point probe method, with a Keithley 2400 sourcemeter and 2100/220 Keithley multimeter.

2. Experimental

2.1. Preparation of Perovskite thin films

Two FTO (fluorine tin oxide) substrates of 70 mm x 50 mm were used. The cleaning process was done appropriately and systematically. The substrates were first washed using detergent and distilled water, then rinsed with distilled water, dried in the oven, and then became ready for use. Firstly, the solution for undoped perovskite thin film was prepared: 0.316 g (2×10^{-4} mole) of $\text{CH}_3\text{NH}_2\text{I}$ and 0.922 g (2×10^{-4} mole) of PbI_2 were weighted and mixed with 20 ml of DMF (dimethylformamide) and 10 ml of methanol in a beaker, forming a homogeneous solution. For 10% Cu-doped perovskite thin film, the same perovskite solution was prepared in a second beaker. 25 ml

of distilled water and 0.1208 g Cu (NO₃)₂ (10% Cu doping) were added to the prepared solution. Substrates were immersed into the prepared solutions, left for 1 hour, then placed in an oven at 70 °C, and dried for 15 minutes.

2.2. Characterizations

X-ray patterns are examined by X-ray diffraction (XRD) with a CuKα₁ radiation source (BRUKER AXS D8 model, λ=1.5406 Å) over the range of 10°<2θ<50°. 2D surface morphology of the thin films is examined by SEM (Carl Zeiss Ultra Plus Gemini FESEM); the film thickness, surface roughness, and 3D surface morphology are studied by AFM (Veeco Multimode 8). I-V measurements were taken with Keithley 2400 Sourcemeter device and 2100/220 Keithley multimeter, and resistivity of the films was calculated. I-V and ρ-V curves were obtained for each sample.

3. Results and Discussion

3.1. Structural and Surface Properties of Perovskite Thin Films

The doping process significantly affects the thin films' surface morphologies and compositions. The surface morphologies and compositions of undoped and 10% Cu-doped thin films deposited on the FTO substrate were examined, and found that they exhibit different physical properties. Figures 2 and 3 show SEM images and EDX analysis results of undoped and 10% Cu-doped thin films, respectively. Compared to the undoped perovskite thin film in Figure 2a, in Figure 3a Cu adhered very well to the surface by showing a homogeneous distribution. As can be better understood from the magnifications in Figures 3b and c, new formations were observed in the CH₃NH₃PbI₃ superstructure after Cu doping. Cu spheres formed a homogeneous and tight structure without agglomeration on the surface. EDX composition analyzes in Figure 2b, and Figure 3d showed the proportional distribution of Cu within the structure.

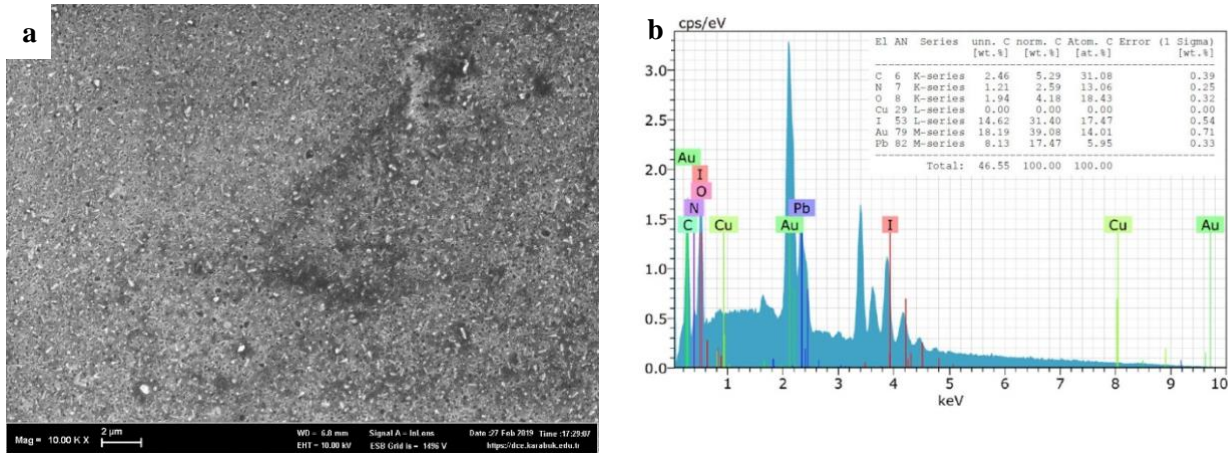


Fig. 2. Undoped perovskite thin films (a) SEM image (b) EDX analysis.

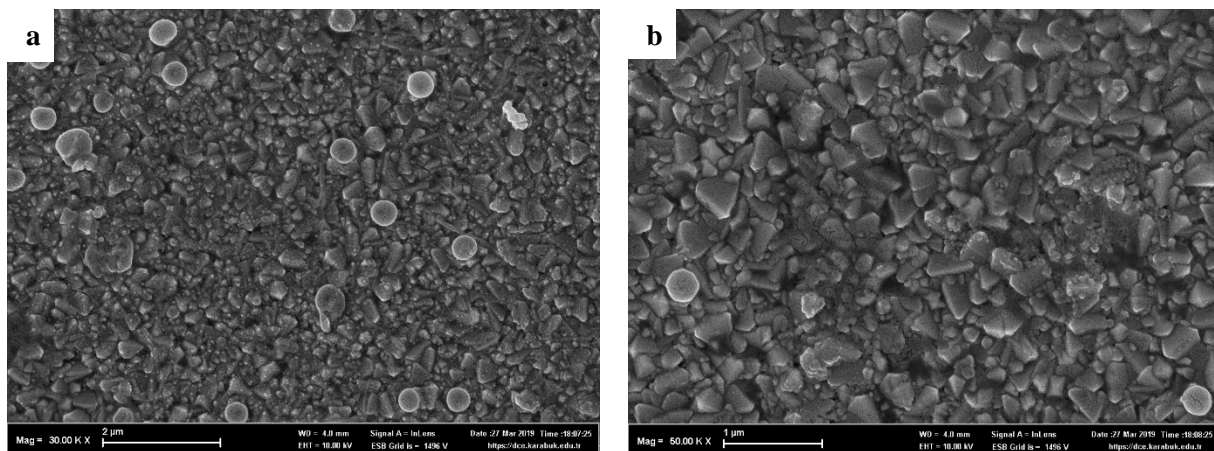


Fig. 3. 10% Cu-doped perovskite thin films (a,b,c) SEM images (d) EDX analysis.

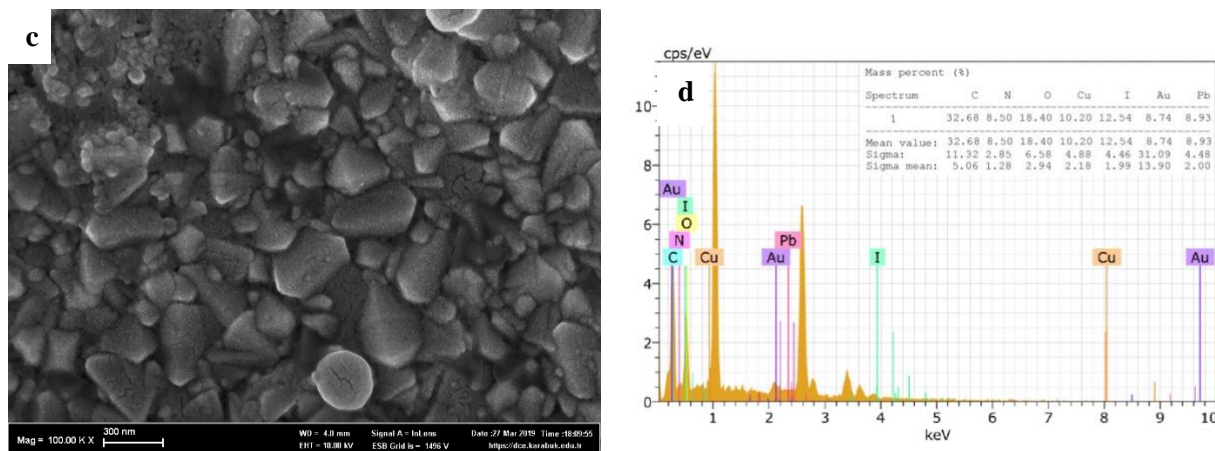


Fig. 3 (cont.). 10% Cu-doped perovskite thin films (a,b,c) SEM images (d) EDX analysis.

The structural properties of the thin films deposited on FTO were determined using XRD patterns. Figure 4 shows their XRD patterns. In the XRD diffraction patterns of the films drawn in the $2\theta=10^{\circ}$ - 50° range, the diffraction peaks of undoped and 10% Cu-doped perovskite thin films at $2\theta=12.64^{\circ}$ and 26.32° are associated with the hexagonal crystal structure of PbI_2 (Filho& Marques, 2018). As can be seen from Figure 4, the 2θ diffraction peaks of MAPbI_3 at 14.08° (110), 28.5° (220), 32° (310) confirm the complete formation of MAPbI_3 (Chiang et al., 2014; Im et al., 2011). A preferred growth orientation along the (110) direction was observed in the XRD pattern of MAPbI_3 film, along with corresponding peaks in other directions. The peaks correspond to the pure tetragonal (β) phase of the MAPbI_3 perovskite (Guo et al., 2016; Zhou et al., 2015). The diffraction peaks of MAPbI_3 around $2\theta=14^{\circ}$, 28° , and 32.4° , which are apparent in the undoped perovskite thin film, disappeared in the 10% Cu-doped perovskite thin film (Basumatary&Agarwal, 2020).

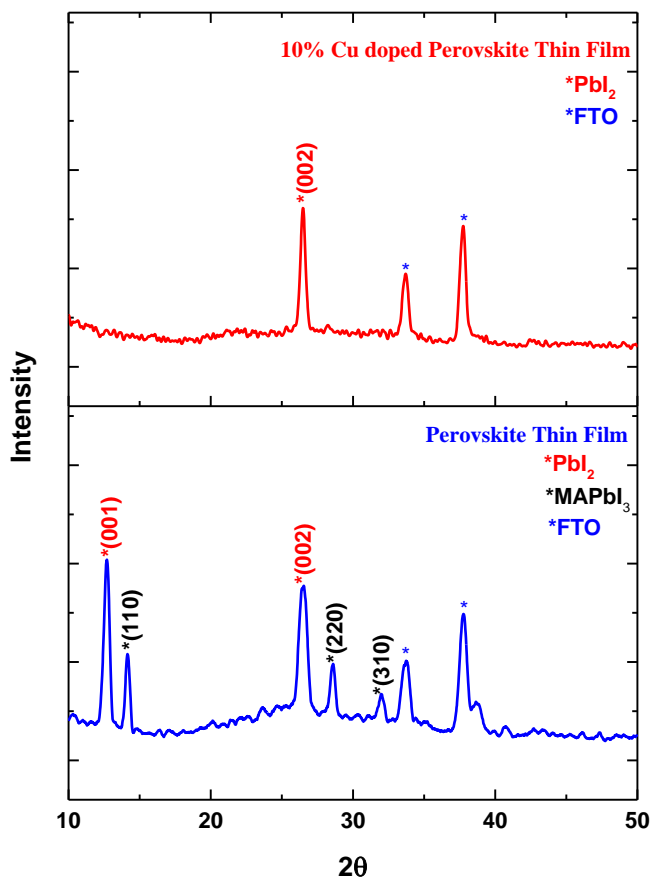


Fig. 4. XRD analysis of undoped and 10% Cu-doped perovskite thin films.

AFM analyzes are performed to determine 3D surface morphologies and surface roughness of undoped and 10% Cu-doped thin films; the results are shown in Figure 5. The surface roughness/coarseness was 236.01 nm and 114.11 nm for undoped (Figure 5a,b) and 10% Cu-doped (Figure 5c,d) perovskite thin films. 10% Cu-doped perovskite thin films' surface roughness/coarseness is lower because the crystallites are spherical and have a uniform distribution. The surface becomes more homogeneous and consists of densely packed grains.

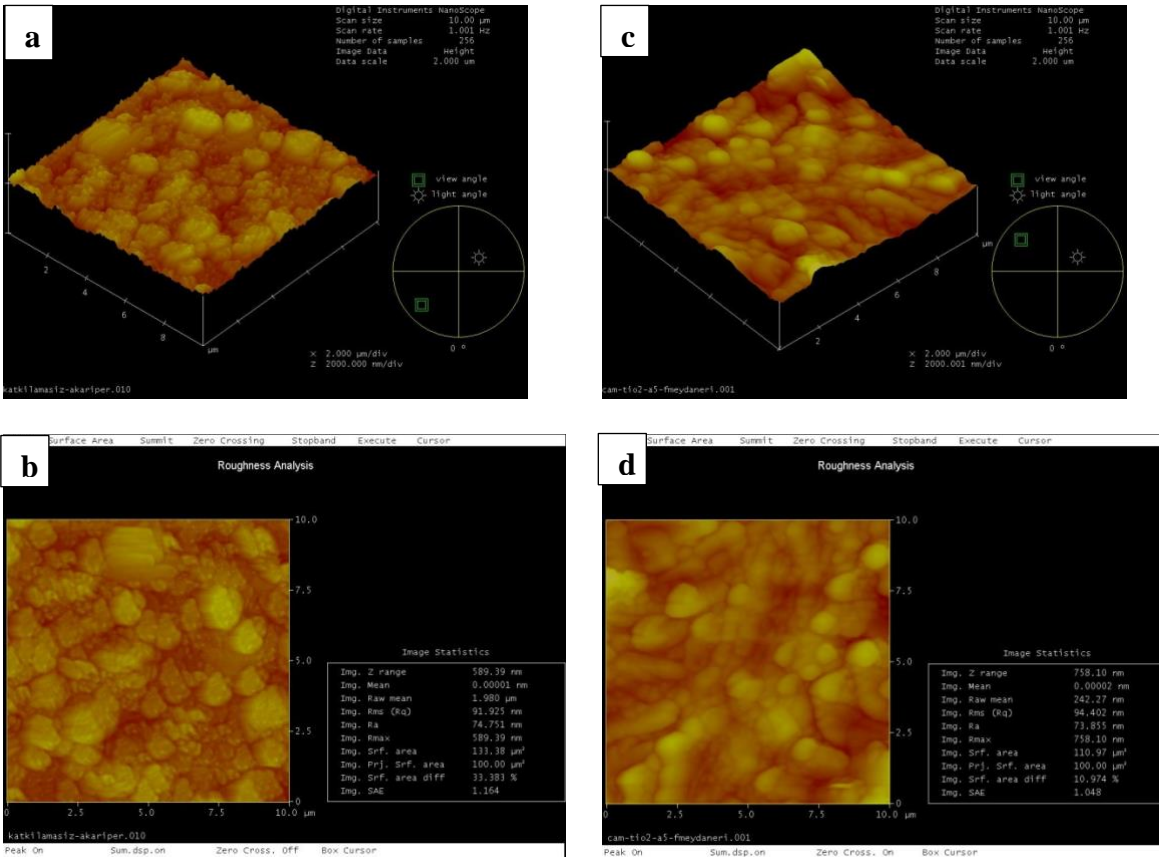


Fig. 5. AFM images (a,b) Undoped perovskite thin films (c,d) 10% Cu-doped perovskite thin films.

3.2. Electrical Resistivity Measurements

The electrical resistivity of undoped and 10% Cu-doped perovskite thin films was measured with the Keithley 2400 sourcemeter and 2100/220 Keithley multimeter using the four-point probe method. The probes' radius was 0.5 mm, and the distance between them was 1 mm. The contacts were made on the film surface with a silver paste (Ag), then the probes gently/softly touched them. All measurements were made at room temperature and in the dark.

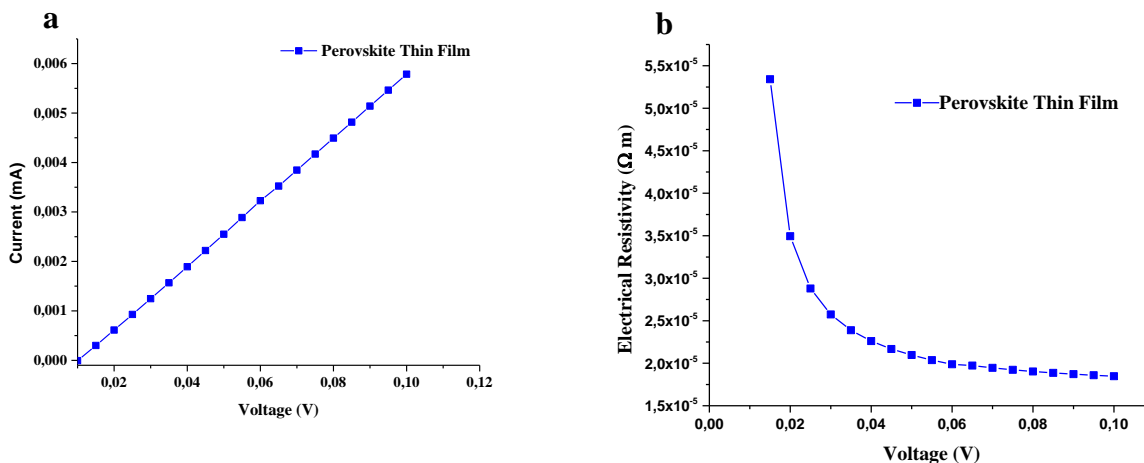


Fig. 6. I-V and ρ -V curves of Undoped Perovskite Thin Films.

I-V values of the films were taken, and resistivities were computed using Equation (I). The thin films' I-V and ρ -V curves are shown in Fig. 6 and Fig.7. The resistivity was calculated for both thin films with the following equation (Tezel et al., 2019; Tezel et al., 2019; Tezel et al., 2021).

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right) \quad (I)$$

V, I, and t represent voltage, current, and film thickness. Accordingly, undoped and 10% Cu-doped perovskite thin films' electrical resistivities decrease asymptotically as the applied voltage increases.

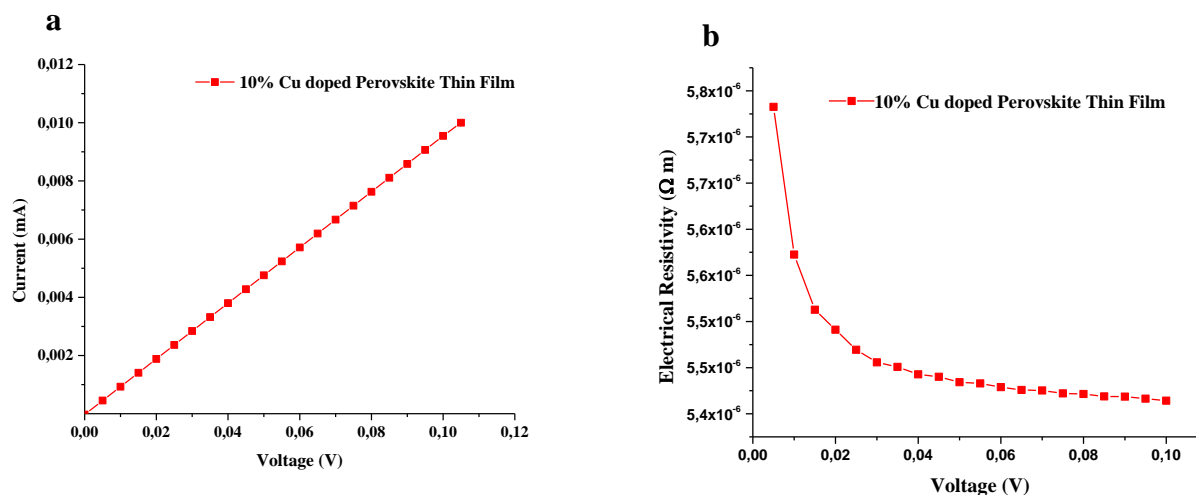


Fig. 7. I-V and ρ -V curves of 10% Cu-doped Perovskite Thin Films

4. Conclusion

Metal oxides are preferred as electron transport layers in perovskite thin films because of their thermal and chemical stability. Copper has created a promising hole transfer layer with very high thermal and electrical conductivity in thin-film technology. It does not show any signs of deterioration and does not lose its stability when stored in atmospheric conditions. In this study, undoped and 10% Cu-doped perovskite thin films were produced on FTO. Their structural characterizations were carried out with XRD, FESEM, EDX, and AFM, and the effects of doping were examined. Electrical resistivity values for Undoped and 10% Cu-doped perovskite thin films were determined as $2.36 \times 10^{-5} \Omega m$ and $5.46 \times 10^{-6} \Omega m$, respectively. These effects show that introducing Cu doping to perovskite thin films changes the electrical properties of the material significantly. Cu additives had a reducing effect on the crystallization in the thin film. When undoped and 10% Cu-doped perovskite thin films were compared in SEM images, the homogeneous and densely packed grains in 10% Cu-doped perovskite thin films reduced the resistivity. According to literature, flat crystalline structures don't form spaces. If there are gaps between the particles, the resistance increases. This explains why the resistance in our study was lower than the literature (Targhi et al., 2018; Basumatary & Agarwal, 2019). The use of Cu as a dopant is an effective method of improving the electrical resistivity of perovskite thin films for device applications. As a way forward and due to prominent conductive nature of the synthesized material, it could be suitable alternative material for multiple applications like solar cell and energy storage.

Declaration of Competing Interest

The author declares that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have influenced the work reported in this paper.

Referanslar

Barrows, A. T., Pearson, A. J., Kwak, C. K., Dunbar, A. D. F., Buckley, A. R., Lidzey, D. G. (2014). Efficient Planar Heterojunction Mixed-Halide Perovskite Solar Cells Deposited via Spray-Deposition, *Energy Environ. Sci.* 7, 2944–2950. doi:10.1039/C4EE01546K.

Basumatary, P., Agarwal, P. (2019). Two-step fabrication of MAPbI₃ perovskite thin films with improved stability, *Bull. Mater. Sci.* 42, 268. doi:10.1007/s12034-019-1959-1.

Basumatary, P., Agarwal, P. (2020). Photocurrent transient measurements in MAPbI₃ thin films, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 10047–10054. doi:10.1007/s10854-020-03549-7.

- Brenner, T.M., Rakita, Y., Orr, Y., Klein, E., Feldman, I., Elbaum, M., Cahen, D., Hodes, G. (2016). Conversion of single crystalline PbI₂ to CH₃NH₃PbI₃: Structural relations and transformation dynamics, *Chem. Mater.*, 28, 6501–6510. doi:10.1021/acs.chemmater.6b01747.
- Burschka, J., Pellet, N., Moon, S.-J., Humphry-Baker, R., Gao, P., Nazeeruddin, M.K., Grätzel, M. (2013), Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells, *Nature* 499 316–320. doi:10.1038/nature12340.
- Chen, C. -W., Kang, H. -W., Hsiao, S. -Y., Yang, P. -F., Chiang, K. -M., Lin, H. -W. (2014). Efficient and Uniform Planar-Type Perovskite Solar Cells by Simple Sequential Vacuum Deposition, *Adv. Mater.* 26, 6647–6652. doi: 10.1002/adma.201402461.
- Chen, H. (2017). Two-Step Sequential Deposition of Organometal Halide Perovskite for Photovoltaic Application, *Adv. Funct. Mater.*, 27, 1–19. doi: 10.1002/adfm.201605654.
- Chen, H., Wei, Z., Zheng, X., Yang, S. (2015). A scalable electrodeposition route to the lowcost, versatile and controllable fabrication of perovskite solar cells, *Nano Energy*, 15, 216–226. doi:10.1016/j.nanoen.2015.04.025.
- Chen, Q., Zhou, H., Hong, Z., Luo, S., Duan, H. -S., Wang, H. -H., Liu, Y., Li, G., Yang, Y. (2014). Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells Via Vapor-Assisted Solution Process, *J. Am. Chem. Soc.* 136, 622–625. doi:10.1021/ja411509g.
- Chiang, C.-H., Tseng, Z.-L., Wu, C.-G. (2014). Planar heterojunction perovskite/PC71BM solar cells with enhanced open-circuit voltage via a (2/1)-step spin-coating process, *J. Mater. Chem. A*, 2, 15897–15903. doi:10.1039/c4ta03674c.
- Choi, H., Jeong, J., Kim, H., Kim, S., Walker, B., Kim, G., Kim, J.Y. (2014). Cesium doped methylammonium lead iodide perovskite light absorber for hybrid solar cells, *Nano Energy*, 7 80-85. doi:10.1016/j.nanoen.2014.04.017.
- Costa, J.C.S., Azevedo, J., Araujo, J.P., Santos, L.M.N.B.F., Mendes, A. (2018). High purity and crystalline thin films of methylammonium lead iodide perovskites by a vapor deposition approach, *Thin Solid Films*, 664, 12-18. doi:10.1016/j.tsf.2018.08.026.
- Docampo, P., Hanusch, F. C., Stranks, S. D., Döblinger, M., Feckl, J. M., Ehrensperger, M., Minar, N. K., Johnston, M. B., Snaith, H. J., Bein, T. (2014). Solution Deposition-Conversion for Planar Heterojunction Mixed Halide Perovskite Solar Cells, *Adv. Energy Mater.* 4, 1400355. doi: 10.1002/aenm.201400355.
- Filho, J. M. C. S. and Marques, F. C. (2018), Growth of Perovskite Nanorods from PbS Quantum Dots, *Energy and Sustainability*, 3, 1843-1848. doi: 10.1557/adv.2018.188.
- Goldschmidt, V. M. (1926). Die Gesetze Der Krystallochemie, *Die Naturwissenschaften*, 14 477–485. doi: 0.1007/BF01507527.
- Guo, X., McCleese, C., Kolodziej, C., Samia, A.C., Zhao, Y., Burda, C. (2016). Identification and characterization of the intermediate phase in hybrid organic–inorganic MAPbI₃ perovskite, *Dalton Trans.*, 45, 3806–3813. doi: 10.1039/c5dt04420k.
- Gustav, R. (1840). Beschreibung Einiger Neuen Mineralien Des Urals, *Annalen Der Physik*, 126(8) 652–56, doi: 10.1002/andp.18401260807.
- Im, J.-H., Lee, C.-R., Lee, J.-W., Park, S.-W., Park, N.-G. (2011). 6.5% efficient perovskite quantum-dot-sensitized solar cell, *Nanoscale*, 3, 4088–4093. doi: 10.1039/c1nr10867k.
- Jeon, N. J., Noh, J. H., Kim, Y. C., Yang, W. S., Ryu, S. (2014). Seok, S., Solvent Engineering for High-Performance Inorganic-Organic Hybrid Perovskite Solar Cells, *Nat. Mater.* 13, 897–903. doi: 10.1038/nmat4014.
- Jeon, N.J., Noh, J.H., Kim, Y.C., Yang, W.S., Ryu, S., Il Seol, S. (2014). Solvent engineering for high-performance inorganic-organic hybrid perovskite solar cells, *Nat. Mater.* 13 897–903. doi:10.1038/nmat4014.
- Leyden, M. R., Ono, L. K., Raga, S. R., Kato, Y., Wang, S., Qi, Y. (2014). High Performance Perovskite Solar Cells by Hybrid Chemical Vapor Deposition, *J. Mater. Chem. A* 2, 18742-18745. doi:10.1039/c4ta04385e
- Liu, J., Gao, C., He, X.L., Ye, Q.Y., Ouyang, L.Q., Zhuang, D.M., Liao, C., Mei, J., Lau, W.M. (2015). Improved crystallization of perovskite films by optimized solvent annealing for high efficiency solar cell, *Acs Appl. Mater. Inter.*, 7, 24008–24015. doi: 10.1021/acsami.5b06780.
- Perez, M., Peled, S. S., Templeman, T., Osherov, A., Bulovic, V., Katz, E. A., Golan, Y. (2020). A Two-Step All Solution Process for Conversion of Lead Sulfide to Methylammonium Lead Iodide Perovskite Thin Films, *Thin Solid Films*, 714, 138367. doi: 10.1016/j.tsf.2020.138367.

- Soucase, B. M., Pradas, I. G., Adhikari, K. R. (2016). Numerical Simulations on Perovskite Photovoltaic Devices, Perovskite Materials -Synthesis, Characterisation, Properties, and Applications, Dr. Likun Pan (Ed.), InTech.
- Sun, X., Zhang, C.F., Chang, J.J., Yang, H.F., Xi, H., Lu, G., Chen, D.Z., Lin, Z.H., Lu, X.L., Zhang, J.C., Hao, Y. (2016). Mixed-solvent-vapor annealing of perovskite for photovoltaic device efficiency enhancement, *Nano Energy*, 28, 417–425. doi: 10.1016/j.nanoen.2016.08.055.
- Targhi, F. F., Jalili, Y. S., Kanjouri, F. (2018). MAPbI₃ and FAPbI₃ perovskites as solar cells: Case study on structural, electrical and optical properties, *Results in Physics*, 10, 616-627. doi:10.1016/j.rinp.2018.07.007.
- Tezel, N. S., Tezel, F. M., Kariper, İ. A. (2019). Surface and Electro-Optical Properties of Amorphous Sb₂S₃ Thin Films, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 125, 198-214. doi:10.1007/s00339-019-2475-2.
- Tezel, N. S., Tezel, F. M., Kariper, İ. A. (2019). The Impact of pH on the Structural, Surface, Electrical and Optical Properties of Nanostructured PbSe Thin Films, *Materials Research Express*, 6, 076422. doi:10.1088/2053-1591/ab1675.
- Tezel, N. S., Tezel, F. M., Kariper, İ. A. (2021). Effects of pH on the Optical, Structural and Supercapacitive Properties of BiTe Thin Films Produced via CBD, *Bulletin of Materials Science*, 44, 150. doi:10.1007/s12034-021-02398-2.
- Xiao, M.D., Huang, F.Z., Huang, W.C., Dkhissi, Y., Zhu, Y., Etheridge, J., Gray-Weale, A., Bach, U., Cheng, Y.B., Spiccia, L. (2014). A fast deposition-crystallization procedure for highly efficient lead iodide perovskite thin-film solar cells, *Angew Chem. Int. Edit.* 53, 9898–9903. doi: 10.1002/anie.201405334.
- Zhou, Y., Yang, M., Vasiliev, A.L., Garces, H.F., Zhao, Y., Wang, D., Pang, S., Zhu, K., Padture, N.P. (2015). Growth control of compact CH₃NH₃PbI₃ thin films *via* enhanced solid-state precursor reaction for efficient planar perovskite solar cells, *J. Mater. Chem. A*, 3, 9249– 9256. doi:10.1039/c4ta07036d.
- Zhou, Y.Y., Yang, M.J., Wu, W.W., Vasiliev, A.L., Zhu, K., Padture, N.P. (2015). Room-temperature crystallization of hybrid-perovskite thin films *via* solvent-solvent extraction for high-performance solar cells, *J. Mater. Chem. A*, 3, 8178–8184. doi: 10.1039/c5ta00477b.



Sıra Bağımlı Hazırlık Süreli Özdeş Olmayan Paralel Makine Çizelgeleme Problemi: Oluklu Mukavva Fabrikasında Bir Uygulama

Non-Identical Parallel Machine Scheduling Problem with Sequence-Dependent Setup Time: An Application in a Corrugated Cardboard Factory

Sümeyye Ünlü^{*1} , Hacı Mehmet Alakaş¹ 

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği A.B.D, 71000, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 17/01/2022

Kabul / Accepted: 01/03/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz
Özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemi son zamanlarda işletmelerin ilgisini çeken konulardan birisi olmuştur. İşletmeye gelene bir işin son derece etkin ve hızlı şekilde yapılabilmesi çizelgelemeye bağlıdır. Makinelerin işlem süreleri, ürün geçişlerinde yapılan hazırlık süreleri gibi fazladan harcanan her süre üretim hızı ve kapasitesini etkilemektedir. Yapılan bu çalışmada sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Çalışma oluklu mukavva üretimi gerçekleştiren işletmede uygulamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı en büyük tamamlanma zamanının (C_{max}) en küçüklümesidir. Firmada aynı operasyonlarda kullanılan fakat sahip oldukları özelliklere göre özdeş olmayan iki adet paralel makine bulunmaktadır. Makine farklılıkları ise hız, kapasite, ürün geçişlerindeki hazırlık süreleri ve teknik özellikleridir. İşletmeden 112 adet sipariş- ürün bilgisi ve makinelerde yapılan hazırlık sürelerinin bilgisi alınmıştır. Alınan bilgiler doğrultusunda gelen siparişlerin işlem süreleri ve ürün geçişleri esnasında yapılan hazırlıkların hazırlık süreleri matrisi hesaplanmıştır. Bu hesaplanan veriler oluşturulan matematiksel modele aktarılarak, ILOG Cplex Optimization programı ile çözülmüştür. Çözüm sonucunda işletme için uygun iki haftalık üretim çizelgesi elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme, sıra bağımlı hazırlık süresi, en büyük tamamlanma zamanı”

Abstract

The problem of non-identical parallel machine scheduling has been one of the issues that attracted the attention of enterprises recently. Being able to do a job very effectively and quickly depends on scheduling. Any extra time spent, such as the processing times of the machines, the preparation times for product transitions, affects the production speed and capacity. In this study, non-identical parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup time is discussed. The study was carried out practically in a company that produces corrugated cardboard. The aim of the study is to minimization of maximum completion time (C_{max}). There are two parallel machines in the company that are used in the same operations but are not identical according to their features. Machine differences are speed, capacity, preparation times for product transitions and technical features. 112 order-product information and information about the preparation times made on the machines were obtained from the enterprise. In line with the information received, the processing times of the incoming orders and the preparation times of the preparations made during the product transitions were calculated. These calculated data were transferred to the created mathematical model and solved with the ILOG Cplex Optimization program. As a result of the solution, a two-week production schedule suitable for the enterprise was obtained.

Key Words

“non-identical parallel machine scheduling, sequence dependent setup time, maximum completion time”

1. Giriş

Üretim ve hizmet sektörlerinde artan rekabet ile sıralama ve çizelgeleme konusu ön plana çıkan konulardan olmuştur. Özellikle üretim sektörlerinde verimlilik artışı, müşteriye hızlı cevap verebilme, eldeki kaynakları daha etkin şekilde kullanabilmeleri açısından büyük rol oynamaktadır. Çizelgeleme aslında karar verme sürecidir ve birçok üretim sektöründe kullanılmaktadır (Pinedo, 2008). Burada karar verilen süreç, neyin ne zaman, hangi makinede, hangi operasyonda, hangi kaynakla üretilmesi gerektiğini göstermektedir. Çizelgeleme problemleri kendi aralarında incelediğinde, akış tipi, atölye tipi, tek makine ve paralel makine üretim ortamları olarak sınıflandırılmaktadır. Akış tipi ve atölye tipi çizelgeleme problemlerinde üretim merkezleri ve bunları takip eden rotalar mevcuttur. Tek makine çizelgeleme problemlerinde ise tek makine mevcuttur ve bütün işler burada işlem görmektedir. Paralel makine çizelgeleme problemlerinde ise makineler paralel olarak yerleştirilmiştir ve bu makineler aynı işleri yapmaktadır. İşler ise rassal olarak atanmaktadır (French, 1982).

Paralel makine çizelgeleme problemleri yapısı gereği tek makine çizelgeleme problemlerine göre daha zor ve karmaşıktır. Paralel makine problemleri, m tane işi yapan n tane makinenin paralel olarak konumlandırıldığı ortamlardır. Bu m işin her biri n makedeki bir operasyonda işlem görmektedir. Paralel makine çizelgeleme problemleri makine çeşidine göre üç sınıfa ayrılmaktadır. Özdeş paralel makineler, farklı hızlara sahip paralel makineler ve özdeş olmayan paralel makinelerdir. Özdeş paralel makine ortamlarında aynı işi yapan ve aynı hıza sahip makineler bulunmaktadır. Farklı hızlara sahip paralel makine ortamları ise adından da anlaşılacağı üzere işlerin özelliklerine bakılmaksızın makine hızlarının farklı olduğu makineler bulunmaktadır. Özdeş olmayan paralel makine ortamlarında ise hızları, kapasiteleri, işlem sayılarının farklılık gösterdiği makineler bulunmaktadır.

Özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemleri son zamanlarda araştırmacıların ilgisini çekmeye başlamıştır. İşler makinelere atanırken makinenin hızı, teknik özellikleri, termin süreleri gibi faktörler dikkate alınmakta ve işlem görmektedir. Paralel makine çizelgeleme problemlerinde olduğu gibi özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemlerinde de çözüme ulaşmak için matematiksel modeller, sezgisel yöntemler, optimal yöntemler kullanılmaktadır. Mevcut problemler incelenerek uygun amaç fonksiyonları belirlenmektedir bunlar toplam tamamlanma zamanı minimizasyonu, geciken iş sayını küçüktür.

Özdeş olmayan paralel makine problemlerine hazırlık sürelerinin de dahil edildiği ve sıra bağımlılığın önemli olduğu problemler ise sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemleri olarak adlandırılmaktadır. Bir işin kendinden önce gelen işe bağlı olarak hazırlık sürelerinin değişmesi durumuna sıra bağımlı hazırlık süresi denmektedir. Hazırlık zamanı işler arasında yapılacak ayarlamalardan olabileceği gibi makinenin bakımı, temizliği gibi durumlardan da kaynaklanabilmektedir.

Bu çalışma Ankara Başkent OSB'de bulunan oluklu mukavva üretimi yapan işletmede gerçekleştirilmektedir. Problemin amaç fonksiyonu en büyük tamamlanma zamanı (C_{max}) minimizasyonudur. İşletmede iki adet özdeş olmayan paralel makine vardır ve işler sıra bağımlı olarak ele alınmaktadır. Makinelerin işlem süreleri, kapasiteleri, işler arası hazırlık süreleri, üretim hızları birbirlerinden farklıdır. Problemin çözüme ulaşmak için fabrikadan 112 adet sipariş ve ürün detay bilgileri alınmıştır. Eldeki verileri kullanarak ürünlerin işlem süreleri ve hazırlık süreleri matrisleri hesaplanmıştır. Matematiksel model oluşturularak, hesaplanan veriler ile birlikte ILOG Cplex Optimization programı ile çözülmüştür. Çözüm sonucunda iki haftalık üretim çizelgeleri elde edilmiştir.

Çalışma dört bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde literatürde yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde, oluklu mukavva fabrikasında yapılan sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemi üzerine yapılan uygulama, model ve sonuçlardan bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde ise sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. Literatür Araştırması

Literatürde özdeş olmayan paralel makine ve sıra bağımlı özdeş olmayan paralel makine hakkında birçok çalışma mevcuttur (Deane ve White (1975), Bank ve Wenner (2001), Silva ve diğ (2002), Chen (2009). Bank ve Wenner (2001), sezgisel yöntemler kullanarak özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Amaçları erken ve geç başlama cezalarını en küçüktür. Weng ve arkadaşları (2001), sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini ağırlıklandırılmış ortalama tamamlanma zamanını minimize etmek için çözümlenmişlerdir. Yöntem olarak sezgisel yöntemleri kullanmışlardır. Liaw ve diğ. (2003) özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini dal sınır yöntemi kullanarak çözmüşlerdir. Koulamas ve Kyparis (2003) çalışmalarından özdeş olmayan paralel makineleri ele almışlardır. Tamamlanma zamanını en aza indirmeyi hedefleyen çalışmalarından meta sezgisel yöntemler kullanmışlardır. Türkcan ve arkadaşları (2003), özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini uygulamalı olarak yapmışlardır. Uygulamayı ise CNC makine üreten firmada gerçekleştirmişlerdir. Toplam gecikmeyi minimize etmeyi hedefleyen çalışmalarında iki ölçütlü algoritma yöntemi kullanmışlardır. Lee ve Asllani (2004) 0-1 karma tam sayı yöntemini kullanarak sıra bağımlı hazırlık süreli paralel makine çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Problemin çözümünde amaç fonksiyonu olarak geciken iş sayısını ve son işin tamamlanma zamanını en aza indirmeyi hedeflemişlerdir. Silva ve Magalhaes (2006), sezgisel yöntemler kullanarak ilgisiz paralel makine çizelgeleme problemlerini ele almışlardır. Rocha ve diğ. (2008), sezgisel yöntemler kullanarak toplam gecikmeyi küçüktürmeyi amaçlamışlardır. Chen (2009) çalışmasında sıra bağımlı hazırlık süreli ilgisiz paralel makine çizelgeleme problemini çözmüşlerdir. Çözüme ulaşmak için tavlama benzetimi yöntemi kullanmışlardır. Amaçları ise toplam gecikmenin en küçüktürmesidir. Arnaout ve diğ. (2010) makalelerinde sıra bağımlı hazırlık süreli ilgisiz paralel makine çizelgeleme problemini ele almışlardır. Karınca kolonisi yöntemi kullanarak üretim sürelerini minimize etmeyi hedeflemişlerdir. Tran ve Beck

(2011), işlerin tamamlanma zamanını en küçükleyen özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini çözmüşlerdir. Valla ve Ruiz (2011), genetik algoritma yöntemi ile hazırlık süreleri dikkate alınan sıra bağımlı özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Yılmaz ve arkadaları (2014), tamamlanma zamanını en küçükleyen özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini çözmüşlerdir. Çözüme ulaşmak için ise genetik algoritma kullanmışlardır. Liao ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmalarında sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini melez sezgisel algoritma yöntemini kullanarak çözmüşlerdir. Çalışmanın sonucunda toplam tamamlanma zamanını en küçüklemişlerdir. Herr ve Goel (2016) makalelerinde hazırlık zamanını dikkate alarak sıra bağımlı ilişkisiz paralel makine problemini ele almışlardır. Toplam gecikmeyi minimize etmeyi hedeflemişlerdir. Hulett ve diğ. (2017) çalışmalarını uygulamalı olarak elektronik üretim tesisinde bulunan ilgisiz paralel makineler üzerinde yapmışlardır. Toplam ağırlıklı gecikmeyi en aza indirmeyi hedefleyen çalışmalarında çözüme ulaşmak için parçacık sürüsü algoritması kullanmışlardır. Sarıççek (2018) makalesinde özdeş olmayan paralel makine problemini sıra bağımlı hazırlık süreli olarak ele almıştır. Gonzalez ve diğ. (2019) çalışmalarını metal katlama fabrikasında uygulamalı olarak yapmışlardır. Toplam gecikmeyi küçükmeyi hedefleyen çalışmada özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini çözmüşlerdir. Furugi (2021) çalışmasında sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Toplam gecikmeyi ve erken teslim sürelerini en aza indirmeyi hedefleyen çalışmada karma tam sayılı matematiksel model önermişlerdir.

İncelenen literatür çalışmalarına baktığımızda özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemi ile ilgili farklı amaç fonksiyonları ve yöntemler ele alınmıştır. Çalışmaların büyük yoğunluğu toplam tamamlanma zamanını en küçüklemeyi hedeflemiş olup yöntem olarak ise sezgisel yöntemler tercih edilmiştir. Yapılan bu çalışmanın literatüre en büyük katkısı ise uygulamalı olarak ele alınmasıdır. Böylelikle uygulamalı olarak yapılan özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemlerine, sıra bağımlı hazırlık süreleri de eklenerek ileride yapılacak olan çalışmalara, özellikle de oluklu mukavva sektörüne örnek olacaktır.

3. Paralel Makine Çizelgeleme

Paralel makine çizelgeleme problemleri gün geçtikçe işletmeler için önem arz etmeye başlamış olup bu konuda birçok literatür çalışmaları da mevcuttur (Silva ve diğ. (2002), Chen (2009), Joo ve Kim (2012)). Çizelgeleme ile makineleri, kaynakları, işçileri etkin şekilde kullanarak verimlilik, kapasite ve müşteriye hızlı cevap vermeye başlanılmıştır. Teknolojinin artması ile işletmeler makine kapasitelerini arttırmaya başlamışlardır. Aynı işi yapan fakat daha gelişmiş özellikli, hızlı makineler olarak üretim ortamlarını özdeş olmayan paralel makine ortamına dönüştürmektedirler. Bu sebeple özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemleri kaçınılmaz olmaya başlamıştır.

Paralel makine çizelgeleme problemlerinin genel geçer kabul ve varsayımları şu şekildedir:

- İki iş aynı anda işleme alınmaz, her işin belirli bir operasyonu vardır.
- Kesinti olmadığı varsayılr. Bir işin başlaması için önceki işin bitmesi gerekmektedir.
- İşler ertelenemez.
- Makineler boş kalabilir.
- Çizelgeleme boyunca makinelerde arıza olmamaktadır.
- İş sayısı, makine sayısı gibi operasyonlar bilinmektedir.
- Makinelerde aynı anda birden fazla iş olmamaktadır.

Bu varsayımlar özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemlerinde geçerli sayılmaktadır, bunlardaki farklılıklar ise:

- Makine hızları birbirlerinden farklıdır.
- Makinelerin sahip olduğu kapasiteler farklıdır.
- Her işin makinelerdeki işlem süreleri farklıdır (Engin, 2001).

4. Sıra Bağımlı Hazırlık Süreli Özdeş Olmayan Paralel Makine Çizelgeleme Problemi: Oluklu Mukavva Fabrikasında Bir Uygulama

Çalışma, 2013 yılında Ankara Başkent OSB'sinde bulunan 4000 m²'lik kapalı alana sahip oluklu mukavva üretimi yapan fabrikada gerçekleştirilmiştir. Fabrika, gıda, tekstil, savunma, otomotiv gibi birçok sektöre hizmet vermektedir. İşletme haftanın altı günü tek vardiya olarak çalışmaktadır. Günlük çalışma saatleri ise on saat olup haftalık 3600 dakika üretim yapmaktadırlar. İşletmede üretim talebe göre yapılmaktadır. Fabrikada iki adet paralel makine olup aynı operasyonda kullanılmasına rağmen sahip oldukları farklılıklara göre özdeş değillerdir. Bu farklılıklar; üretim hızı, kapasite, işlem süreleri, işler arası hazırlık süreleri ve bazı teknik (boya haznesi adedi, bıçak ölçüleri) özellikleridir. Yapılacak olan çalışmada hazırlık süreleri dikkate alınarak sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemi incelenerek matematiksel model kurulmuştur. Kurulan bu model ILOG Cplex Optimization programı ile çözümlenerek işletme için iki haftalık üretim çizelgeleri oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonu ise en büyük tamamlanma zamanını (C_{max}) en aza indirmektir. Böylelikle elde edilen üretim çizelgesindeki işler minimum tamamlanma zamanı ulaşacak şekilde sıralanacaktır. Çalışmanın bu kısmında makinelere makine 1 ve makine 2 olarak adlandırılmıştır. Makine 1'in üretebileceği maksimum yarı mamul ölçüsü 2700 cm iken makine 2'de bu ölçü 2400 cm'dir. Aynı şekilde makine 1'de üç renk haznesi bulunurken, makine 2'de dört renk haznesi bulunmaktadır. Bu sebeple gelen siparişlerin ölçü ve renklerinin makinelere uygun olmaması durumunda o iş ilgili makinede sıraya alınamamaktadır. Makinelerin özelliklerini karşılaştırılması tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Makine Özellikleri

	Kesim	Baskı	Yapıştırma	Saatlik Üretim Miktarı (adet/saat)	Max Üreteceği Safya Boyu (mm)	Renk Haznesi Adet
Makine 1	Var	Var	Var	2000- 2500	2700	3
Makine 2	Var	Var	Var	5000- 6000	2400	4

Makinelerdeki hazırlık sürelerini etkileyen faktörler ise, ürün dalga (BC, EB, C, B, E) boyu değişimi, baskı rengi değişiminde boya haznesi yıkama süresi ve A Box ve özel kesim kutu değişimlerinde bıçak değişimi süresidir. İşletmeden alınan hazırlık süreleri bilgileri tablolarda verilmiştir.

Tablo 2. Dalga Geçişleri Arası Hazırlık Süresi

Makine 1	Dalga Geçişleri Arası Hazırlık Süreleri (dakika)					Makine 2	Dalga Geçişleri Arası Hazırlık Süreleri (dakika)				
	BC	EB	C	B	E		BC	EB	C	B	E
BC	0	15	20	23	27	BC	0	10	10	10	10
EB	15	0	12	20	25	EB	10	0	10	10	10
C	20	12	0	17	23	C	10	10	0	10	10
B	23	20	17	0	10	B	10	10	10	0	10
E	27	25	23	10	0	E	10	10	10	10	0

Tablo 3. Boya Haznesi Yıkama ve Bıçak Değişim Süreleri

Makine 1-2	Boya Haznesi Yıkama Süreleri (dakika)			Makine 1-2	Bıçak Değişim Süreleri (dakika)	
	Siyah	Ara Renk	Beyaz		Özel Kesim Kutu	A Box Kutu
Siyah	0	7	15	A Box Kutu	30	10
Ara Renk	5	0	10	Özel Kesim Kutu	30	30
Beyaz	4	8	0			

Uygulama çözümüne ulaşmak için fabrikadan 112 adet sipariş için sipariş ve ürün özellikleri (sipariş adeti, ürün ölçüleri, renk sayısı, dalga çeşidi, koli tipi) alınmıştır. Verilerin bir kısmı tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Sipariş ve Ürün Bilgisi

Sipariş No	En (cm)	Boy (cm)	Sip. Mik.	1. Makine İşlem Süresi (dk)	2. Makine İşlem Süresi (dk)	Renk Sayısı	Dalga Çeşidi	Baskı Rengi	Koli Tipi
1	650	820	30000	900	360	0	C	RENKSİZ	KESİMLİ
2	790	1200	1080	0	10.8	4	EB	SİYAH	A BOX
3	826	2210	1000	26.7	10.9	0	BC	RENKSİZ	A BOX
4	2460	1200	1000	26.7	0	0	C	RENKSİZ	A BOX
5	470	1400	1400	42	16.8	2	BC	ARA RENK	A BOX
6	470	1415	350	10.5	4.2	2	BC	ARA RENK	A BOX
7	850	2070	400	9.6	4	0	BC	RENKSİZ	A BOX
8	660	1510	1010	0	10.1	4	C	ARA RENK	A BOX
9	460	1270	2000	60	24	0	BC	RENKSİZ	A BOX
10	900	2730	420	12.6	0	1	BC	BEYAZ	A BOX
11	421	1190	5000	150	60	1	C	BEYAZ	A BOX
12	436	1250	1120	33.6	13.4	1	C	BEYAZ	A BOX
13	476	1130	1120	33.6	13.4	1	C	SİYAH	A BOX
14	451	1100	1250	37.5	15	1	C	SİYAH	A BOX
15	495	1450	1410	42.3	16.9	1	EB	ARA RENK	A BOX
16	428	557	350	10.5	4.2	0	C	RENKSİZ	KESİMLİ
...

İşletmeden alınan veriler kullanılarak her iki makine için işlerin işlem süreleri hesaplanmıştır. Aynı şekilde işletmeden alınan hazırlık süreleri ile birlikte de makineler için hazırlık süreleri matrisi oluşturulmuştur.

4.1. Matematiksel Model

Bu bölümde önerilen matematiksel model detaylı bir şekilde açıklanıp, ILOG Cplex Optimization programı ile çözülmüştür. Modelin amaç fonksiyonu en büyük tamamlanma zamanını (C_{max}) en küçükmektir.

Modele geçmeden önce sistemin özellikleri, varsayımları ve modelin parametreleri ve karar değişkenleri verilmiştir.

Sistem özellikleri;

- Makinelerin sayısı biliniyor, 2 adet makine mevcut.
- Makine hazırlık süreleri farklıdır, biliniyor.
- Makine hızları birbirinden farklıdır, biliniyor.
- Kapasiteleri farklıdır, biliniyor.
- İşlem süreleri farklıdır, biliniyor.
- Boya hazneleri sayısı farklıdır, biliniyor.
- Sıradaki işin başlaması için, ondan önceki işin mutlaka bitmesi gerekmektedir.

Varsayımlar;

- Makineler çizelgeleme başlamadan önce boş olduğu kabul ediliyor
- Her iş belirli operasyonlardan oluşmuştur. Aynı işin iki işlemi aynı anda işlenemez.
- Kesinti yoktur. Operasyon başladığı makinede bitecektir.
- Tüm işlerin işlem süreleri ve hazırlık süreleri belirlidir.
- Hazırlık süreleri işlem süresine dahil edilmemiştir.
- Erteleme yoktur. Her iş tamamlanmaya kadar işlenecektir.
- Makineler işsiz (boş) olabilir.
- Hiçbir makine birden fazla iş yapamaz.
- Makineler bozulmamaktadır.
- İş tarifleri önceden bilinmektedir.

Parametreler:

n: İş sayısı	$j=1,2,\dots,n$
m: Makine sayısı	$k=1,2$
V: Büyük sayı	
P_{jk} : j işinin k. makinede işlem süresi	$k=1,2 \quad j=1,2,\dots,n$
S_{kij} : k. makine i işinden sonra j işinin hazırlık süresi	$k=1,2 \quad j,i=1,2,\dots,n$

Karar Değişkenleri:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{k. makineye i işinden sonra j işi atanırsa} \\ 0 & \text{aksi durumda} \end{cases}$$

$$C_j: j \text{ işinin tamamlanma zamanı} \quad j=1,2,\dots,n$$

Amaç Fonksiyonu:

$$\min C_{max} \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ijk} = 1 \quad j=1,\dots,n \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0jk} = 1 \quad k=1,\dots,m \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ihk} - \sum_{j=0}^n x_{hjk} = 0 \quad (i, j \neq h) \quad k=1,\dots,m, h=1,\dots,n \quad (4)$$

$$C_j - [C_i + \sum_{k=1}^m x_{ijk}(S_{kij} + P_{jk}) + V(\sum_{k=1}^m x_{ijk} - 1)] \geq 0$$

$$i=0, \dots, n, j=1, \dots, n \quad (5)$$

$$C_0 = 0 \quad (6)$$

$$C_j \leq C_{max} \quad j=1, \dots, n \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,2,1} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,8,1} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,20,1} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,14,1} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,15,1} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,28,1} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,6,1} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{i,4,2} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{i,10,2} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{i,35,2} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{i,60,2} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (18)$$

Önerilen modelin amaç fonksiyonu (1) en büyük tamamlanma zamanını en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Kısıt (2), her işin yalnızca bir kez, bir makinede planlanmasını sağlamaktadır. İşlerin birden fazla sıraya alınmaması (3) numaralı kısıt ile gerçekleştirilmektedir. İşlemi bitmiş olan işten sonraki işin sıraya alınması, kısıt (4) ile yapılmaktadır. Kısıt (5) ile hazırlık zamanları da dikkate alınarak işin tamamlanma süresi hesaplanmaktadır. (6) kısıtı başlangıç değeri ataması için kullanılmıştır. (7) numaralı kısıt ise en büyük tamamlanma zamanının bir işin tamamlanma zamanından büyük olması gerektiğini göstermektedir. Baskı rengi, üç rengin üzerinde olan siparişlerin makine 1'de sıraya alınmaması gerektiğini (8) ve (14) numaralı kısıtlar arasında göstermektedir. Aynı şekilde ürün ölçüleri makine 2'ye uygun olmayan siparişlerin makine 1'de sıraya alan kısıtlar ise (15), (16), (17) ve (18) numaralı kısıtlardır.

Sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemi için oluşturulan model ILOG Cplex Optimization programı ile zaman sınırlı olarak iki saat çalıştırılmıştır. Çözüm sonucunda iki makine için iki haftalık üretim çizelgesi elde edilmiştir. Oluşturulan üretim çizelgeleri tablo 5 ve tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 5. Hafta 1 Üretim Çizelgesi

1. Hafta Makinelere Atanan İşler					
Sıra	Makine 1	Sıra	Makine 1	Sıra	Makine 2
1	26	12	7	1	23
2	28	13	11	2	22
3	29	14	13	3	1
4	25	15	15	4	17
5	21	16	12	5	8
6	9	17	10	6	2
7	6	18	18	7	27
8	19	19	3	8	24
9	4	20	16	9	20
10	5				
11	14				

Birinci hafta için model çözüm sonucunda amaç fonksiyonu (C_{max}) değeri 3082 olarak bulunmuştur. Elde edilen çizelgeye baktığımızda, baskı rengi dört renk olan siparişlerden 2, 8, 20 numaralı siparişlerin makine 2’de işleme alınmıştır. Yarı mamul ölçüsü makine 2’ye uygun olmayan siparişler (4, 10) ise makine 1’de işleme alınmıştır.

Tablo 6. Hafta 2 Üretim Çizelgesi

2. Hafta Makinelere Atanan İşler							
Sıra	Makine 1	Sıra	Makine 1	Sıra	Makine 2	Sıra	Makine 2
1	8	20	13	1	16	20	52
2	49	21	38	2	57	21	51
3	50	22	55	3	33	22	54
4	35	23	11	4	32	23	1
5	17	24	23	5	53	24	43
6	7	25	25	6	28	25	41
7	6	26	64	7	27	26	56
8	31	27	12	8	36		
9	37	28	47	9	9		
10	60	29	26	10	15		
11	18	30	21	11	58		
12	2	31	20	12	46		
13	22	32	63	13	34		
14	10	33	24	14	45		
15	48	34	29	15	59		
16	30	35	44	16	14		
17	19	36	40	17	4		
18	5	37	39	18	3		
19	62	38	42	19	61		

İkinci hafta için elde edilen çizelgeye baktığımızda, 14, 15, 28 ve 61 numaralı siparişlerin makine 2’de, 35 ve 60 numaralı siparişlerin ise makine 1’de sıraya alındığını görmekteyiz. En büyük tamamlanma zamanı minimize etmeyi hedeflediğimiz çizelgede amaç fonksiyon değeri ise 3768 olarak bulunmuştur.

5. Sonuç

Üretim ortamlarının hızlı cevap verebilme, verimlilik artışı, kapasite artışı gibi konularda kendilerini geliştirmek istemeleri ile çizelgeleme konularına talep artmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalara baktığımızda özdeş olmayan paralel makine ve sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelge problemleri ile ilgili teorik ve uygulamalı çalışmalar bulunmaktadır.

Yapılan bu çalışmanın uygulamalı olması aynı sektörde çalışan diğer işletmelere de yön vereceği düşünülmektedir. Bu çalışma oluklu mukavva üretimi yapan firmada gerçekleştirilmiştir. İşletme bünyesinde iki adet özdeş olmayan paralel makine bulunmaktadır. Firma haftanın altı günü günlük on saat çalışmaktadır. Makineye gelen işlerin sıra bağımlı hazırlık süreleri dikkate alınarak makinelere uygun iki haftalık üretim çizelgeleri elde edilmiştir. Problemin amaç fonksiyonu en büyük tamamlanma zamanının (C_{max}) en küçüklenmesidir.

Böyle bir çalışmanın yapılması için işletmeler bünyelerinde bulunan makineler, işler, sistem özellikleri vb. hakkında bilgi sahibi olmalıdırlar. Makineler özellikleri bakımından incelendiğinde, aynı operasyonlarda kullanılabilir ama hızları, kapasiteleri, işlem süreleri, hazırlık süreleri vb. farklı olmalıdır. Veri toplama kısmında ise işletmeden, ürün bilgileri, işler arası hazırlık sürelerini etkileyen faktörler ve süreleri, sipariş adetleri, saatlik üretim miktarı alınmalıdır. Alınan sipariş adetleri ve üretim miktarları kullanılarak işlerin işlem süreleri hesaplanmalıdır. Hazırlık süreleri için ise ürün geçişlerinde makinelere uygulanan hazırlıklar belirlenerek, süreleri hesaplanmalı ve matris oluşturulmalıdır. Bütün bu hesaplamalar ve veriler sonucunda çözüme gidilecek matematiksel model kurulmalıdır. Çalışmada oluşturulan model, bir paket programı kullanılarak çözüm sonucuna ulaşılabilmektedir. Problemin yapısının daha büyük olması durumunda sezgisel yöntemlere başvurulması gerekmektedir.

Sıra bağımlı hazırlık süreli paralel makine çizelgeleme probleminin çözümleri için farklı yöntemler (genetik algoritma, tabu arama, sezgisel yöntemler vb.) kullanılmaktadır. Sanayi sektöründe sıkça rastlanılabilecek bir problemdir.

Bundan sonra yapılacak olan çalışmalarda, problemin kısıtları, amaçları, parametreleri ve çözüm yöntemleri gibi değerleri değiştirilerek problem tekrar ele alınabilir ve karşılaştırılabilir.

Referanslar

- Arnaout, J. P., Rabadi, G., & Musa, R. (2010). A Two-Stage Ant Colony Optimization Algorithm To Minimize The Makespan On Unrelated Parallel Machines With Sequence-Dependent Setup Times. *Journal Of Intelligent Manufacturing*, 21(6), 693-701.
- Bank, J., & Werner, F. (2001). Heuristic Algorithms For Unrelated Parallel Machine Scheduling With A Common Due Date, Release Dates, And Linear Earliness And Tardiness Penalties. *Mathematical And Computer Modelling*, 33(4-5), 363-383.
- Chen, J. F. (2009). Scheduling On Unrelated Parallel Machines With Sequence-And Machine-Dependent Setup Times And Due-Date Constraints. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 44(11), 1204-1212.
- French, S. (1982). *Sequencing And Scheduling: An Introduction To The Mathematics Of The Job-Shop*. New York: Ellis Horwood Series.
- Furugi, A. (2021). Makine Uygunluk Kısıtlaması ve Sıra Bağımlı Kurulum Süresi İle Özdeş Olmayan Paralel Makine Çizelgeleme Problemi İçin Tabu Arama Algoritması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(3), 1539-1550.
- Herr, O., & Goel, A. (2016). Minimising Total Tardiness For A Single Machine Scheduling Problem With Family Setups And Resource Constraints. *European Journal Of Operational Research*, 248(1), 123-135.
- Hulett, M., Damodaran, P., & Amouie, M. (2017). Scheduling Non-Identical Parallel Batch Processing Machines To Minimize Total Weighted Tardiness Using Particle Swarm Optimization. *Computers & Industrial Engineering*, 113, 425-436.
- Kyparisis, G. J., & Koulamas, C. (2006). Flexible Flow Shop Scheduling With Uniform Parallel Machines. *European Journal Of Operational Research*, 168(3), 985-997.
- Lee, S. M., & Asllani, A. A. (2004). Job Scheduling With Dual Criteria And Sequence-Dependent Setups: Mathematical Versus Genetic Programming. *Omega*, 32(2), 145-153.
- Liao, T. W., Chang, P. C., Kuo, R. J., & Liao, C. J. (2014). A Comparison Of Five Hybrid Metaheuristic Algorithms For Unrelated Parallel-Machine Scheduling And Inbound Trucks Sequencing In Multi-Door Cross Docking Systems. *Applied Soft Computing*, 21, 180-193.
- Liaw, C. F., Lin, Y. K., Cheng, C. Y., & Chen, M. (2003). Scheduling Unrelated Parallel Machines To Minimize Total Weighted Tardiness. *Computers & Operations Research*, 30(12), 1777-1789.
- Perez-Gonzalez, P., Fernandez-Viagas, V., García, M. Z., & Framinan, J. M. (2019). Constructive Heuristics For The Unrelated Parallel Machines Scheduling Problem With Machine Eligibility And Setup Times. *Computers & Industrial Engineering*, 131, 131-145.
- Pinedo, M. L. (2008). *Scheduling: theory, algorithms, and systems*. Springer
- Rocha, P. L., Ravetti, M. G., Mateus, G. R., & Pardalos, P. M. (2008). Exact Algorithms For A Scheduling Problem With Unrelated Parallel Machines And Sequence And Machine-Dependent Setup Times. *Computers & Operations Research*, 35(4), 1250-1264.
- Sarıççek, İ. (2018). Özdeş Olmayan Paralel Makina Çizelgeleme Problemlerinin Çözümü İçin Bir Karar Destek Sistemi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), 108-116.
- Silva, C., & Magalhaes, J. M. (2006). Heuristic Lot Size Scheduling On Unrelated Parallel Machines With Applications In The Textile Industry. *Computers & Industrial Engineering*, 50(1-2), 76-89.
- Tran, T. T., Araujo, A., & Beck, J. C. (2016). Decomposition Methods For The Parallel Machine Scheduling Problem With Setups. *Inform Journal On Computing*, 28(1), 83-95.

Turkcan, A., Akturk, M. S., & Storer, R. H. (2003). Non-Identical Parallel Cnc Machine Scheduling. *International Journal Of Production Research*, 41(10), 2143-2168.

Vallada, E., & Ruiz, R. (2011). A Genetic Algorithm For The Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem With Sequence Dependent Setup Times. *European Journal Of Operational Research*, 211(3), 612-622.

Weng, M. X., Lu, J., & Ren, H. (2001). Unrelated Parallel Machine Scheduling With Setup Consideration And A Total Weighted Completion Time Objective. *International Journal Of Production Economics*, 70(3), 215-226.



TBL-MAC: Doğrusal Kablosuz Algılayıcı Ağlar için Yeni Bir Ortam Erişim Kontrol Protokolü

TBL-MAC: A New Media Access Control Protocol Design for Linear Wireless Sensor Networks

Musa Çibuk^{*1}, Davut Arı¹, Fikri Ağgün², Ümit Budak³

¹Bitlis Eren Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği, 13100 Bitlis, TÜRKİYE

²Bitlis Eren Üniversitesi Adilceva Meslek Yüksekokulu Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, 13100 Bitlis, TÜRKİYE

³Bitlis Eren Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Elektrik - Elektronik Mühendisliği, 13100 Bitlis, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 24/01/2022

Kabul / Accepted: 23/03/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Kablosuz Algılayıcı Ağların özel bir türü olarak literatürde yerini almış olan Doğrusal Kablosuz Algılayıcı Ağlar (DKAA)'da ağ yapısında düğümler sıralı olarak dizilmekte ve iletişim ortamı doğrusal düzende oluşturulmaktadır. Bu tür uygulamalar için geliştirilmiş Ortam Erişim Kontrol (OEK) protokollerinin doğrusal dizilim karakteristiğine uygun olarak tasarlanması önem arz etmektedir. Çünkü ağdaki düğüm sayısı arttıkça paketlerin uçtan uca gecikmesi ve koordinatör düğüme yakın olan düğümlerin veri trafiği çok yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Ayrıca artan düğüm sayısı, çarpışma ve sıkışıklık ihtimalini de artırmaktadır. Tüm bu sebeplerden dolayı doğrusal topolojiler için geliştirilen protokollerin gecikme duyarlı, sorunsuz bağlanabilen ve hatasız veri iletimi yapan karakteristiklere sahip olması beklenmektedir.

Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen DKAA problemlerini minimuma indirmek üzere etkili ve zor fiziksel şartlarda ağın bağlantı sürekliliğinin üstesinden gelen çevik bir OEK protokolü olan TBL-MAC geliştirilmiştir. Bu çalışma ile Doğrusal Ağ haberleşmesine katkı sunacak birçok yeniliğin literatüre kazandırılması hedeflenmiş, protokolün benzetimi yapılarak önerilerin geçerliliği test edilmiştir. Yapılan benzetim sonuçlarına göre TBL-MAC protokolünün içerdiği yöntemlerin kabul göreceği ve çalışmanın araştırmacılara yeni bakış açıları kazandıracağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler

KAA, DKAA, OEK Protokolü, Doğrusal Topoloji, Negatif Adresleme

Abstract

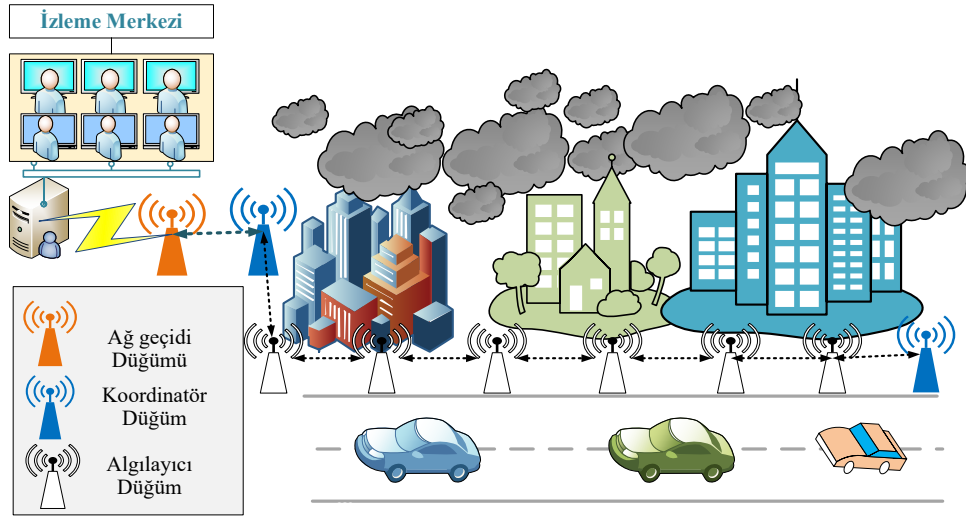
In Linear Wireless Sensor Networks (LWSNs), which has taken its place in the literature as a special type of Wireless Sensor Networks, the nodes are arranged in a sequential manner in the network structure and the communication environment is created in a linear order. It is important that the Media Access Control (MAC) protocols to be developed for such applications are designed in accordance with the linear sequence characteristics. Because as the number of nodes in the network increases, the end-to-end delay of the packets and the data traffic of the nodes close to the coordinator node reach very high levels. In addition, increasing the number of nodes increases the probability of collision and congestion. For all these reasons, protocols developed for linear topologies are expected to have characteristics that are delay sensitive, can be connected seamlessly, and transmit data to the sink without error. In this study, TBL-MAC, an agile MAC protocol that effectively overcomes the connection continuity of the network in difficult physical conditions, has been developed in order to minimize the above-mentioned LWSN problems. With this study, it was aimed to bring many innovations that will contribute to Linear Network communication to the literature, and the validity of the suggestions was tested by simulating the protocol. According to the simulation results, it is thought that the methods included in the TBL-MAC protocol will be accepted and the study will bring new perspectives to the researchers.

Key Words

WSN, LWSN, MAC Protocol, Linear Topology, Negative Addressing

1. Giriş

Günümüzde elektronik teknolojilerindeki gelişmeler ucuz maliyetli, işlem kapasitesi yüksek, düşük boyutlu algılayıcı düğümler (AD) üretilmesini mümkün kılmaktadır. Bu önemli gelişmeler neticesinde çok fazla algılayıcı düğümden oluşabilen Kablosuz Algılayıcı Ağ (KAA) uygulamalarının kolaylıkla gerçekleştirilmesine olanak tanıyan imkânlar ortaya çıkmıştır. Bu süreçte KAA'ların uygulama alanları artmış, uygulama biçimine özgü geliştirilmiş birçok KAA türü ortaya çıkmıştır. Doğrusal KAA (DKAA) Şekil 1'de görüldüğü üzere doğrusal topoloji karakteristiği gerektiren KAA uygulamaları için özelleşmiş bir türdür. Doğrusal dizilim özelliği sayesinde kurulum, bakım, yönlendirme gibi işlemler çok kolaydır. Fakat bu tip ağlarda uçtan uca gecikme, uç düğümlerdeki aşırı veri trafiği, ağ güvenilirliği, düğüm başarısızlığı ve bağlantı hatası(Chen, Tse, & Feng, 2009) gibi çözülmesi gereken zorluklar mevcuttur. Bu tür ağların doğrusal yapısı; güvenilir, verimli, enerji tasarrufu daha yüksek ve ağ ömrü daha uzun özel protokoller tasarlamak için önemli bir motivasyon kaynağı olabilmektedir.(Jawhar & Mohamed, 2009; Varshney, Kumar, & Swaroop, 2015).



Şekil 1. Örnek bir DKAA yapısı

Günümüzdeki teknolojik gelişmeler sayesinde AD'ler, kendi kendini organize edebilir yeteneğe sahip olmakla birlikte sınırlı veri işleme yeteneğine sahiptir. AD'ler sahadaki diğer düğümler ile koordine edildiklerinde, diğer düğümlerden gelen bilgiler ile belirli bir fiziksel ortamı çok ayrıntılı olarak ölçme ve gözleme yeteneğine sahip olabilirler. Bu nedenle KAA, belirli bir eylemi gerçekleştirmek için koordine olan algılayıcı düğümler topluluğu olarak tanımlanabilir. Geleneksel ağlardan farklı olarak, algılayıcı ağlar, yoğun dağıtım ve koordinasyon üzerine çalışırlar. Bu benzersiz özellikleri, KAA'ları geleneksel ağlara göre avantajlı kılar. Algılayıcı ağ uygulamaları öncelikle askeri uygulamalar için kullanılmış olup, savaş, terörle mücadele, düşman faaliyetlerinin tespiti ve gözetimi durumlarında geleneksel ağlara göre birçok avantaj barındırdığı görülmüştür(Jawhar & Mohamed, 2009).

DKAA'lar, boru hattı (Lai, Chen, Li, Huang, & Chu, 2012; Saeed, Ali, Rashid, Qaisar, & Felemban, 2014) maden tünelleri izleme (Jiang, Wu, Chen, Chen, & Leung, 2009), trafik izleme ve yol güvenliği (Low & Talampas, 2017) vb. birçok uygulamada kullanılmıştır (Jawhar & Mohamed, 2009). DKAA'larda, AD'ler doğrusal olarak bir hat boyunca dizilim göstermektedir. Bu tür ağlarda kalite ve güvenilirlik ön plandadır (Jawhar & Mohamed, 2009; Martin & Paterson, 2009).

Ağ kurulumu, yönlendirme işlemleri gibi çoğu KAA türü için zor süreçler, DKAA'larda çok kolaydır. Araştırmacılar köprüler, otoyollar, boru hatları vb. yapıların durumlarını izlerken diğer ağ problemlerine daha çok zaman ayırarak sayıları hızla artan çözümler sunmaktadırlar(Fang, Liu, & Qian, 2011; Karveli, Voulgaris, Ghavami, & Aghvami, 2009). Geleceğin akıllı yollarının ve şehirlerinin inşasında bu habitat içerisindeki unsurların birbirleri ile etkili ve verimli haberleşmesi büyük önem arz etmektedir. Bu da bizi bu unsurlar arasındaki haberleşme protokollerinin ne kadar verimli ve etkili olacağını sorgulamaya yönlendirmektedir. Akıllı sistemlerdeki bu her bir unsuru bir AD olarak düşünürsek bunlara arasındaki etkili ve verimli bilgi akışının sağlanması aslında resmin bütününde sistemin başarımı anlamına gelecektir. Tüm bu gelişmeler değerlendirildiğinde önerilen çalışmanın literatür açısından önemli bir yere sahip olacağı düşünülmektedir.

2. İlgili Çalışmalar

Karveli ve ark. Directional Scheduled MAC (DiS-MAC) (Karveli et al., 2009) olarak adlandırdıkları çalışmalarında; doğrusal bir hat üzerinde dağıtılmış ve birbirleriyle senkronize çalışan AD'ler arasında çarpışmasız iletişimi garanti eden bir protokol önermişlerdir. Yönlü antenlerin kullanımı sayesinde; daha yüksek kazançlar elde edilmiş, düğümler arası daha uzak mesafelere sinyal iletimi sağlanmış ve radyo dalgalarının belirli bir doğrultuda iletimi sonucu gürültü ve çarpışmalar ortadan kaldırılmıştır. DiS-MAC'taki, her bir düğüm bir alıcı-vericiye, yüksek kazanç değerine sahip bir yön antenine ve ters yönde daha düşük bir geri dönüş lobuna sahiptir. DiS-MAC'te veri iletimi ve diğer işlemler için tek bir kanal kullanılmaktadır.

Çekişmeye dayalı protokollerle karşılaştırıldığında, DiSMAC, RTS/CTS paketlerini kullanmaz ve kontrol paketinin yükünü de ortadan kaldırır. Ayrıca yönlü antenlerin kullanımı sayesinde çarpışmalar ve gizli terminal sorunları giderilmiş olur. Protokolün ana odağı, gecikmeden ziyade verimdir. Üç farklı senaryo altında benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir: Sonuçlar, protokolün, düğümler arasında sabit ve güvenilir bağlantılar sağladığını göstermektedir. Ancak, daha büyük yükler daha fazla hataya ve sistem performansının düşmesine neden olmaktadır. Yazarlar böyle durumlarda kanal kodlama ve veri parçalama tekniklerinin DiS-MAC ile birlikte kullanılabileceğini önermektedir. Öte yandan önerilen protokolle düğümler arasındaki eş zamanlamanın bozulması durumunda tüm ağın çökerek veri iletişiminin durması kaçınılmaz bir durumdur.

LC-MAC (Long-chain MAC) (Fang et al., 2011) protokolünde Fang ve ark., enerji verimliliğinden ödün vermeden uzun zincirli bir algılayıcı ağda uçtan uca teslimat gecikmesini azaltmak için röle düğümleri için önceden rezervasyon yapan ve bunu bir patlama şeklinde ileten bir mekanizmayı önermişlerdir. Bu mekanizma üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada başlatma(initialization) olarak nitelendirilebilecek olan konum algılama aşamasıdır. Bu aşamada röle düğümleri çevrelerindeki komşu röle düğümlerini algılar. Bu kuraldan hareketle; yalnızca bir komşu röle düğümüne sahip olan röle düğümü kendisini zincirin uç noktası olarak ayarlayacaktır.

MFT-MAC (Lee, Jwa, & Kim, 2013) adlı çalışmalarında Lee ve ark. senkronize bir yaklaşım kullanarak çekişmeye dayalı görev döngüsü olan bir MAC protokolü önermişlerdir. Tek bir döngüde SYNC, DATA ve SLEEP olmak üzere üç periyot kullanır. Enerji verimliliğini arttırmak ve uçtan uca gecikmeyi azaltmak için bir sonraki düğüme iletilecek DATA çerçevelerinin sayısını dikkate alan PION adında bir kontrol çerçevesi kullanır. MFT-MAC, uçtan uca gecikmeden ödün vermeden enerji tüketimini azaltmak için birden fazla veri çerçevesini tekli görev döngüsünde iletir. PION çerçevesi kontrol amaçlıdır ve RTS/CTS mekanizmasına benzer. Bu yolla gizli terminal problemi çözülmeye çalışılır. PION, tüm RTS/CTS alanlarını ve nihai hedef adresini, atlama sayısını ve çoklu karelerin sayısını içerir. SLEEP periyodunda, düğümler çoklu veri çerçevelerini almak için belirli bir zaman diliminde uyanırlar ve daha sonra kendi veri çerçevelerini bir önceki düğümden aldıkları çerçevelerine ekleyerek tekrar uykuya dönerler. Yazarlar, MFT-MAC'ı adaptif bir görev döngüsü kullanan DW-MAC (Y. Sun, Du, Gurewitz, & Johnson, 2008) ve RMAC (Du, Saha, & Johnson, 2007) protokolleri ile karşılaştırmıştır. Sonuçlar, MFT-MAC'ın ortalama güç tüketimi, ortalama uçtan-uca gecikme ve verim bakımından DW-MAC ve RMAC'a üstün olduğunu göstermektedir.

Sun ve ark. CMAC-T (T. Sun, Yan, & Yan, 2013) adını verdikleri çalışmalarında; belirteçlere(tokens) dayanan bir zincir (chain) tipi ortam erişim kontrol protokolü geliştirmişlerdir. Mahsulün büyüyen ortamını izlemek için tasarlanmış ve uygulanmıştır. İşaret (beacon) ve veri çerçevesi olmak üzere iki tip çerçeve kullanılmaktadır. İşaret çerçevesi, komşu düğümler arasındaki senkronizasyon ve kanal izinin atanmasında kullanılır. CMAC-T'de senkronizasyon işlemi için sink düğümü periyodik olarak belirli sayıda işaret çerçevesi gönderir. Ağdaki bir düğüm uyku modundan çıktıktan sonra sink düğümün gönderdiği işaret çerçevelerinden birini almaya çalışır. Eğer alırsa, senkronizasyonu bitirir ve daha sonra komşu düğüme verisini iletir. Aksi halde, düğüm uyku modunda kalmaya devam eder. Bu sayede ağ, veri aktarımında veri çarpışmasından kaçınmakla kalmaz, aynı zamanda güç tüketimini de azaltır. Yazarlar CMAC-T'nin bir serada uygulandığını ve yüksek güvenilirlik ve düşük güç tüketimi gereksinimlerini karşıladığını belirtmektedirler.

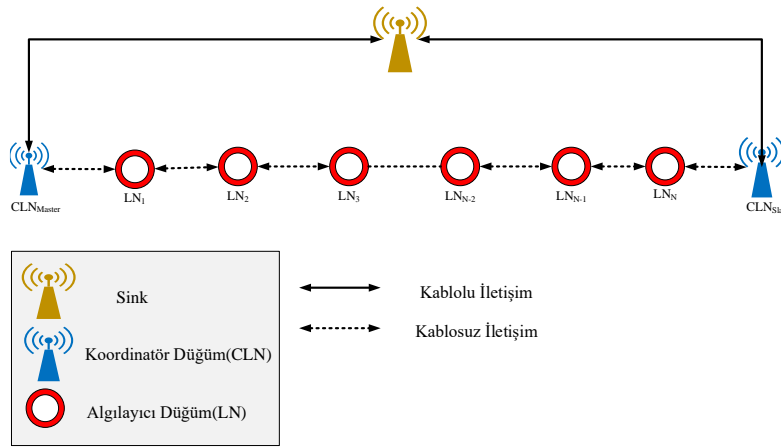
WiWi (Caneva, 2010) adlı çalışmada Caneva ve Montessoro; bağımsız düğümler zinciri boyunca senkronize çoklu sekmeli iletme dayanan çekişmesiz bir MAC protokolü önermişlerdir. Düğümler doğrusal veya eğrisel bir şerit oluşturacak şekilde dizilirler. WiWi temelde bazı özellikler bakımından DiS-MAC (Karveli et al., 2009)'e benzemekle beraber DiS-MAC'ın gelişmiş bir halidir denilebilir. Özellikle her iki protokol, komşu düğümler arasında sıralamaya dayalı alternatif iletim kullanarak eşzamanlı iletimler arasındaki girişimleri önlemektedir. Bir paketin alınması ve iletilmesi arasında, çarpışma olmaması için düğümün 4 zaman dilimi beklemesi gerekmektedir.

DKAA'lar her geçen gün popülerliğini artırarak devam etmektedir. Düşük özellikteki sınırlı kaynaklara sahip olan algılayıcı düğümlerin kaynakları verimli kullanmasına etki eden en önemli faktörler arasında iyi tasarlanmış OEK protokolleri önemli bir yere sahiptir. Katmanlı bir KAA mimarisinde OEK katmanı; gecikmelerin azaltılmaya çalışıldığı, paket kayıplarını azaltmak için olası çarpışmaların engellendiği ve minimum paket trafiği ile enerji verimliliğinin artırılmaya çalışıldığı katmandır. Çünkü düğümlerin haberleşmeyi sağlayan radyo ünitesi bu katman tarafından kontrol edilmektedir. Algılayıcı düğümlerde radyo arabirimi enerji tüketiminin en fazla olduğu birimdir. Sınırlı enerji kaynağına sahip olan AD'ler için enerji tasarrufu ağ ömrü açısından çok önemlidir. Tüm bu sebeplerle OEK katmanı için iyi tasarlanan protokoller KAA uygulamalarının enerji performansı ve diğer ağ performansları açısından önemli bir yere sahiptir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen TBL-MAC protokolü; özellikle şehir içi ve şehirlerarası karayollarındaki yol kenarı aydınlatmalarında kontrol ve enerji tasarrufu konuları dikkate alınarak tasarlanmıştır. Etkin ve verimli bir OEK tasarımı için literatürdeki benzerlerinden farklı olarak paket tekrarları ve özellikle de yankılanma sorunlarına karşı yeni ve etkin bir yöntem olan Negatif Adresleme yaklaşımı geliştirmiş olup bu yaklaşımın etkinliği benzetim sonuçlarında da açıkça gözlemlenmiştir. Ayrıca enerji verimliliği ve ağdaki kötü durum senaryolarının üstesinden gelebilmek için farklı çalışma modları (ToSlave, ToMaster ve 2Way) ortaya konulmuştur. Geliştirilen protokolde LC-MAC (Fang et al., 2011)'teki LDP'ye benzer bir yaklaşımla topoloji ve düğüm konumlandırma yapılmaktadır. Ayrıca paket iletiminde DiS-MAC (Karveli et al., 2009) ve WiWi (Caneva, 2010)'deki çalışmalara benzer olarak sıralamaya dayalı bir iletim mantığını benimsemiştir. Dolayısı ile önerilen OEK protokolünde çekişmesiz bir yaklaşım oluşturulmuştur. Ayrıca Negatif Adresleme yaklaşımı sayesinde gönderilen paketlerin hedefine iletilmesi garanti edilmekte olup bunun için ekstra bir onay veya paket kullanılmamaktadır. Bu da enerji verimliliği ve ağdaki trafiğin azaltılması konularında önemli bir rol üstlenmektedir. Bu yönleriyle, geliştirilen OEK protokolümüzün literatüre etkin bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

3. TBL-MAC Protokolü İşlem Döngüsü

Geliştirilen TBL-MAC OEK protokolü için önerilen topolojik yapı Şekil 2'de detaylı olarak gösterilmektedir. Temel olarak yol kenarı aydınlatma birimlerinin üzerinde çalışan düğümler ve bunların kendi aralarında haberleşerek bilgi aktarımı yaptıkları bir ortam düşünülmüştür.



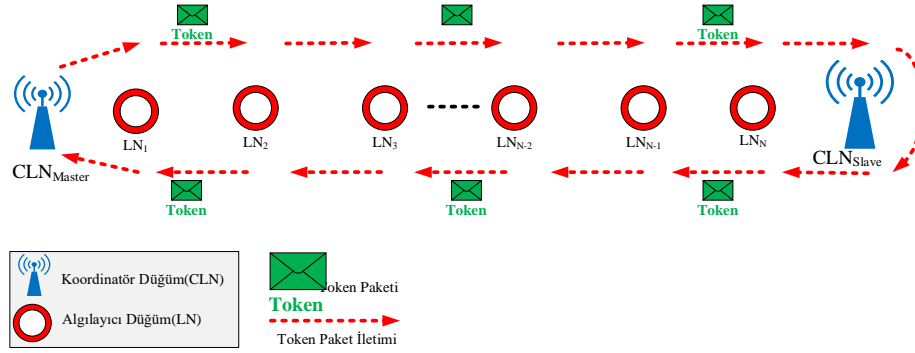
Şekil 2. Protokol örnek topolojik yapısı

Bu yapıda Algılayıcı Düğüm (Lightning Node - LN), Koordinatör Düğüm (Coordinator Lightning Node - CLN) ve SINK Düğüm olmak üzere 3 ağ elemanı mevcuttur. Çalışmada ağda bulunan LN'lerin bir sıra halinde uygulama alanına dizilmesi ve bunların CLN'ler ile haberleşerek SINK düğüme verilerini aktarabilecekleri bir protokol tasarlanmıştır.

CLN'nin donanım ve yazılım kabiliyeti diğer tüm düğümlere göre daha gelişmiştir. Algılama görevinin yanı sıra, **token** adı verilen konum algılama paketleri üretmek ağda iletişim hattı kurulumu ve veri paketlerin toplama işleminin başlatılmasından sorumludur. Benzer çalışmalardan farklı olarak topolojik yapı gereği ağda 2 adet CLN düğüm olmak zorundadır. Bu düğümler token ve veri paketlerini karşılıklı geri yansıtma veya SINK düğüme göndermekle görevlidirler. CLN'lerden biri Master diğeri ise Slave durumunda çalışır. Her zaman ağı harekete geçiren ve lineer yapının başı konumunda olan düğüm Master CLN'dir. Slave CLN daha çok gelen paketlerin yön değişikliğini veya SINK'e iletilmesini gerçekleştirir ve lineer yapının son düğümü konumundadır.

LN'ler algılama görevleri yaparak sahadan veri toplar ve ayrıca veri iletişimi için röle görevi de icra ederler. Bir LN temel olarak herhangi bir paketin başlangıç noktası değildir. LN sadece kendisine gelen token veya veri paketlerine kendi bilgilerini ekleyerek bir sonraki düğüme iletmekle sorumludur.

SINK düğümü tüm verilerin toplandığı uç düğüm ağ elemanı olarak çalışmaktadır. Genel olarak ağda CLN veya LN'ler gibi aktif bir rol oynamazlar.



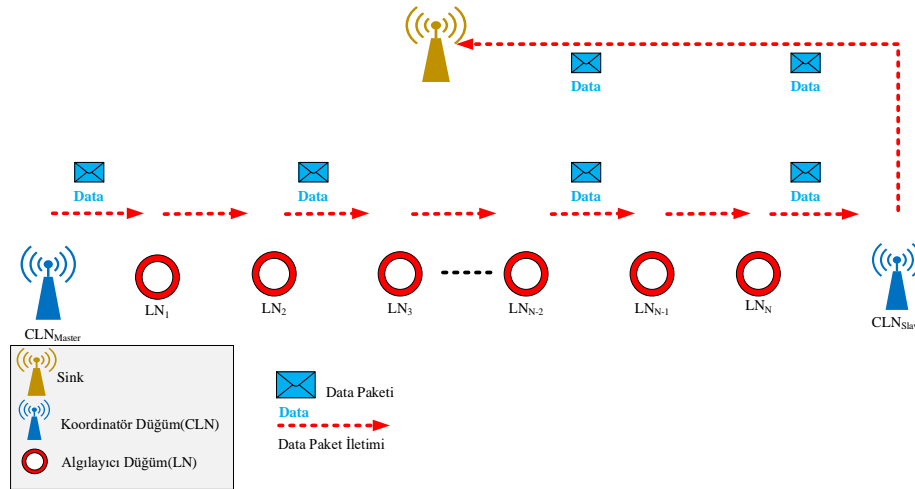
Şekil 3. Token paketi döngüsü

TBL-MAC Ağ Başlatma Mekanizması şöyledir: Ağ ilk çalıştığında master CLN boş bir token paketi oluşturarak ileri yönlü olarak gönderir. İlk gönderen (master) CLN ağı başlatan CLN olur ve gönderdiği token paketinin kendisine geri dönmesini beklemeye başlar. Token paketi hatasız bir şekilde master CLN'ye ulaştığında iletişim hattı kurulmuş ve bu hattın veri gönderimi için uygun olduğu kesinleşmiş olur. Ayrıca gelen token içerisinde ağdaki diğer düğümlerin bilgileri olduğu için Master CLN ağın topolojisini de elde etmiş olur. Bir CLN'nin Master ya da Slave olma durumu TBL-MAC protokolünün çalışma moduna göre dinamik olarak değişebilir. TBL-MAC protokolünde token paketi iletimi sırasında paketi alan her LN kendi kimlik (id), tip ve atlama bilgisini ekleyip sonraki düğüme iletmektedir. Ağın kurulumu token paketinin ağda dolaşımını bitirmesi ile tamamlanmaktadır.

Protokolde veri haberleşmesi ve veri paket iletim yönüne göre üç farklı iletişim metodu gerçekleştirilmiştir. Tüm senaryolarda ağın kurulduktan sonra veri haberleşmesi aşamasına geçilmektedir. Veri ve token paketlerinin iletilme biçimleri kullanılan iletim metoduna göre yer yer değişiklik göstermektedir. Farklı metotların geliştirilmesindeki amaç olası farklı kötü durum senaryolarına ve verimlilik açısından ortama en uygun yaklaşımın kullanılmasıdır. Bu çalışmada geliştirilen paket iletim metotları aşağıdaki gibidir;

3.1. "ToSlave" Paket iletim metodu

Bu iletim metodu sadece Slave CLN'nin SINK düğüme bağlantısının olduğu durumlar için geliştirilmiştir. Şekil 4'ten de görüleceği üzere veri paketi master CLN'den slave CLN'ye doğru LN'ler üzerinden aktarılarak iletilir.

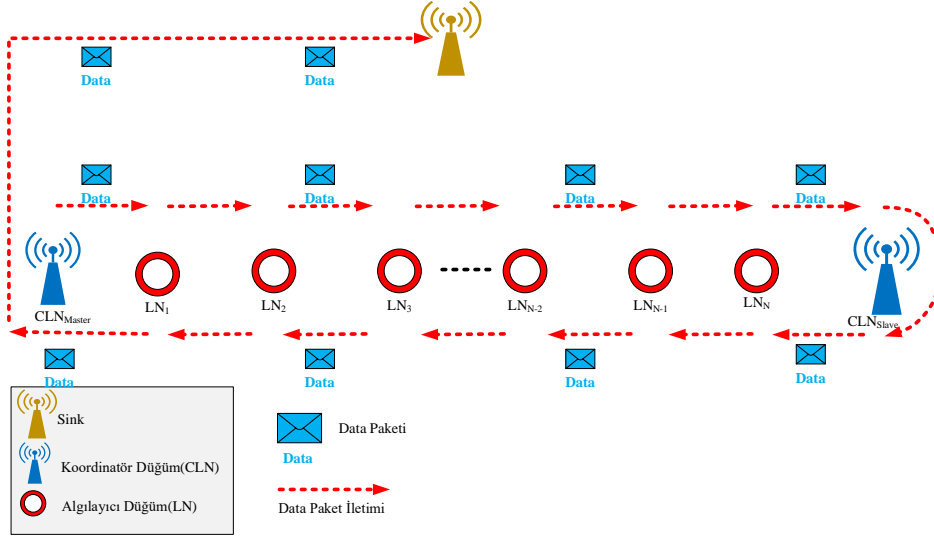


Şekil 4. ToSlave iletişim metodu

Slave CLN kendisine gelen veri paketini varsa kendi verisini de ekleyerek direkt olarak SINK düğüme iletir ve bu şekilde veri iletim süreci tamamlanır. ToSlave metodunda veri aktarımı daima tek yönlüdür. ToSlave metodu deterministik bir yaklaşımı benimsemektedir. Verinin tek yönlü akması geri dönüş gerektirmemesi sayesinde daha az paket trafiği oluşmaktadır. Öte yandan SINK düğüme doğru ilerledikçe veri paketlerinin büyümesi dolayısıyla SINK düğüme yakın düğümlerde daha çok enerji harcanması kaçınılmazdır. Enerji harcaması deneysel sonuçlarına ilerleyen bölümlerde değinilmiştir.

3.2. “ToMaster” Paket iletim metodu

Bu iletim metodu sadece master CLN'nin SINK düğümüne bağlantısının olduğu durumlar için geliştirilmiştir. Şekil 5'te ToMaster metodu için veri akışının nasıl olduğu gösterilmiştir.

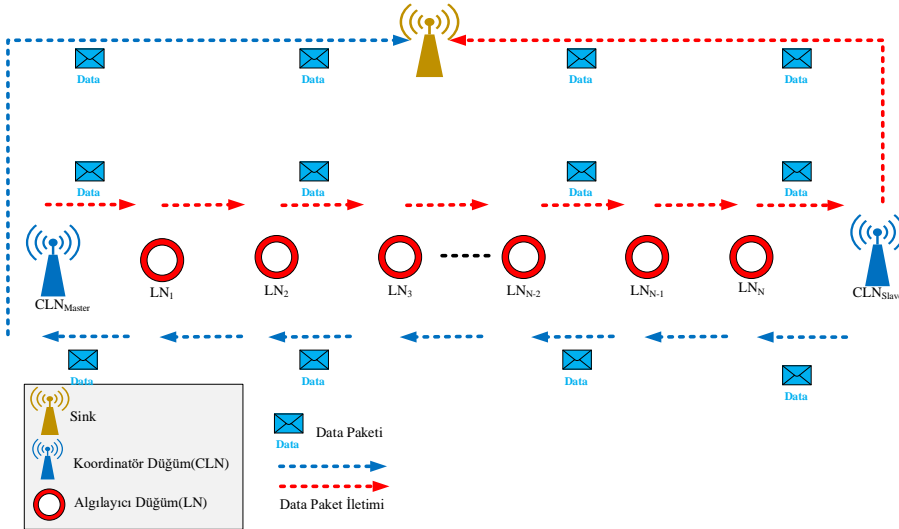


Şekil 5. ToMaster iletişim metodu

Görülebileceği üzere veri paketi master CLN'den slave CLN'ye doğru LN'ler üzerinden aktarılarak iletilir ve nihai durumda paketi alan slave CLN paketin yön bilgisini değiştirerek ve varsa kendi verisini pakete ekleyerek, paketi kendisine gönderen LN düğümüne geri gönderir. Paketi alan LN de ters yönlü olarak varsa kendi güncel verisini de ekleyerek bir sonraki LN'ye aktarır. Süreç, paket tekrar master CLN'ye ulaşmaya kadar devam eder ve master CLN kendisine ulaşan veri paketine varsa kendi verisini de tekrar ekleyerek direkt olarak SINK düğümüne iletir ve bu şekilde veri iletim süreci tamamlanır. ToMaster metodunda veri aktarımı çift yönlüdür. Burada slave CLN yön değiştirme (yansıtma) işleminde rol alır. Burada paket içerisinde yön bilgisi önemli rol oynar. Verinin çift yönlü akması sayesinde ToSlave metodundan farklı olarak düğümler arası enerji harcama durumu daha dengeli olmaktadır. Ancak veri paketleri için hat uzunluğu teknik olarak 2 kat uzayacağından veri paketi boyutları ToSlave metoduna göre daha büyük olacaktır. Tüm senaryoların enerji harcaması deneysel sonuçları ileride incelenmektedir.

3.3. “2Way” Paket iletim metodu

Bu iletişim metodunda veri aktarımı çift yönlü olarak gerçekleştirilir. Şekil 6'da 2Way metodu için veri akışının nasıl olduğu gösterilmiştir.



Şekil 6. 2Way iletişim metodu

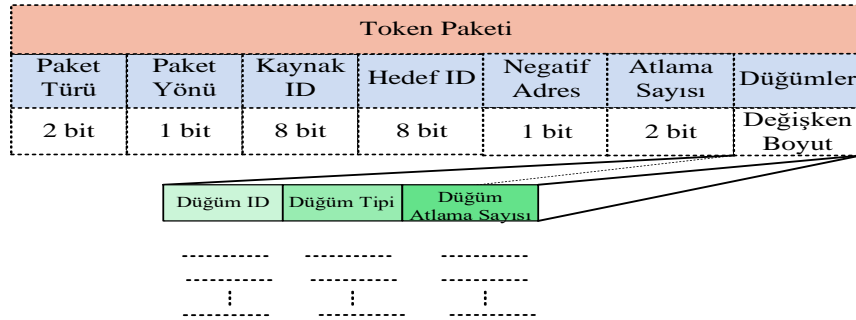
Diğer metotlardan farklı olarak Master ve Slave CLN düğümlerinin ikisi de veri paketi oluşturarak zıt yönlü iletilir. İletişim yine diğer yöntemlerde olduğu gibi master CLN tarafından başlatılır ve veri paketini alan slaveCLN bunu direkt olarak SINK düğümüne gönderir.

Akabinde slave CLN yeni bir veri paketi oluşturarak masterCLN'ye doğru iletir ve paket Master CLN'ye geldiğinde gerekli işlemler yapıldıktan sonra SINK düğümüne gönderir. Diğer iki yöntemden farklı olarak bu yöntemde her iki CLN düğümünün SINK ile bağlantısı vardır.

2Way metodunda diğer yöntemlerin avantajlı tarafları birleştirilmiştir. Hat uzunluğu arttıkça paket boyutları artmakta ve hat sonundaki uç düğümlerin paket anahtarlama maliyetleri artmaktadır. 2Way metodunda ise paketler çift yönlü aktarılmaktadır. Master CLN çıkışı paket akışları ToSlave metodundaki gibi çalışır ancak sonrasında Slave CLN'nin veri akışı başlatması ile işlem ters yönde tekrarlanır. Böylece düğümler arası paket anahtarlama maliyetleri tüm düğümler üzerinde dengelenmiş olur. Ayrıca 2Way metodunda her iki CLN de SINK düğümüne bağlı olduğu için yedekli bir çalışma senaryosuna müsait bir altyapı da sağlanmış olur.

4. Paket Yapıları

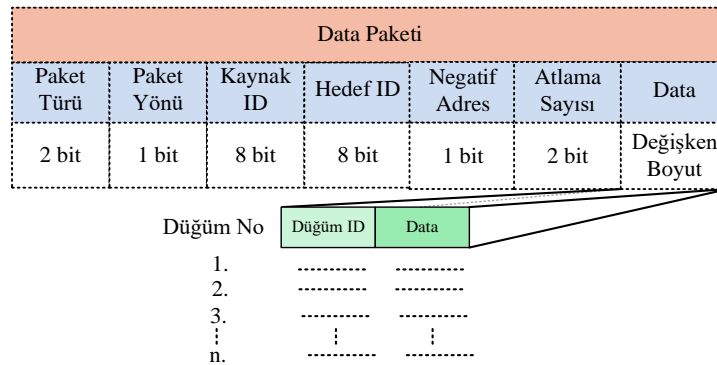
TBL-MAC protokolünde iki tip paket yapısı kullanılmıştır. Paket tipi (türü) bilgisi her pakette ilk alan olup *token için 0* ve *veri için 1* değeri atanmıştır. Teknik olarak her iki paket türünün başlık (header) kısımları aynı olup sadece son alanda birbirlerinden ayrılmaktadırlar. Token paketlerinin yapısı Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Token paket yapısı

Token paket yapısında üzerinde durulması gereken iki önemli alan vardır. Bu alanlardan birincisi Negatif Adres alanıdır. Geliştirilen TBL-MAC protokolünün yeni ve en etkin yanlarından biridir. Paket yansımaları sonucu oluşan kısır döngüleri ve paketlerin gittiği yönde ilerlemesini garanti etmek için kullanılmaktadır. Bu alan 1 bitlik bir alan olup set edilmesi durumunda negatif adres mantığına göre hareket edileceği anlamına gelir. Diğer alan olan Atlama Sayısı alanında ilgili paketin kaç atlama mesafesinden iletildiği bilgisi tutulmaktadır. Bu alan özellikle herhangi bir düğümün (kapanma, arızalanma vb. gibi) ağdan kopması durumunda ağın devamını sağlamak üzere kullanılır. Düğümler alanı sıralı bir liste kaydı olup her kayıta (node_item) bir düğümün id, düğüm türü, düğüm atlama sayısı bilgisi bir yapı (struct) şeklinde tutulmaktadır.

Veri paketlerinin yapısı token paketi ile birebir aynı olup sadece Data alanında farklılık göstermektedirler. Bu alanda token paketlerinden farklı olarak "0" yerine "1" değeri vardır ve bu protokol içerisinde PK_TYPE_DATA sabiti ile temsil edilmektedir. Şekil 8'de Veri paketlerinin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 8. Veri paket yapısı

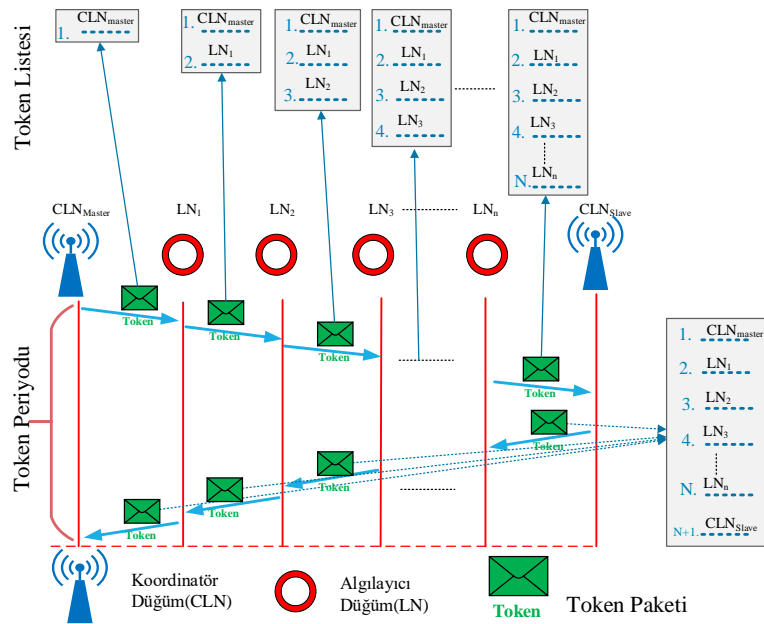
Şekil 8’den de görüleceği üzere Veri paketinin “data” alanı değişken uzunlukta olup düğümlerin adres (id) bilgisi ve ilgili düğümün kendisine ait veriyi barındırmaktadır. Bu alanın içeriği bu çalışma kapsamında olmayıp, bu çalışmada tüm düğümlerin periyodik olarak artan bir sayısal bilgiyi aktardıkları varsayılmış ve veriler buna göre oluşturulmuştur.

TBL-MAC protokolünde öncelikli olarak zaman bölmeli bir yaklaşımla (Ari, Cibuk, & Ağgün, 2018) çoklu kanal kullanımı amaçlanmıştır. Ancak protokol için benimsenen token tabanlı deterministik yaklaşım sayesinde tek bir kanal üzerinden tüm düğümlerin haberleşmesinin daha etkin olduğu görülmüş ve bu doğrultuda “sabit kanal tahsis yaklaşımı” benimsenmiştir. Tek bir kanal kullanıldığından, kanal yönetimi oldukça kolaydır. Çoklu kanal mekanizmalarında görülen kanal anahtarlama (değiştirme) ve girişim kaynaklı problemler yaşanmamaktadır. Tek kanal kullanımı sayesinde geliştirilen algoritmalar ve donanım kaynaklarının daha basit ve uygun maliyetli olması sağlanmıştır.

TBL-MAC protokolünde NRF905 (Nordic Semiconductor, n.d.) alıcı-verici donanımı baz alınarak 902 MHz frekansı 200KHz bant genişliğinde ve 999KHz data rate değerinde bir kanal yapısı baz alınarak çalışmalar yürütülmüştür.

5. Haberleşme Algoritma Yapısı

Düğümlerin ağa katılması token paketinin hat boyunca dolaşması ile olmaktadır. Her düğüm, token paketine bilgisini ekleyip sonraki düğüme iletmesi ile ağa katılma işlemi tamamlanmaktadır. Token paketi ilk token paketini gönderen Master CLN’ye ulaştığında ağdaki tüm düğümler ağa katılma işlemini tamamlamış olmaktadır. Şekil 9’da token paketi için zaman çizelgesi ve token paketinin ilerleyişi gösterilmektedir.

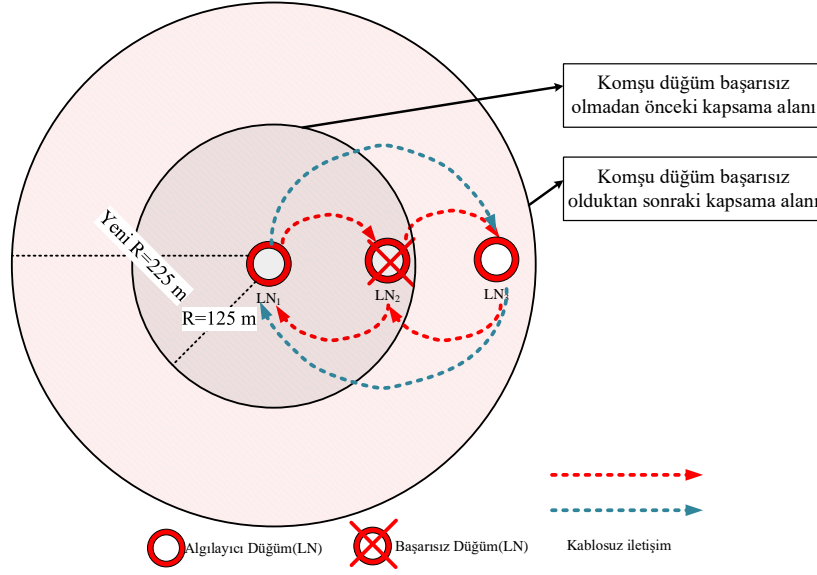


Şekil 9. Token ile ağ kurulumu zaman çizelgesi

Token paketleri belirlenen periyotlarda sürekli olarak gönderilir. Böylece belirli bir zaman diliminde, ağdaki düğümlerin konumu ve canlılığı test edilerek, her token döngüsünde ağ yenilenmiş olur. Bir token döngüsü başladığında veri akışı durdurulur ve token döngüsünün sağlıklı olarak tamamlanması beklenir. Bu şekilde benimsenen yaklaşım sayesinde veri paketleri ağın kurulumundan emin olunduktan sonra gönderileceği için olası veri kayıplarından kaçınılmış olur. Veri paketi haberleşmesi, Token döngüsü bittikten ve iletim hattı kurulduktan sonra başlar. Ağdaki düğümlerin veri toplama (üretme) işlemi senkron ve asenkron olarak iki farklı şekilde ele alınmıştır. Senkron veri üretiminde; tüm düğümler belirli bir zaman diliminde aynı aralıklarda eşit sayıda veri üretirler ve gönderirler. Asenkron veri üretiminde ise düğümler farklı periyotlarda değişik miktarda veri üretir ve iletirler. Geliştirilen TBL-MAC protokolü her iki veri üretme biçimine de uyumlu olarak tasarlanmış olup, yöntem ve çalışmaların sağlıklı kıyaslanabilmesi için bu çalışmada senkron veri üretimi tercih edilmiştir.

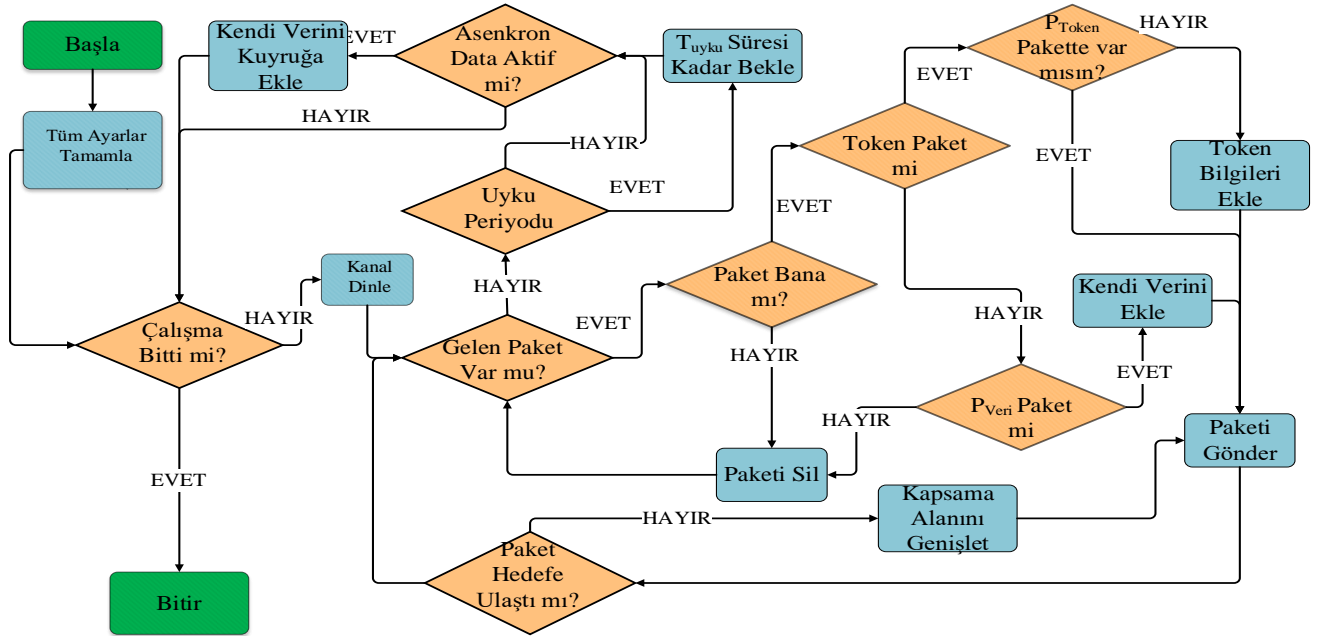
İleri yönde hareket eden paketin kablosuz haberleşmenin yayım (broadcast) özelliği gereği gönderici düğüme de ulaşmaktadır. Bu durum gereksiz işlem maliyetine ve kısır paket döngülerine sebep olduğundan dolayı istenmeyen bir durumdur. TBL-MAC protokolünde bu olumsuz duruma yeni bir yaklaşım olan “Negatif Adresleme” adı verilen yöntem ile çözüm aranmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

TBL-MAC protokolü düğümün ağdan düşmesi, kopması gibi başarısızlıklarına karşı ağ iletişiminin sürmesi için bir mekanizma tanımlanmış olup, bu mekanizma ile düğüm ağdan düştüğünde komşu düğümler paket hareketliliğine bakarak ağdan düştüğünü anlamakta kendi kapsama alanlarını artırarak iletim hattının devamlılığını sağlamaktadırlar(Çıbuk, Arı, Ağgün, & Budak, 2021). Şekil 10'da söz konusu mekanizmanın çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 10. Düğüm başarısızlığı durumunda düğümlerin davranış şeması

Protokol içerisinde kullanılmak üzere tanımlanmış olan LN ve CLN düğümlerinin tasarımı, geliştirilen yöntemlere uygun olarak gerçekleştirilmiştir. TBL-MAC protokolünde LN'lerin alandan veri toplamak ve gelen paketleri bir sonraki düğüme iletmek (röle görevi) olmak üzere iki görevi vardır. LN alandan topladığı verileri kaydeder, kendisine bir veri paketi geldiğinde bu veriyi pakete ekleyerek bir sonraki düğüme iletir. Şekil 11'de LN düğümünün çalışma mekanizması (algoritması) gösterilmiştir.



Şekil 11. LN düğüm algoritmasının akış şeması

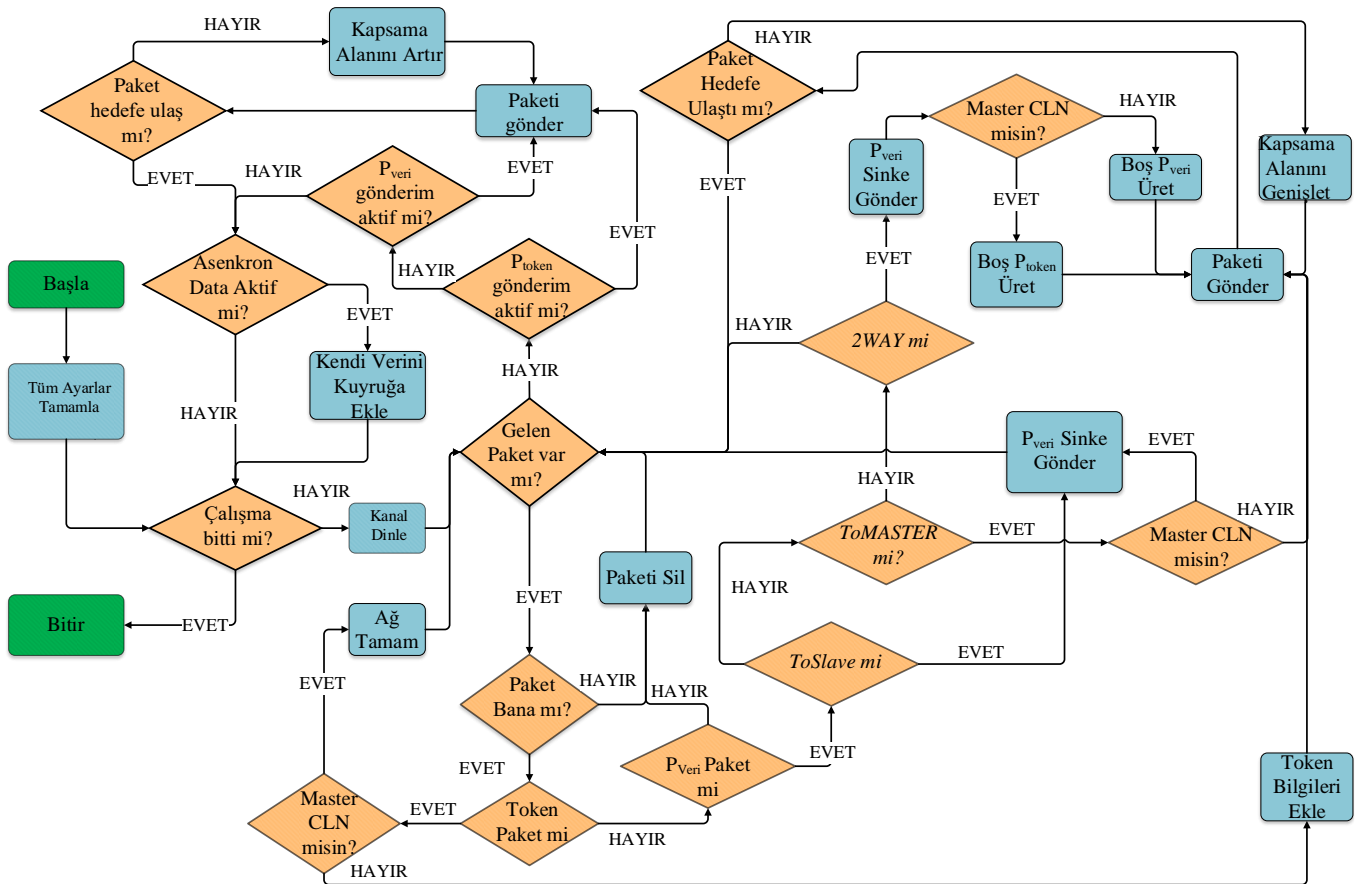
Şekil 11'den de görüleceği üzere LN'ler ilk çalıştığında öncelikli olarak (kanal, frekans, başlangıç değerlerinin atanması vb. gibi) temel ayarları yapılıp. Daha sonra LN, yaşam süresi (bu çalışmada benzetim süresi olarak belirlendi) bitene kadar şemada belirtilen görevleri yerine getirir. LN öncelikle kanalda herhangi bir paket olup olmadığına bakar. Eğer paket var ise bunların P_{token} ya da P_{veri}

paketi olup olmadığını kontrol eder. Paket, Token paketi ise ve kendi bilgileri paket içerisinde yok ise LN, kendi bilgilerini pakete ekler göndermek üzere hazırlar. Eğer gelen Veri paketi ise varsa kendi verisini de pakete ekler ve göndermek üzere hazırlar. Daha sonra paket gönderme mekanizması devreye girer ve LN ilgili paketi gönderir. LN, paketi gönderdikten sonra hedefe ulaştığından emin olmak için hattı dinlemeye başlar. Aynı paketin komşu düğümde negatif adresli olarak yansımaları bekler. Eğer aynı paket negatif adresli olarak kendine tekrar geldiye komşusunun aktif bir düğüm olduğuna ve paketin hedefine ulaştığına karar verir ve normal işleyişine devam eder. Eğer belirli bir süre (PK_RETURNED_TIMEOUT) boyunca negatif adresli paket dönüşü olmaz ise bu durumda paketi gönderen LN kendi kapsamı alanı içerisinde, paketin iletilme yönünde aktif bir komşu olmadığına karar verir kendi kapsama alanını genişleterek aynı paketi tekrar gönderir. Süreç bu şekilde ilerletilerek, arada başarısız olan ya da ağdan kopan bir düğüm olmasından kaynaklı bağlantı başarısızlığının önüne geçilmiş olur.

LN, başarılı bir paket aktarımından sonra belirli bir süre herhangi bir aktivite alamaz ise uyku sürecine girmektedir. Ayrıca, ayarlanan uyku periyodu gelmiş ise de düğüm uyku moduna geçer. Bu çalışmada önerilen DKAA yapısında düğümler tek bir kanal üzerinden haberleşmektedirler. Komşu düğümler arasında paket çarpışmasından kaynaklı veri kayıplarını engellemek için düğümler paketi ilettiğinde belirli bir (SLEEP_DURATION) süre boyunca uyku moduna geçerek ağı dinlemeyi bırakır. Bu şekilde sinyal çakışmalarının önüne geçilmektedir.

Ayrıca düğümler asenkron veri gönderme mekanizmasına sahiptir. Bu mekanizmada düğümler alandan elde ettiği veriyi belirtilen periyotlarda kaydeder. Düğümler, Veri paketi akışı sırasında topladığı verileri gelen veri paketine ekleyip gönderirler.

LN'ler üzerinde tutulan 'Düğüm Tablosu (NodeTable)'nda, ağdaki her bir düğümün adres bilgisi, düğümün tipi, düğümün atlama sayısı, pozisyonu ve yaşamsal durumu gibi bilgiler tutulur. Böylece LN düğümler de CLN'ler gibi ağ topolojisi hakkında bilgi sahibi olurlar ve bazı karar mekanizmalarında bu tablodan faydalanırlar. Düğüm tablosu alınan her Token ve Veri paketinde yeniden ilgili düğüm için güncellenir.



Şekil 12. CLN düğüm algoritmasının akış şeması

CLN'ler, algılayıcı düğümlerden daha gelişmiş yapıya ve işleve sahip olduğundan ihtiyaç duyulan algoritma yapısı da karmaşık ve gelişmiştir. CLN'ler ağdaki paket hareketliliğinin başlatılması, LN'lerden verilerin toplanması ve SINK'e başarılı bir şekilde iletilmesinden sorumludur. Paket hareketliliğinin en yoğun olduğu düğümler CLN'lerdir. Çünkü DKAA'ların karakteristik özelliği

gereği veriler birikerek uç düğümlere ulaşır. Dolayısıyla uçta bulunan CLN düğümlerin iş yükü çok fazladır. CLN'lerin algoritma akış şeması Şekil 12'de gösterilmektedir.

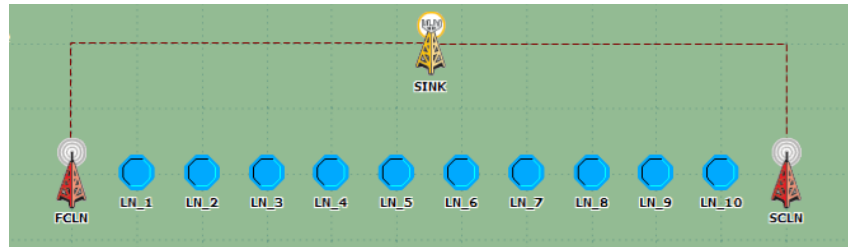
Şekil 12'den de görüleceği üzere CLN'ler ilk çalıştığında öncelikli olarak temel ayarları yapılarak yaşam süresi bitene kadar akış şemasında bertilen görevleri yerine getirir. Tüm CLN'ler sürekli olarak ortak kanalı "herhangi bir paket hareketliliği var mı?" diye kontrol etmektedir. Eğer kanalda paket varsa paketleri alır paket bitene kadar P_{token} ya da P_{veri} paketlerini işler. Ağda Master CLN token paketlerinin oluşturulmasından sorumludur. Master CLN'in oluşturduğu P_{token} tüm ağı dolaşır gelmiş ve ağ kurulumu(veri iletim hattı) tamamlanmış ise bu sefer veri iletim aşamasına geçer ve ilk Veri paketini oluşturarak hattan iletir. İlgili düğüm eğer Master CLN değilse gelen Token veya Veri paketlerine çalışma metotlarına göre davranır. Eğer gelen paket P_{veri} ise, paketi daha önceki bölümde anlatıldığı üzere mevcut üç iletim mekanizmasından (ToSlave, ToMaster, 2Way) uygun olanı seçerek iletişimi gerçekleştirir. Master CLN ağda belirli periyotlarla Token ve Veri paketi üretir. Bu sayede ağda paket karmaşıklığı ve paket çarpışmasının önüne geçilir. LN'lerde olduğu gibi CLN'ler de ağa paket gönderdiğinde paketin hedefe ulaştığını anlamak için paketin negatif adresli geri yansımaları takip eder. Bu şekilde ağda oluşabilecek düğüm ve bağlantı başarısızlığının önüne geçilmeye çalışılır.

6. TBL-MAC Benzetim ve Performans Değerlendirmesi

Geliştirilen TBL-MAC protokolünde performans testleri ile benzetim işlemleri, dış dünya fiziksel özelliklerine çok yakın ağ ortamı sunan eski adıyla Opnet ve şimdiki adıyla Riverbed Modeler (Riverbed Modeler, n.d.) olarak bilinen benzetim ortamında yapılmıştır. Benzetim işlemlerinde (2x10 çekirdekli, 3.4 GHz Intel Xeon işlemci, Nvidia Quadro P5500 GPU kartı, 64GB RAM özelliklerine sahip) HP Z840 iş istasyonu kullanılmıştır.

6.1. Önerilen protokolün ağ model

Çalışılan ağ modeli; DKAAs özelliği taşımaktadır. Önerilen yaklaşımın ağ yapısı Şekil 13'de gösterilmektedir. Bu örnekte 10 adet LN düğüm, Master ve Slave olmak üzere 2 adet CLN ve 1 adet SINK düğüm yer almaktadır. Ayrıca düğümlerin dinamik kapsama alanı yönetimi için *wcoverage* olarak adlandırılan yardımcı bir düğüm modeli kullanılmıştır.



Şekil 13. TBL-MAC protokolüne ait proje modeli

Bu ağ ortamında düğümler arası mesafe 100m ve her bir düğüm 125m yarıçaplı alanda iletişim kurabilmektedir. Tüm ağ elamanları proje kapsamında özel olarak tasarlanmıştır. Her bir düğümün, teorik olarak, tasarlanan yeni TBL-MAC protokolüne uyum sağlayacak donanım alt yapısına sahip olduğu varsayılmıştır.

6.2. Paket yapıları

Token ve Veri(data) paketi olmak üzere iki farklı paket tasarımı gerçekleştirilmiş olup, bu paketlere ait veri yapıları aşağıda gösterilmiştir. Token paketleri ile ağ kurulumu için tüm düğümlerin bağlanabilirliği dolayısıyla iletişim hattının oluşabilirliği test edilmektedir. Şekil 14'te paket Opnet editöründe tasarlanmış olan Token paketi gösterilmektedir.

ptype (2 bits)	direction (1 bit)	src_id (8 bits)	dst_id (8 bits)	is_na (1 bit)	hop_count (2 bits)	nodes (0 bits)
-------------------	----------------------	--------------------	--------------------	------------------	-----------------------	-------------------

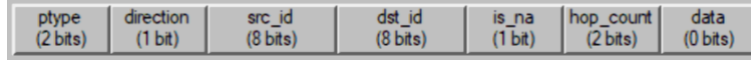
Şekil 14. Token paket yapısı

<i>ptype</i> :	2 bitlik paket tipinin tutulduğu alandır.
<i>direction</i> :	1bitlik paket yönü bilgisini tutan alandır.
<i>src_id</i> :	8bitlik gönderici düğüm bilgisi tutulur.
<i>dst_id</i> :	Alıcı düğümün 8 bitlik kimlik bilgisi tutulur.
<i>is_na</i> :	Negatif adresleme bilgisi tutulan 1bitlik alanıdır.

hop_count: 2bitlik atlama sayısı bilgisinin saklandığı alandır.

nodes: Başlangıçta 0 bit boyutludur. Token hat boyunca ilerledikçe düğümler bilgilerini bu listeye ekler ve uzunluğu artar. Burada saklanan bilgi daha önce de bahsedildiği üzere yapı(struct) türünde bir listedir.

Veri paketleri ise düğümlerin ortamdaki topladıkları verileri iletmek için tasarlanmıştır. Bu paketler iletim modlarına bağlı olarak CLN üzerinden SINK düğüme iletilmektedir. Şekil 15’de Veri paketi gösterilmektedir.



Şekil 15. Veri paketi yapısı

ptype: 2bitlik, paket tipinin tutulduğu alandır.

direction: 1bitlik paket yönü bilgisini tutan alandır.

src_id: 8 bitlik gönderici düğümün id bilgisi tutulur.

dst_id: Alıcı düğümün 8 bitlik kimlik bilgisi tutulur.

is_na: Negatif adresleme bilgisi tutulan 1 bitlik alanıdır.

hop_count: 2 bitlik atlama sayısı bilgisinin saklandığı alandır.

data: Boyut başlangıçta 0’dır. Bu alan düğümlerden toplanan verilerin tutulduğu bir listedir. Hat boyunca düğümler verilerini bu listeye ekler. Böylece paket boyutu artar.

6.3. Başarım analizi ve deneysel sonuçlar

TBL-MAC protokolünün başarım değerlendirilmesi için hazırlanan Ağ Proje ortamının benzetim parametreleri Tablo 1’de gösterildiği şekilde seçilmiştir.

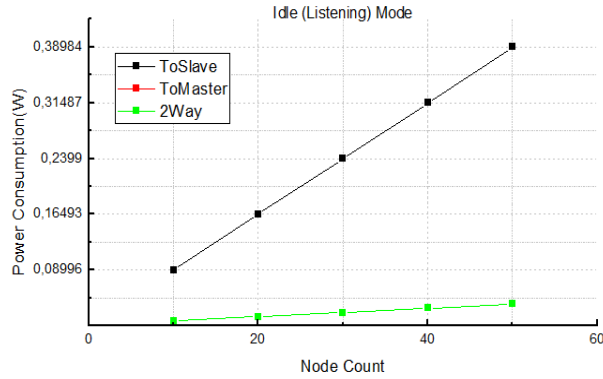
Tablo 1. Benzetim ölçütleri

Radyo yayılım gecikme modeli	dra_propdel
Modülasyon	bpsk
Radyo yayılım aralığı	125m ve 225m
İletim gücü	SR_tx = 0.027w
Alım gücü	Sr_rx = 0.0366w
LN sayısı	10, 20, 30, 40, 50
CLN sayısı	2
Sink sayısı	1
Düğüm yerleşimi	Doğrusal
Kullanılan kanal sayısı	1
Düğümler arası mesafe	100m
Benzetim süresi	25s

6.3.1. Enerji tüketimi değerlendirmesi

Sınırlı kaynaklara sahip algılayıcı düğümlerden oluşan DKAA için etkili güç tüketimi yönetimi en önemli başarım analizlerinden birisidir. Öyle ki petrol boru hattı izleme gibi uzun menzilli karasal uygulamalarda etkili güç tüketimi hayati öneme sahiptir.

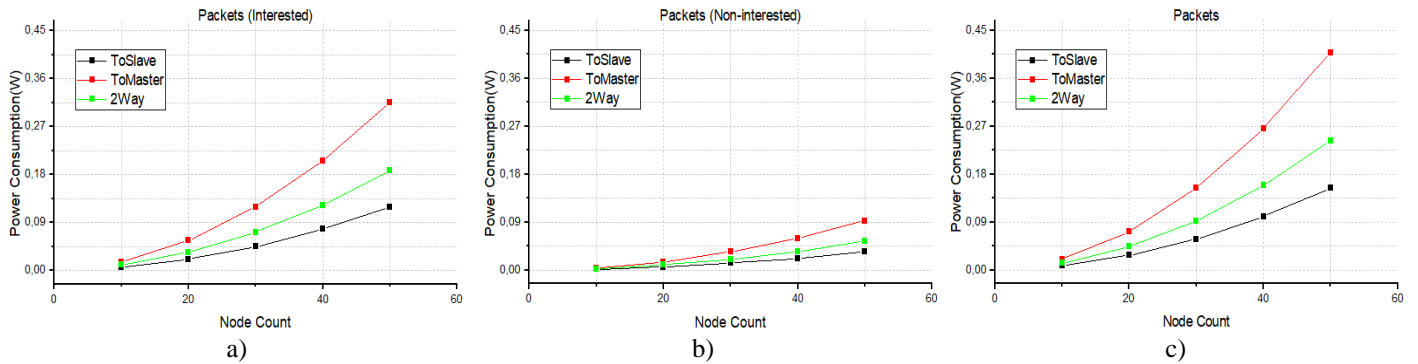
Çalışma kapsamında önerilen TBL-MAC protokolünün tüm güç tüketim maliyetleri analiz edilmiş, güç tüketimine sahip her faaliyet ayrı ayrı test edilmiştir. Şekil 16’da tüm düğümlerin boştaki enerji tüketim değerleri gösterilmiştir.



Şekil 16. Tüm düğümlerin Idle mod güç harcaması

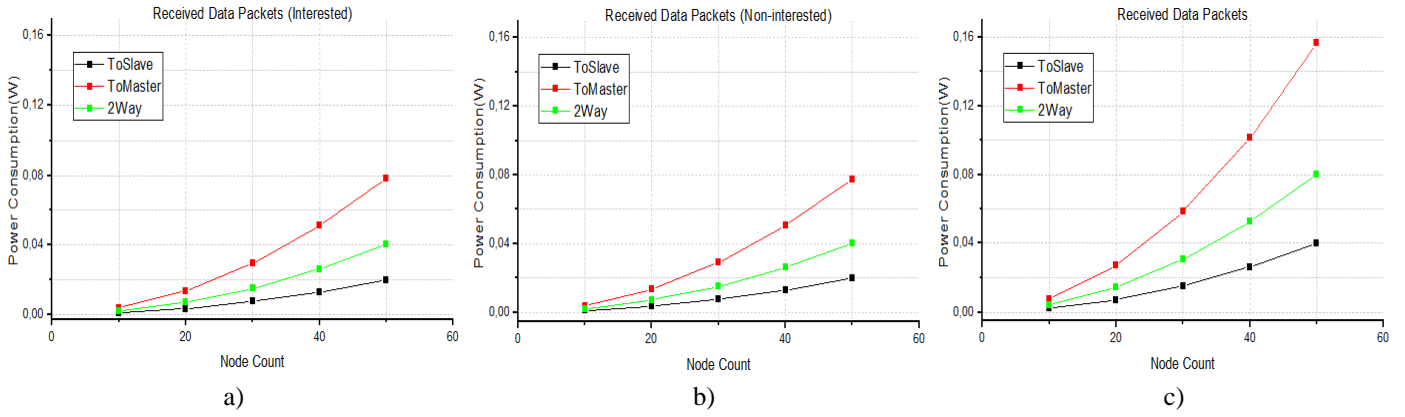
Şekil 16 incelendiğinde geliştirilen OEK protokolünün Dinleme (Idle) durumunda en az güç tüketimine sahip modun 2Way ve ToMaster metodu olduğu görülmekte olup, ToSlave yönteminin Dinleme durumunda daha fazla enerji tüketimi yaptığı gözlemlenmektedir. Aslında bu durum paket hareketliliği ile kolayca açıklanabilir. ToSlave yönteminde her bir periyottaki paket akışı tek yönlü olduğundan daha az sayıda paket iletilmekte ve bu nedenle düğümler daha çok boşa kalmaktadırlar. 2Way ve ToMaster metodunda ise her aktarım periyodu için çift yönlü olarak paket hareketliliği olduğundan düğümler Dinleme durumuna geçmek için daha az fırsat yakalamakta ve işlem yapmak üzere diğer durumlarda daha fazla kalmaktadırlar. Dolayısıyla en az paket hareketliliğine sahip olan ToSlave metodu bu anlamda daha fazla enerji harcar. Ancak ters bir bakış açısıyla bu durumun iyi olduğu söylenebilir. Zira Dinleme modundaki bir düğüm daima aktif moddaki bir düğümden daha az enerji harcayacaktır. Enerji tüketimi ile ilgili diğer grafiklerden de bu durum rahatlıkla görülebilir.

Farklı düğüm sayıları ve 3 farklı veri toplama metodu kullanımında senaryoların paket iletimi için harcadığı enerji durumları Şekil 17'de gösterilmiştir. Paket iletiminde enerji tüketimi en kötü olan durum, 50 düğümlü ToMaster metodunda gözlemlenmekte olup, harcadığı toplam enerji miktarı 0,42W seviyesindedir. Bu harcanan enerjinin oldukça ekonomik bir düzeyde olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum düğüm ve işlem süreçlerinde enerji duyarlı tasarım yapılmış olması efektif TBL-MAC algoritmasıyla ilişkilidir.



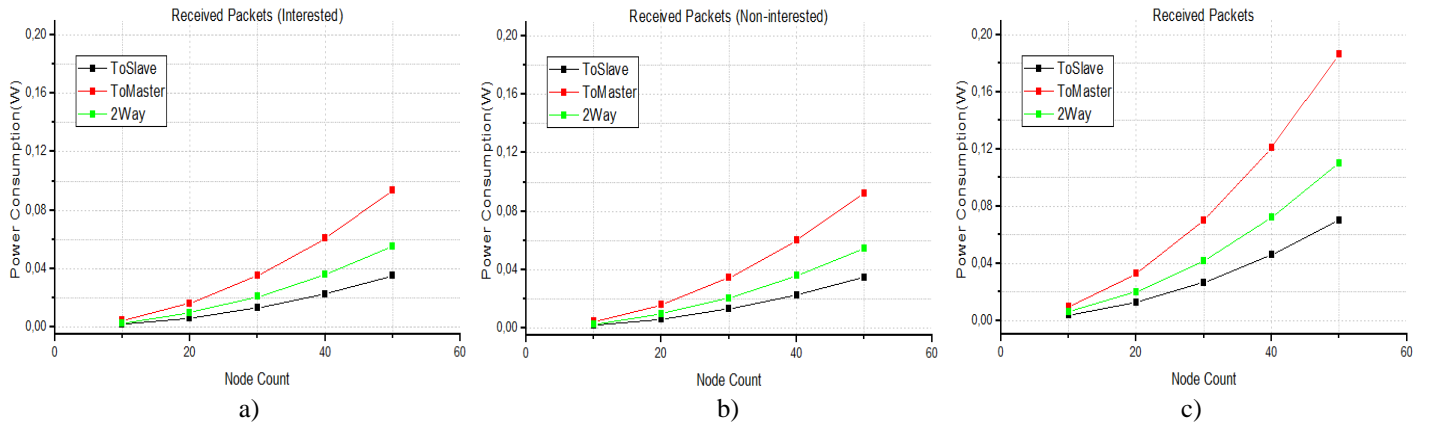
Şekil 17. a) Alakalı paketlerin güç harcaması b) Alakasız paketlerin güç harcaması c) Toplam paket iletimi güç harcaması

Şekil 17 a)'daki sadece düğümleri ilgilendiren paketlerin yaptığı güç harcaması incelendiğinde; ToMaster metodu en çok enerji tüketen metot olurken, ToSlave en az enerji harcayan metot olmuştur. Bu şekilde paket iletişimi için harcanan yalın enerji gözlemlenmiştir. Gereksiz paketler için yapılan güç harcaması Şekil 17 b)'de gösterilmiştir. Alakalı paket iletişiminde olduğu gibi ToMaster metodu en çok enerji tüketen metot olurken, ToSlave en az enerji harcayan metot olmuştur. Grafiklerden de görüldüğü üzere alakalı ve alakasız paketlerin enerji harcaması toplamı Şekil 17 c)'de gösterilen toplam paket iletişim güç harcamasına eşit olmaktadır. Tüm senaryolarda veri paketi alımı için harcadığı enerji durumları Şekil 18'teki grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 18. a) Alınan alakalı veri paketlerinin harcadığı güç b) Alınan alakasız veri paketlerinin harcadığı güç c) Alınan tüm veri paketlerinin harcadığı güç

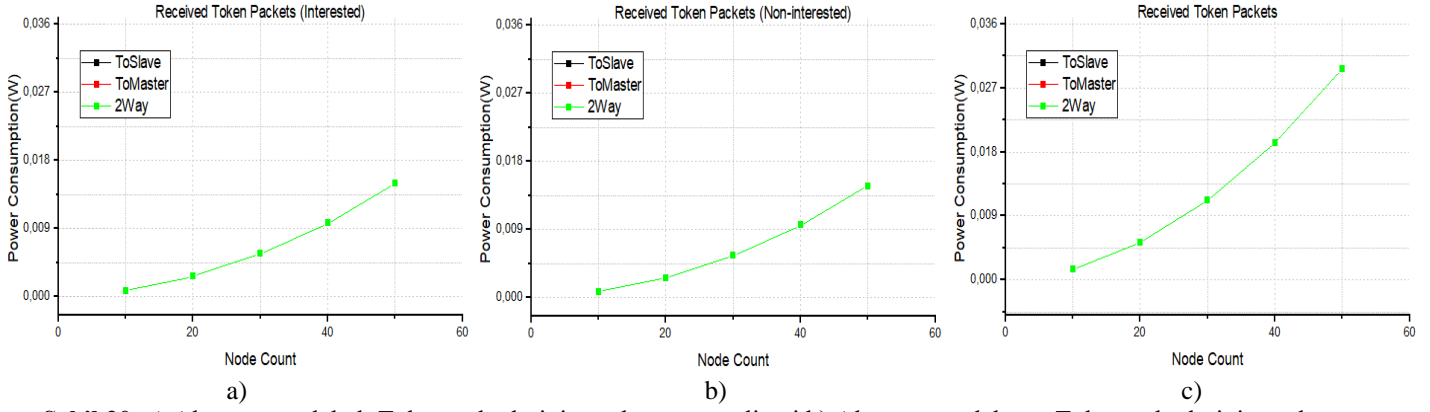
Düğümün sadece kendini alakadar eden veri paketleri alırken harcadığı enerji değerleri toplamı Şekil 18 a)'da gösterilmiştir. Önceki değerlerde olduğu gibi ToMaster en çok enerji harcayan veri toplama metodu olduğu görülmektedir. Şekil 18 b)'de alınan alakasız veri paketlerinin harcadığı güç incelendiğinde, aşağıdaki grafiklerden de görüleceği üzere TBL-MAC protokolü çalışma modlarına göre veri iletiminde de harcadığı enerjiyi mümkün olduğunca minimize etmekte pil ömrüne olumlu etki yapmaktadır. Şekil 18 c)'de tüm veri paketlerinin harcadığı toplam enerji miktarları görülmektedir. Bu değerler her bir düğümün aldığı tüm Veri paketlerine harcadığı enerji toplamından elde edilmiştir. Tüm düğüm sayılarında ToSlave metodunda en az enerji harcama performansı gösterirken, ToMaster metodunda en çok enerji harcama değerleri elde edilmiştir. Tüm senaryolarda paket türü dikkate alınmaksızın tüm paketler için harcanan enerji durumları Şekil 19'da grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 19. a) Alınan tüm alakalı paketlerin toplam güç maliyeti b) Alınan tüm alakasız paketlerin toplam güç maliyeti c) Alınan tüm paketlerin toplam güç maliyeti

Düğümün alınan tüm alakalı paketler için harcadığı toplam enerji değerleri Şekil 19 a)'da gösterilmiştir. Diğer tüm enerji harcamalarında olduğu gibi alakalı paket alımı durumu içinde ToMaster metodu en çok enerji harcayan, ToSlave en az enerji harcayan metot olduğu görülebilmektedir. Şekil 19 b)'de alakasız paketlerin harcadıkları güç değerleri verilmiştir. Bu değerler düğümleri alakadar etmeyen ve komşu düğümlerin yayın(broadcast) yaptığı paketlerden gelmektedir. Düğümler negatif adresleme sayesinde bu paketlerin kendisini alakadar etmediğini tespit ederek daha fazla işlem yapmamaktadır. Düğümlerin tüm aldığı paketler için harcadığı toplam enerji değerleri Şekil 19 c)'de gösterilmiştir. Diğer tüm enerji harcamalarında olduğu gibi paket alımı durumu içinde ToMaster en çok enerji harcayan, ToSlave en az enerji harcayan metot olmuştur.

Token paketleri ile tüm senaryolarda eşit paket sayıları kullanılarak ağın kurulması sağlanmıştır. Önerilen protokol için Token paketleri alımı enerji harcama grafikleri Şekil 20'de verilmiştir.

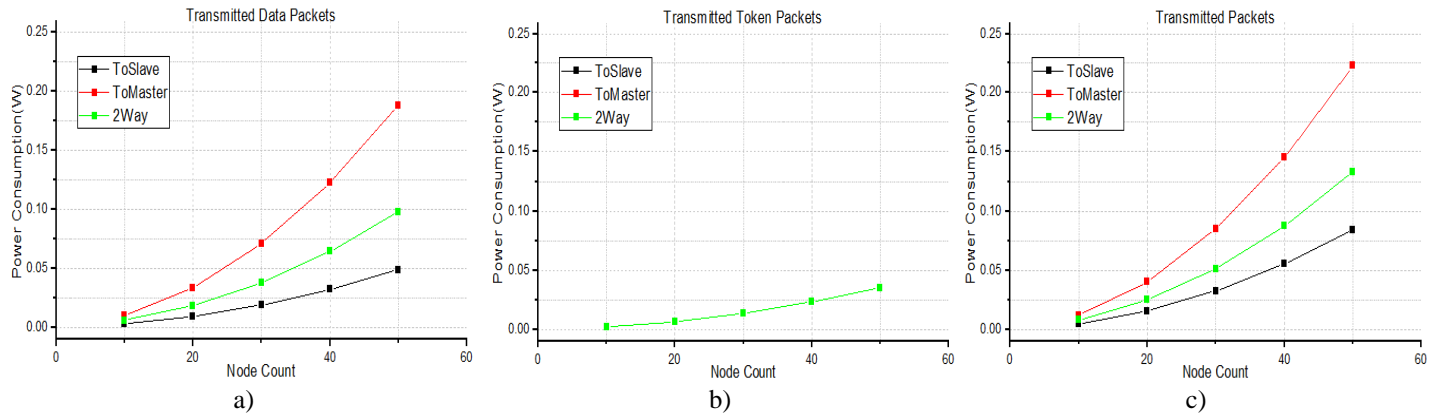


Şekil 20. a) Alınan tüm alakalı Token paketlerinin toplam güç maliyeti b) Alınan tüm alakasız Token paketlerinin toplam güç maliyeti c) Alınan tüm Token paketlerinin toplam güç maliyeti

Protokolde kullanılan ve iletişimin düzgün yapılmasını sağlayan Token paketlerinin her modda aynı büyüklüğe sahip olduğu, dolayısı ile harcadıkları toplam güç miktarının hem çok küçük hem de eşit olduğu Şekil 20'deki grafiklerden görülmektedir. Düğüm sayısı arttıkça Token boyutunun artması daha fazla enerji harcanmasına neden olmaktadır. Grafikteki düğüm sayısına bağlı olarak enerjide görülen artış Token paket sayısı ile değil ilgili paketin boyutunun artması ile alakalıdır. Şekil 21'deki paket sayıları grafiklerine bakıldığı zaman değerlerin tutarlı olduğu görülebilmektedir. Tüm senaryolar için veri paketi gönderimi için harcanan enerji durumları Şekil 21 a)'da gösterilmiştir. Bu değerler her bir düğümün gönderdiği tüm veri paketlerine harcadığı enerji toplamından elde edilmiştir.

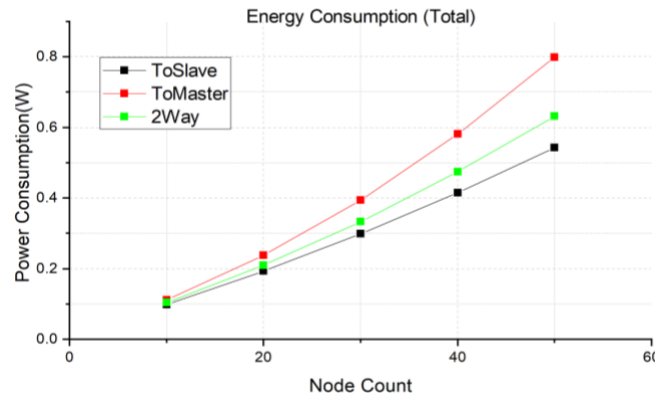
Veri paketi alınırken olduğu gibi tüm düğüm sayılarında veri paketi gönderiminde de ToSlave metodunda en az enerji harcama performansı gösterirken, ToMaster metodunda en çok enerji harcama değerleri elde edilmiştir. Token paketi gönderimi için düğümlerin harcadığı toplam enerji değerleri Şekil 21 b)'de gösterilmiştir.

Şekil 21 b)'de de görüleceği üzere ToMaster, ToSlave ve 2Way metodlarında harcanan toplam güç eşit olarak görülmektedir. Çünkü bu yöntemler veri toplama yöntemidir ve oysa benzetim boyunca aynı sayıda Token kullanılarak iletişim hattı kurulmaktadır. Öte yandan düğümlerin veri paketleri dâhil tüm gönderdiği paketler için harcadığı toplam enerji değerleri Şekil 21 c)'de gösterilmiştir.



Şekil 21. a) Gönderilen Veri paketlerin toplam güç, b) Gönderilen Token paketlerin için harcama toplam güç, c) Gönderilen tüm paketlerin toplam güç maliyeti

Paket gönderiminde, gönderilen her paket alakalı paket olarak değerlendirilir. Dolayısı ile paket alınırken olduğu gibi alakalı-alakasız paket ayrımı söz konusu değildir. Diğer tüm enerji harcamalarında olduğu gibi paket iletimi için de ToMaster metodu en çok enerji harcayan metot olmuştur. ToSlave en az enerji harcayan metot olarak görülebilmektedir. Son olarak tüm paket işlemleri ve dinleme durumu dâhil toplam enerji harcamaları grafiği Şekil 22'de gösterilmiştir.



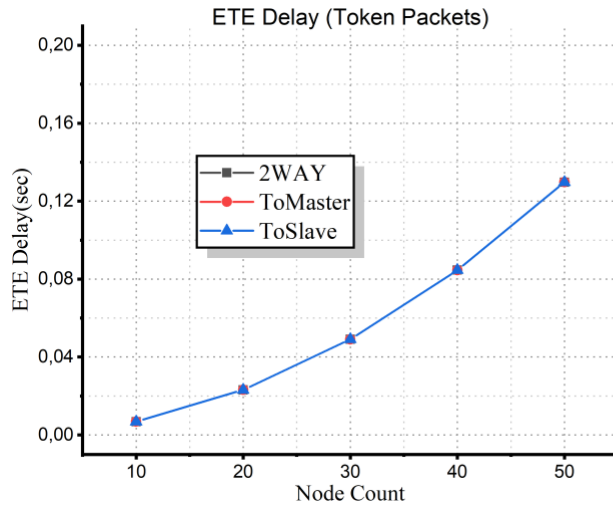
Şekil 22. Toplam güç tüketim maliyeti

Diğer tüm sonuçlarda olduğu gibi toplam enerji harcamalarında da en çok güç tüketen metot ToMaster olur iken, ToSlave metodu en az güç tüketen metot olmuştur.

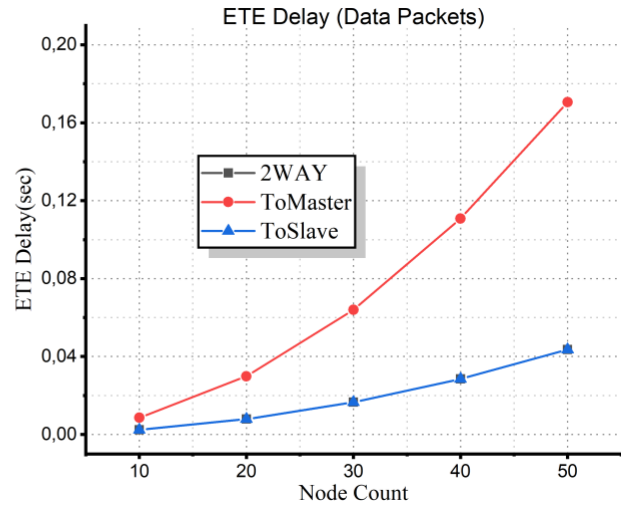
6.3.2. Uçtan uca gecikmenin değerlendirilmesi

Şekil 23'te token paketleri için uçtan uca gecikme grafiği ve gösterilmektedir. TBL-MAC protokolünün Token paketlerinin uçtan uca gecikme metriği; CLN_{Master} 'ın Token paketi göndermesinden itibaren paketin tüm ağı dolaşıp tekrar CLN_{Master} düğüme dönmeye kadar geçen zaman olarak hesaplanmıştır. Veri paketleri için uçtan uca gecikme metriği ise; CLN_{Master} veri paketi göndermesinden başlayıp paketin tüm ağı dolaşıp SINK düğüme ulaşma zamanı olarak hesaplanmıştır. ToSlave ve 2Way metotlarında veri paketi ağı 1 kere dolaşıp SINK'e ulaşmaktadır. ToMaster metodunda ise veri paketi ağda gidiş-dönüş yapıp SINK'e ulaşmaktadır. Bundan dolayı göre daha fazla uçtan uca gecikmeye sahiptir.

Şekil 24'te ise veri paketlerinin uçtan uca gecikme performansları Şekil 24'te görüldüğü üzere ToMaster metodu diğer iki metoda



Şekil 23. Token paketleri için uçtan uca gecikme

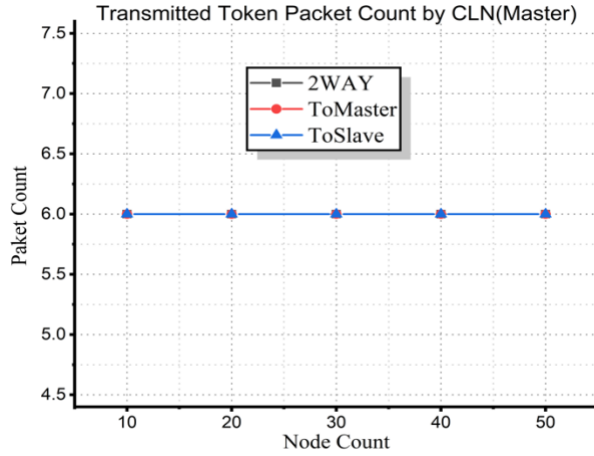


Şekil 24. Veri paketleri için uçtan uca gecikme

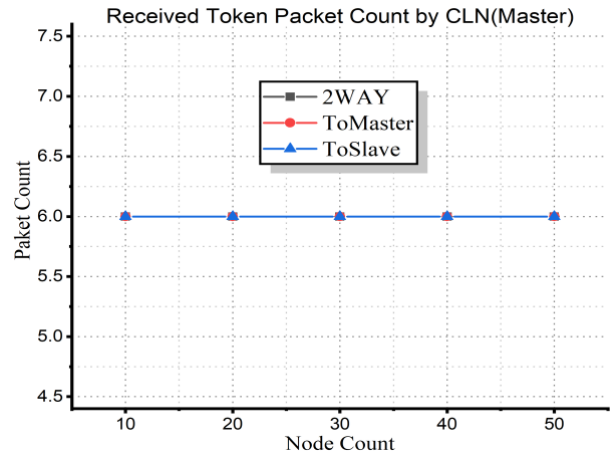
ToSlave, ToMaster ve 2Way veri toplama metodudur. Dolayısıyla TBL-MAC protokolü algoritması gereği Token paketler etkilenmemesi gerekir. Şekil 23'te de görüldüğü üzere, tüm senaryolarda eşit gecikme olduğundan algoritmanın doğru çalıştığı söylenebilir.

6.3.3. Paket iletim oranının değerlendirilmesi

Şekil 25'de CLN_{Master} tarafından gönderilen toplam Token paket sayıları, Şekil 26'de de alınan Token paketi sayıları gösterilmiştir. Tüm düğüm senaryolarında 6 adet Token paketi gönderilmiş ve aynı sayıda Token paketi geri alınmıştır.

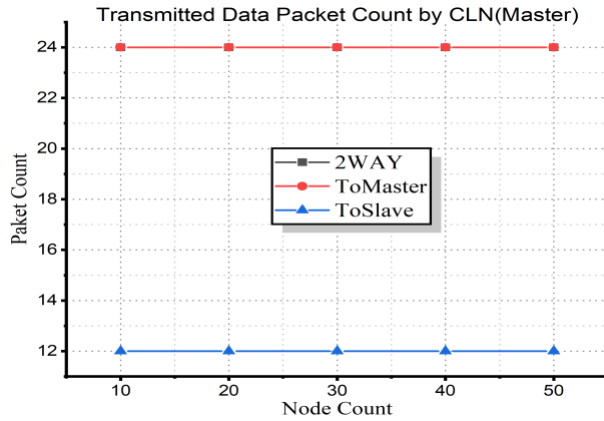


Şekil 25. CLN_{Master} tarafından gönderilen Token paket sayıları

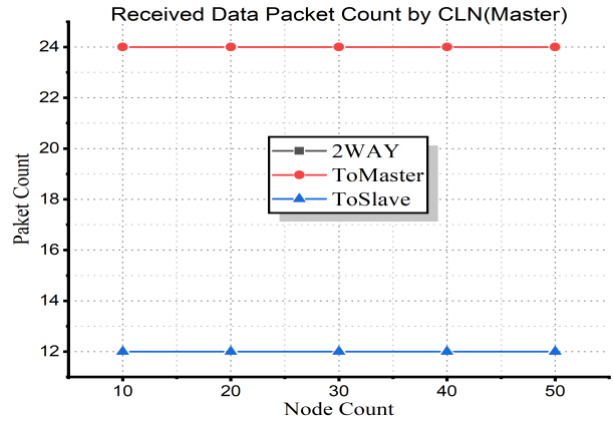


Şekil 26. CLN_{Master} tarafından alınan Token paket sayıları

Tüm bu sonuçlar Token paket iletiminde önerilen TBL-MAC protokolünün hatasız olarak çalıştığı göstermektedir. Dolayısıyla token paketleri için veri iletim oranı benzetim boyunca %100 olmuştur. Öte yandan Şekil 27 ve Şekil 28'da tüm senaryolar için gönderilen ve alınan toplam veri paket sayıları görülmektedir.



Şekil 27. CLN_{Master} tarafından gönderilen Veri paket sayıları

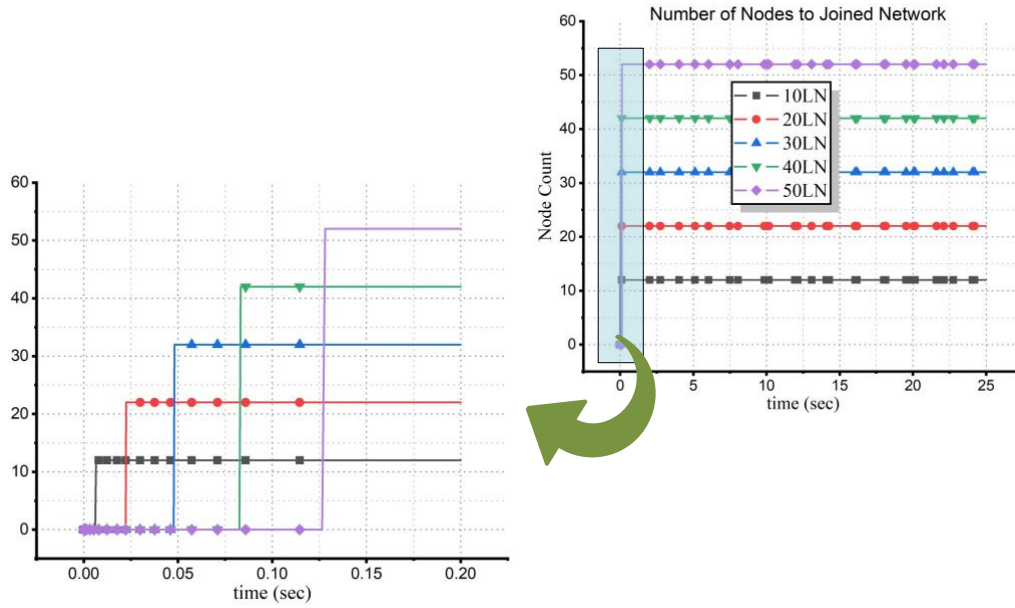


Şekil 28. CLN_{Master} tarafından alınan Veri paket sayıları

Tüm düğüm senaryolarında benzetim süresince 2Way ve ToMaster için 24 adet, ToSlave metodu için 12 adet veri paketi gönderilmiştir. Gönderilen ve alınan paket sayıları kıyaslandığında veri paketi iletiminde TBL-MAC protokolünün hatasız olarak çalıştığı görülmektedir.

6.3.4. Düğümlerin bağlantı sürekliliği analizi

DKAA düğümlerin ağa bağlanıp ağdan düşmeden görevlerini yerine getirmesi ağ performansı açısından büyük öneme sahiptir. Özellikle DKAA'ların lineer topolojik dizilimlerinden dolayı bu durum çok daha hayati bir hal alır. Bir düğümün başarısız olmasının tüm ağı etkilemesi söz konusudur. Şekil 29'da proje kapsamında geliştirilen protokolün ağ bağlantı performansları verilmiştir.



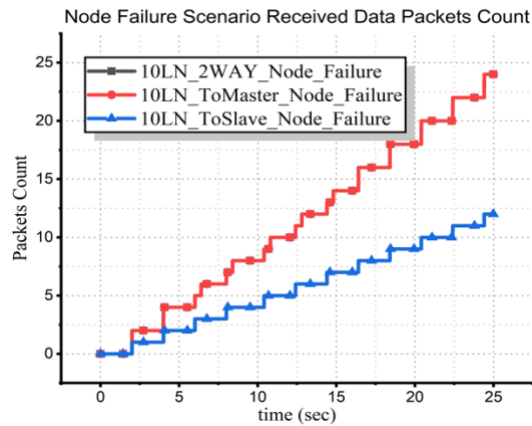
Şekil 29. Düğümlerin ağda bağlantı sürekliliği

Şekil 29'da da görüleceği üzere; senaryo adları LN düğüm sayılarına göre verilmiştir ve her senaryoda iki adet CLN de olduğundan grafikte düğüm sayıları her bir senaryoda +2 adet olarak bulunmaktadır. Ağın oluşması; 10 düğümlü senaryoda 0.00652742042 saniyede, 20 düğümlü senaryoda 0.022510019 saniyede, 30 düğümlü senaryoda 0.048102335 saniyede, 40 düğümlü senaryoda 0.083304177 saniyede ve 50 düğümlü senaryoda ise 0.128115648 saniyede gerçekleşmiştir.

Buna göre düğümler tüm senaryolarda kısa sürede ağa bağlanıp hattan kopmadan benzetimi başarı ile tamamlamıştır. Tüm sonuçlar göstermiştir ki TBL-MAC, ağ performansını olumsuz etkileyen en önemli faktörlerden olan bağlantı hatası konusunda önemli derecede başarılı olmuştur ve benzetim süresince düğümler ağdan kopmadan işlemlerine devam etmişlerdir.

6.3.5. Başarısız düğüm durum davranışı

Bu başlık altında herhangi bir nedenden dolayı ağdan düşen (kopan) bir düğümün belirli bir süre sonra tekrar ayağa kalkması ile geliştirilen TBL-MAC protokolünün bu durum karşısındaki tepkiselliği (Çıbuk, Arı, Ağgün, & Budak, 2021) ve davranış biçimi irdelenmiştir. Bu kapsamda hat üzerinde tek düğümlü düşüşler ele alınmıştır. Ardışık çok sayıda düğüm hatası (2 ve daha fazla veya hata patlaması) durumları bu çalışma kapsamında ele alınmamıştır. Yapılan testlerde ağdan kopan düğüm olmasına karşın veri paketi iletiliminden herhangi bir sorun oluşmadığı Şekil 30'da görülebilmektedir. Ağdan düğüm kopması ile komşu düğümler kapsama alanını iki katına çıkararak iletişimi sürdürmüş ve ağda bağlantı sürekliliği sağlanmıştır. Sonuçlar TBL-MAC protokolünün düğüm başarısızlığı testinden başarı ile geçtiğini göstermiştir.



Şekil 30. Düğüm başarısızlığı testi (Veri Paketi Sayısı)

7. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında DKAA ağlar için TBL-MAC adında yeni bir OEK protokolü geliştirilmiştir. Ayrıca yapılan benzetim çalışmalarıyla gerçekleştirilen protokolün başarımları ölçülmüştür.

Geliştirilen (TBL-MAC) OEK protokolü; özellikle şehir içi ve şehirlerarası karayollarındaki yol kenarı aydınlatmalarında kontrol ve enerji tasarrufu konuları dikkate alınarak önerilmiştir. Etkin ve verimli bir OEK tasarımı için literatürdeki benzerlerinden farklı olarak paket tekrarları ve özelliklede yankılanma sorunlarına karşı yeni ve etkin bir yöntem olan “Negatif Adresleme” kullanılmış olup bu yaklaşımın etkinliği deneysel analizlerde de açıkça test edilip gözlemlenmiştir. Negatif Adresleme yaklaşımı sayesinde gönderilen paketlerin hedefine iletilmesi garanti edilmekte olup bunun için ekstra bir onay veya paket kullanılmamaktadır. Ayrıca enerji verimliliği ve ağdaki kötü durum senaryolarının üstesinden gelebilmek için farklı çalışma modları (ToSlave, ToMaster ve 2Way) geliştirilerek veri toplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu veri toplama metotları arasında ToSlave metodu uçtan uca gecikme ve enerji tüketimin en düşük olduğu metod olarak gözlemlenmiştir. Özellikle yoğun veri trafiğine ihtiyaç duyulmayan ve enerji kaynağı sınırlı olan DKAA’lar için çok uygun bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır. ToMaster metodu uçtan uca gecikmenin yüksek olduğu görülmekle beraber bir veri toplama periyodunda düğümlerden iki defa veri alması nedeniyle daha veri yoğun uygulamalar için kullanışlı olduğu görülmektedir. Öte yandan 2Way metodunda ise çift yönlü veri aktarımı açısından özellikle veri yoğun ve hatta gerçek zamanlı olabilecek iletişime daha uygun olmakla beraber uçtan uca gecikme değerleri de düşüktür. Bu metodun tek dezavantajı her iki CLN’nin de SINK düğüme bağlı olması olarak görülebilir belki ama yedeklilik açısından bakıldığında bu durumun aslında kötü durum senaryolarında etkin bir çözüm yolu sunduğu da görülebilir.

Bu çalışmada TBL-MAC protokolünde, benzetim çalışmalarında 10, 20, 30, 40 ve 50 tüm düğüm sayılarında sadece 6 adet Token paketi kullanılarak iletişim hattının kurulması sağlanmıştır. Token yöntemi düğüm sayısından yada veri toplama metotlarından bağımsız olarak çalışmaktadır. Böylece az sayıda token paketi kullanılarak iletişim hattının kurulması sağlanmıştır.

DKAA’lar için tasarlanan OEK protokollerinin en önemli özelliklerinden biriside düğüm başarısızlığı durumlarına duyarlı olması gerekmektedir. TBL-MAC protokolünde ise herhangi bir düğüm ağdan düştüğünde, komşu düğümler kapsama alanını artırmak suretiyle iletişimin devamlılığını sağlamaktadır. Bu mekanizmanın TBL-MAC için, deneysel sonuçlar ile başarılı bir şekilde çalıştığı görülmüştür.

Yine aynı şekilde ağı hızlı organize olup iletişimin başlaması için TBL-MAC etkili ağa katılım mekanizmasına sahiptir. Bu mekanizma Token paketleri ile sağlanmaktadır. Sonuçlarda da görüldüğü üzere TBL-MAC protokolünde ağın oluşması tüm senaryolarda çok kısa sürelerde gerçekleşmiştir. Benzetim boyunca ağdan kopma olmadan iletişim devam etmiştir.

Sonuç olarak tüm bu yönleriyle, TBL-MAC OEK protokolünün literatüre etkin bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Öte yandan bu çalışmanın odağı kapsamında olmayıp gelecek çalışmalar için; geliştirilen protokolün ToMaster, ToSlave ve 2Way modları arasında ihtiyaç durumuna göre dinamik geçişler yapabilecek bir yapıya kavuşturulması ve çoklu düğüm hataları (hata patlamaları) karşısında protokolün davranışının geliştirilmesi düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Bitlis Eren Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından BEBAP2019.006 proje numarası ile desteklenmiştir. Bitlis Eren Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi’ne katkı ve desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

Referanslar

Ari, D., Cibuk, M., & Ağgün, F. (2018). A New Time Division Method for Linear Wireless Sensor Networks. In *1st INTERNATIONAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY SYMPOSIUM* (pp. 1166–1170). Batman, Turkey.

Caneva, D. De. (2010). A Synchronous and Deterministic MAC Protocol for Wireless Communications on Linear Topologies. *Int’l J. of Communications, Network and System Sciences*, 03(12), 925–933. <https://doi.org/10.4236/ijcns.2010.312126>

Chen, H., Tse, C. K., & Feng, J. (2009). Impact of topology on performance and energy efficiency in wireless sensor networks for source extraction. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 20(6), 886–897. <https://doi.org/10.1109/TPDS.2009.14>

Çibuk, M., Ari, D., Ağgün, F., & Budak, Ü. (2021). Investigation of failed node method to support healthy communication for linear wireless sensor networks. In *1st Advanced Engineering Days (AED)* (pp. 41–46). Mersin, Turkey. Retrieved from <http://aed.mersin.edu.tr/wp-content/uploads/2021/12/AED1.pdf>

- Du, S., Saha, A. K., & Johnson, D. B. (2007). RMAC: A Routing-Enhanced Duty-Cycle MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In *IEEE INFOCOM 2007 - 26th IEEE International Conference on Computer Communications* (pp. 1478–1486). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2007.174>
- Fang, C., Liu, H., & Qian, L. (2011). LC-MAC: An efficient MAC protocol for the long-chain wireless sensor networks. *Proceedings - 2011 3rd International Conference on Communications and Mobile Computing, CMC 2011*, 495–500. <https://doi.org/10.1109/CMC.2011.65>
- Jawhar, I., & Mohamed, N. (2009). A hierarchical and topological classification of linear sensor networks. In *2009 Wireless Telecommunications Symposium, WTS 2009*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/WTS.2009.5068941>
- Jiang, H., Wu, J., Chen, L., Chen, S., & Leung, H. (2009). A Reliable and High-Bandwidth Multihop Wireless Sensor Network for Mine Tunnel Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 9(11), 1511–1517. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2009.2022878>
- Karveli, T., Voulgaris, K., Ghavami, M., & Aghvami, A. H. (2009). DiS-MAC: A MAC protocol for sensor networks used for roadside and highway monitoring. *2009 International Conference on Ultra Modern Telecommunications and Workshops*. <https://doi.org/10.1109/ICUMT.2009.5345439>
- Lai, T. T. Te, Chen, W. J., Li, K. H., Huang, P., & Chu, H. H. (2012). TriopusNet: Automating wireless sensor network deployment and replacement in pipeline monitoring. *IPSN'12 - Proceedings of the 11th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, 61–71. <https://doi.org/10.1145/2185677.2185686>
- Lee, E., Jwa, J. W., & Kim, H. (2013). MFT-MAC: A duty-cycle MAC protocol using multiframe transmission for wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/858765>
- Low, K. S., & Talampas, M. C. R. (2017). Wireless sensor networks for intelligent transportation applications: A survey. *Industrial Wireless Sensor Networks: Applications, Protocols, and Standards*, 47–78. <https://doi.org/10.1201/b14072>
- Martin, K. M., & Paterson, M. B. (2009). Ultra-lightweight key predistribution in wireless sensor networks for monitoring linear infrastructure. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 5746 LNCS(May 2014), 143–152. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03944-7_11
- Nordic Semiconductor. (n.d.). Nordic Semiconductor. Retrieved October 28, 2021, from <https://www.nordicsemi.com/-/media/Publications/WQ-Product-guide/Wireless-Q---Q1---Product-Guide.pdf?la=en&hash=55195302B5331ECA0F7D841B58D7F97DCC945F26>
- Riverbed Modeler. (n.d.). Riverbed Modeler. Retrieved April 9, 2021, from <https://www.riverbed.com/gb/products/steelcentral/steelcentral-riverbed-modeler.html>
- Saeed, H., Ali, S., Rashid, S., Qaisar, S., & Felemban, E. (2014). Reliable monitoring of oil and gas pipelines using wireless sensor network (WSN) - REMONG. *Proceedings of the 9th International Conference on System of Systems Engineering: The Socio-Technical Perspective, SoSE 2014*, 230–235. <https://doi.org/10.1109/SYSOSE.2014.6892493>
- Sun, T., Yan, X., & Yan, Y. (2013). A chain-type wireless sensor network in greenhouse agriculture. *Journal of Computers (Finland)*, 8(9), 2366–2373. <https://doi.org/10.4304/jcp.8.9.2366-2373>
- Sun, Y., Du, S., Gurewitz, O., & Johnson, D. B. (2008). DW-MAC: a low latency, energy efficient demand-wakeup MAC protocol for wireless sensor networks. *Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, 53–62. <https://doi.org/10.1145/1374618.1374627>
- Varshney, S., Kumar, C., & Swaroop, A. (2015). Linear sensor networks: Applications, issues and major research trends. *International Conference on Computing, Communication and Automation, ICCCA 2015*, 446–451. <https://doi.org/10.1109/CCAA.2015.7148418>



Chlorella vulgaris Biyokütle Üretiminde Kültür Şartlarının Optimizasyonu

Optimization of Culture Conditions in Production of *Chlorella vulgaris* Biomass

Mehmet Kalender¹ , Sümeyye Bürkev¹ 

¹Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, 23100 Elazığ, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 07/01/2022

Kabul / Accepted: 17/03/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Bu çalışmada, *C. vulgaris* mikroalgal biyokütle üretiminin optimizasyonu incelenmiştir. Optimizasyon çalışmaları Design Expert programında Cevap Yüzey Metodu (RSM) ile oluşturulan deneysel çalışma tablosuna göre gerçekleştirilmiştir. Her bir deney 250 mL'lik erlenlerde 12 saat aydınlık (3000 lüx) 12 saat karanlık ve 25 °C'de yürütülmüştür. RSM deneylerinde bağımsız değişkenler olarak kültür hacmi, inokülasyon oranı ve kültür süresi; cevap değişkeni olarak ise üretilen algal biyokütle konsantrasyonu seçilmiştir. Algal biyokütle konsantrasyonları UV-Visible spektroskopisi ile ölçülmüştür. Optimizasyon çalışmaları sonucunda mikroalgal biyokütle üretimini en iyi temsil eden modelin kuadratik olduğu belirlenmiştir. Kuadratik model için ANOVA testlerinden geliştirilen model üzerinde çalışılan üç bağımsız değişkenin de önemli olduğu görülmüştür. Bununla beraber, inokülasyon oranının diğer bağımsız değişkenlere göre daha az etkili olduğu, hatta bu parametrenin kuadratik etkisinin model üzerinde etkili olmadığı saptanmıştır. Model üzerinde en etkili bağımsız değişkenin ise süre olduğu sonucuna ulaşılmıştır. RSM analizlerinden model üzerinde kültür hacmi-inokülasyon oranı ikili etkileşiminin önemli olduğu gözlenmiştir. İkili etkileşim grafiğinden çalışılan aralıkta yüksek inokülasyon oranı ve düşük kültür hacmi değerlerinde algal biyokütle konsantrasyonunun yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. RSM ile ileri sürülen optimum *C. vulgaris* biyokütle üretim şartları 85,693 mL kültür hacmi, %12,152 inokülasyon oranı ve 16,952 gün süre olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

"Mikroalgal biyokütle üretimi, *C. vulgaris*, Optimizasyon, RSM"

Abstract

In this work, optimization of microalgal biomass production using *C. vulgaris* was investigated. The optimization experiments were carried out according to the working table formed by Response Surface Method (RSM). Each experiment was conducted in 250 mL flasks with a 12-hour periods in the light (3000 lux)/dark cycle and at 25 °C. The culture volume, the inoculation ratio, and the culture time were selected as the independent variables. The response variable was the algal biomass concentration. The concentration of algal biomass was measured using UV-Visible spectroscopy method. As a result of the optimization studies, it was determined that the best model representing microalgal biomass production is quadratic source. From ANOVA tests for the quadratic model, it was observed that the three independent variables were also important on the model developed. However, it was determined that the inoculation ratio was less effective than other independent variables, and even, the quadratic effect of this parameter was not effective on the model. It was concluded that the most effective independent variable on the model was time. From RSM analyses, it was founded that the binary interaction of the culture volume-the inoculation ratio was effective on the model. The 3D graphs of this binary interaction showed that the algal biomass concentration was high at high inoculation ratio and at low culture volume in the working range. Optimum *C. vulgaris* biomass production conditions suggested by RSM were determined as 85,693 mL culture volume, 12,152% inoculation ratio, and 16,952 days.

Key Words

"Microalgal biomass production, *C. vulgaris*, Optimization, RSM"

1. Giriş

İklim değişimi dünyada çok ciddi zararlara yol açan çevresel bir tehdittir. Bu tehdit, atmosfer ve okyanusların ısınması, buzulların eriyerek yok olması, deniz seviyesinin yükselmesi, daha uzun periyotlarda ve daha yoğun frekanslarda ısı dalgalarının oluşması şeklinde gerçekleşmektedir (Moreira ve Pires, 2016). Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, son otuz yıldır iklim değişikliği ile mücadele kapsamında sera gazı emisyonlarının azaltılması ve fosil yakıtlara alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarının araştırılması gibi birçok önleme başvurulmaktadır. Bunun son örneği olan Avrupa Yeşil Mutabakatına göre 2050 yılına kadar sera gazı salınımının sıfıra indirilmesi hedeflenmektedir (Web-1). CO₂ en önemli sera gazı etkisi gösteren gazlardan biri olup küresel CO₂ salınımı endişe verici boyutlara ulaşmıştır. İnsan kaynaklı CO₂ salınımının yılda yaklaşık 40 milyar ton olduğu rapor edilmiştir (Kupgan vd., 2018).

Tüm bu olumsuzluklardan dolayı enerji santralleri, ulaşım sektörü gibi birçok kaynaktan salınan CO₂'i tutma ve depolama teknolojileri geliştirilmiştir. Bu teknikler, alkanol-amin-su çözeltileri ile absorpsiyon, adsorpsiyon (fiziksel ya da kimyasal), kriyojenik distilasyon, membran ayırma teknolojisi olarak özetlenebilir (Gong vd., 2017; Sepahvand vd., 2020). Karmaşık proses yapısı, depolama yetersizliği ve proses pahalılığı gibi bazı dezavantajlara sahip bu CO₂ uzaklaştırma yöntemlerine ek olarak çeşitli alternatifler üzerine yoğun çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bitkilerin doğal fotosentez süreciyle CO₂ tutma ihtiyacına benzer sistemlere her geçen gün daha da ilgi artmaktadır (Kativu, 2011). Algler taksonomik olarak bir bitki türü olmasa da toplam fotosentez işleminin %50'den fazlasını gerçekleştirdiğinden dolayı (Moroney, 2009), CO₂ uzaklaştırmada kullanılacak teknikler arasında yerini almaya başlamıştır. Pahalı bir teknik olmasına rağmen, alglerle karbon uzaklaştırma prosesi meydana gelen biyokütlenin biyodizel ve biyoetanol gibi fosil yakıtlara alternatif yenilenebilir enerji üretiminde kullanılabilmesi nedeniyle oldukça avantajlıdır (Alami vd., 2021; Ho vd., 2013).

Algler polifiletik kohezyonsuz fotosentetik organizmalardır (Barsanti ve Gualtieri, 2014). Yapılan bazı çalışmalarda alg yapısında 12 aminoasit içeren protein, karbonhidrat, lipid, vitaminler (A, B1, B2, B6, B12, E ve K) ve mineraller (Fe, Ca, K, P, Mn ve Mg) bulunduğu ve dünyada yaklaşık olarak 17000 alg türünün olduğu rapor edilmiştir. Bunlardan 9000'i makroalg diğerleri de mikroalg olarak sınıflandırılmaktadır (Dissa vd., 2010; Oliveira vd., 2010; Oliveira vd., 2009). Mikroalgler hızlı büyüme, yaşamlarını sürdürebilmeye geniş çevre koşulları, ekilebilir arazi gerektirmeme ve tuzlu suda bile büyüme gibi birçok avantaja sahiptir. Mikroalgler, farklı metabolizmalar sergileyebilen çok çeşitli bir organizma grubudur. En yaygın mikroalg yetiştirme yöntemi, karbon kaynağı olarak CO₂ ve enerji kaynağı olarak güneş ışığı kullanan ototrofik büyümedir (Jia vd., 2014; Yang vd., 2014). Mikroalg biyokütle üretiminde kullanılan sistemler, açık havuz ve kapalı fotobiyoreaktör sistemleri olmak üzere iki grupta incelenebilir. Bu iki sistemin birbirine karşı bazı avantaj ve dezavantajları vardır (Brennan ve Owende, 2010). Kapalı biyoreaktör sistemleri ışıktan daha iyi yararlanma, yüksek biyokütle üretimi kontaminasyon ve su kaybının az oluşu gibi avantajlara sahipken, açık havuzlarda üretim yatırım ve işletme maliyeti açısından daha ekonomiktir. Mikroalg üretim proseslerinde etkin olan abiyotik işletme parametreleri: ışık, sıcaklık, fotoperiyot, besin tuzu, oksijen, CO₂, pH, tuzluluk, toksik bileşenler ve karıştırma. Patojenler, virüs, bakteri, mantar, istenmeyen alg türleri ve inokülasyon oranı ise büyümeyi etkileyen biyotik faktörlerdir (Aydın, 2019).

CO₂ fiksasyonunda (*Chlorella kessleri*, *Spirulina*, *Scenedesmus obliquus*, *Chlorella vulgaris*, *Pseudokirchneriella subcapitata*, *cyanobacteria Synechocystis salina*, *Microcystis aeruginosa*, *Chlorella fusca*) ve biyoenerji üretiminde (*C. vulgaris*, *Nannochloropsis sp.*, *Desmodesmus sp* and *Heterochlorella sp*) kullanılan çok sayıda mikroalg bulunmaktadır. Bu mikroalgler arasında *C. vulgaris*'in hem CO₂ fiksasyonu hem de biyoyakıt üretiminde kullanılabilmesi gösterilmiştir. Tek hücreli yeşil alg sınıfındaki *C. vulgaris* dayanıklılık, yüksek lipid içeriği, miksotrofik büyüme, farklı kültür ortamlarına kolay adaptasyon ve ağır metal seviyelerine tolerans özelliklerine sahiptir (Ayatollahi vd., 2021). *C. vulgaris* ile gerek CO₂ yakalama ve gerekse yenilenebilir enerji üretiminde lipid ve şeker kaynağı olarak kullanıma yönelik yapılan çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Anjos vd., 2013; Ayatollahi vd., 2021; Azhand vd., 2020; Sadeghizadeh vd., 2017).

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji başta olmak üzere birçok alanda çevre dostu hammadde kaynağı olarak değerlendirilebilecek *C. vulgaris*' in kültüründe etkili olan bazı deneysel parametrelerin optimize edilmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal Metot

2.1. Alg Kültür Çalışmaları

C. vulgaris türü Fırat Üniversitesi Biyoloji Bölümünden temin edilmiş olup, izole işlemi Elazığ Keban Baraj Gölü'nden toplanan örneklerle yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan *C. vulgaris* örnekleri litrede 0,2 g KNO₃, 0,02 g K₂PO₄, 0,02 g MgSO₄.7H₂O ve 5 mL iz element çözeltisi içeren ortamda kültür edilmiştir. İz element çözeltisi ise litrede 0,0001 g ZnSO₄.7H₂O, 0,002 g MnSO₄.4H₂O, 0,01 g H₃BO₃, 0,001 g Co(NO₃)₂.6H₂O, 0,00005 g CuSO₄.5H₂O, 0,7 g FeSO₄.7H₂O ve 0,8 g EDTA içermektedir. Kültür deneyleri 250 mL lik erlenlerde gerçekleştirilmiştir. 100 mL'lik hacme sahip besiyerinde %10 inokülasyonla başlatılan kültür çalışmaları, ortam pH'sında (yaklaşık olarak 8), 12 saat 3000 lüks ışık şiddetinde aydınlatma ve 12 saat karartma ile 25 °C'de sürdürülmüştür. Kültür deneylerinin 7. Gününde kültür ortamından alınan örnekte Sedgwick-Rafter yöntemiyle hücre sayımı gerçekleştirilmiştir (McAlice, 1971). Yapılan sayım sonucunda 1 mL örnekte 1,536x10⁵ alg hücresi olduğu belirlenmiştir. 7. Gün sonunda stok kültür için alınan belirli hacimdeki alg hafif aydınlık bir ortamda 50 mL'lik eppendorf tüpler içinde muhafaza edilmiştir. Bir kısım stok kültür ise daha uzun süre saklama amacıyla -80 °C'deki soğutucuya konulmuştur. Kültür süresince topraklanmanın önüne geçmek için kültür ortamı her gün 1 defa yavaşça çalkalanmıştır.

2.2. Optimizasyon Çalışmaları

C. vulgaris biyokütle üretimi için optimizasyon deneyleri, bir önceki bölümde anlatılan besiyeri bileşiminde hazırlanan kültür ortamında yürütülmüştür. Optimizasyon çalışmaları Design Expert programı ile Cevap-Yüzey metodu (RSM) ve merkezi kompozit dizayn (CCD) kullanarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, kültür hacmi, inokülasyon oranı ve süre bağımsız değişkenler olarak seçilmiştir. Bağımsız değişkenler seçilirken alg üretimi optimizasyonu üzerine yapılan literatür çalışmalarından faydalanılmıştır (Kong vd., 2012; Ryu vd., 2012). Cevap değişkeni olarak ise üreyen ve spektrofotometrik yöntemle ölçülen biyokütle konsantrasyonu takip edilmiştir. Kültür ortamından alınan örneklerin Shimadzu Marka 1800 Model UV-Visible Spectrofotometrede 690 nm dalga boyundaki absorbans değerleri ölçülmüştür. Absorbans değerleri literatürde (Kazeem vd., 2018) aynı dalga boyunda *C. vulgaris* için oluşturulan kalibrasyon doğrusundan faydalanarak g/L cinsinden konsantrasyon değerlerine dönüştürülmüştür. Bu amaçla kullanılan kalibrasyon doğrusunun denklemi aşağıda verilmiştir:

$$\text{Biyokütle konsantrasyonu } \left(\frac{g}{L}\right) = 0,2611 * \text{Absorbans değeri} + 0,0208 \quad (1)$$

RSM-CCD ile oluşturulan bağımsız değişkenlerin sembolleri ve çalışma aralıkları Tablo 1’de; deneysel çalışma tablosu ise Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. *C. vulgaris* biyokütle üretimi için RSM-CCD’den elde edilen bağımsız değişkenlerin sembolleri ve çalışma aralıkları

Sembol	Bağımsız değişken	-α	-1	0	+1	+ α
A	Kültür hacmi (mL)	30	84,28	165	245,27	300
B	İnokülasyon oranı (% , hacimsel)	2	4,64	8,5	12,36	15,00
C	Süre (gün)	2	5,85	11,5	17,15	21

Tablo 2. RSM-CCD ile oluşturulan deneysel çalışma tablosu

Deney No	A:kültür hacmi (mL)	B:inokülasyonoranı (%)	C: süre (gün)
1	85	4,63	5,85
2	245	4,63	5,85
3	85	12,36	5,85
4	245	12,36	5,85
5	85	4,63	17
6	245	4,63	17
7	85	12,36	17
8	245	12,36	17
9	30	8,5	11,5
10	300	8,5	11,5
11	165	2	11,5
12	165	15	11,5
13	165	8,5	2
14	165	8,5	21
15	165	8,5	11,5
16	165	8,5	11,5
17	165	8,5	11,5
18	165	8,5	11,5
19	165	8,5	11,5
20	165	8,5	11,5

3. Bulgular ve Tartışma

C. vulgaris biyokütle üretim şartlarından kültür hacmi, inokülasyon oranı ve süreyi optimize etmek için gerçekleştirilen bu çalışmada, RSM-CCD tasarımı uygulanmıştır. Cevap değişkeni olarak mikroalgal biyokütle konsantrasyonu seçilmiştir. RSM analizi sonucunda Lineer, 2FI, kuadratik ve kübik modelleri arasında p (0,0022) ve R² (0,8966) değerlerine göre en uygun modelin kuadratik olduğu belirlenmiştir. P-değeri bir hipotezin anlamlılık değerini ölçer ve bu değer 0,05'den küçükse ileri sürülen hipotezin doğruluğunu kanıtlar (Bohlouli vd., 2016). 0,05'den küçük p değeri hipotez doğruluğunun en fazla %20 hata ile gerçekleştiğinin göstergesidir. RSM ile anlamlılık açısından kuadratik modele en yakın olan lineer modele ait p-değerinin 0,0001'den küçük olduğu, fakat R² değerinin ise 0,7007 olduğu görülmüştür. Bu nedenle, RSM'nin de önerdiği kuadratik model ile ANOVA testi gerçekleştirilmiştir. *C. vulgaris* biyokütle üretimi için Tablo 2'de verilen çalışma tablosuna göre yapılan deneyler sonucunda elde edilen RSM modelinin varyans analizi (ANOVA) sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'ten görüldüğü üzere ileri sürülen model 29,06 olan F değeri ve <0,0001 olan p-değeri prob>F'ne sahiptir. Literatür çalışmalarında da gösterildiği gibi p-değeri prob>F 0,05'ten küçük ise modelin anlamlı olduğu bilinmektedir (Öz ve Kalender, 2021). Görüldüğü gibi, *C. vulgaris* biyokütle üretimi için RSM ile gerçekleştirilen optimizasyon sonucu anlamlıdır. 0,05'ten küçük olan p-değeri prob>F ile kültür hacmi (A), inokülasyon oranı (B), süre (C) bağımsız değişkenleri ile kültür hacmi ve sürenin kuadratik etkilerinin de model üzerinde etkili olduğu ANOVA testinden elde edilen diğer sonuçlardır. İkili parametre etkileşim sonuçlarından kültür hacmi-inokülasyon oranının (A-B) önemli olduğu anlaşılmaktadır. Özetle, RSM modelinin ANOVA analizlerinden mikroalgal biyokütle üretimi için A, B, C, AB, A² ve C² değişkenlerinin model üzerinde önemli parametreler olduğu gözlemlenmiştir. *Pavlova lutheri* mikroalg üretiminin optimizasyonunun incelendiği bir çalışmada sıcaklık, tuzluluk, ışık yoğunluğu pH ve süre parametreleri bağımsız değişken olarak seçilmiş ve sonuç olarak sıcaklık ve süre değişkenlerinin mikroalg üretiminde etkili olduğu gözlemlenmiştir (Ryu vd., 2012). *C. vulgaris* FSP-E ile karbonhidrat üretiminin optimize edildiği bir başka çalışmada inokülasyon oranı ve ışık şiddetinin etkisi araştırılmış ve her iki parametrenin üretimde etkili olmasına karşın ışık şiddetinin daha önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Ho vd., 2013). *C. vulgaris* kullanarak atıksulardan fosfat ve nitrat uzaklaştırılmasının optimize edildiği bir başka çalışmada gelişen alg kültür ortamında sıcaklık, pH ve havalandırma hızı etkileri incelenmiş ve sürenin alg kültürasyonunda etkili olduğu görülmüştür (Sabeti vd., 2019). Sürenin ve kuadratik etkisinin mikroalg biyokütle üretimi üzerinde çalışılan diğer parametrelere göre (kültür hacmi ve inokülasyon oranı) belirgin şekilde daha önemli bir parametre olması, bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçların literatür çalışmalarıyla uyumlu olduğunun göstergesidir. Tablo 3'ten elde edilen sonuçlara göre vurgulanması gereken bir diğer önemli noktanın inokülasyon oranının mikroalgal biyokütle üretimi üzerindeki etkisinin diğer parametrelere göre en düşük olduğudur. İnokülasyon oranının kuadratik etkisinin model üzerinde etkili olmadığı da görülmektedir.

Tablo 3'teki uyum eksikliği değeri için elde edilen F değeri (0,83), saf hataya göre uyum eksikliğinin önemli olmadığını gösterir. Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir "uyum eksikliği F-değerinin" oluşma olasılığı %61,47'dir. Anlamlı olmayan bir uyum eksikliği model uyumluluğu için istenen bir durumdur. ANOVA testlerinde Adj R² ve Pred R² arasındaki farkın (0,086) 0,2'den düşük olması model uyumluluğunun bir başka göstergesidir. ANOVA veri analizinde sinyal gürültüsünü temsil eden uygunluk keskinlik değerinin 4'den büyük olması istenir. Bu çalışmada 21,579 olan uygun keskinlik değeri modelin uygun olduğunu kanıtlar. ANOVA sonucu gerçek değerler cinsinden biyokütle konsantrasyonunun bağımsız değişkenlere bağlılığını veren eşitlik aşağıdaki denklemlerle verilmiştir:

Mikroalgal biyokütle konsantrasyonu (g/L)

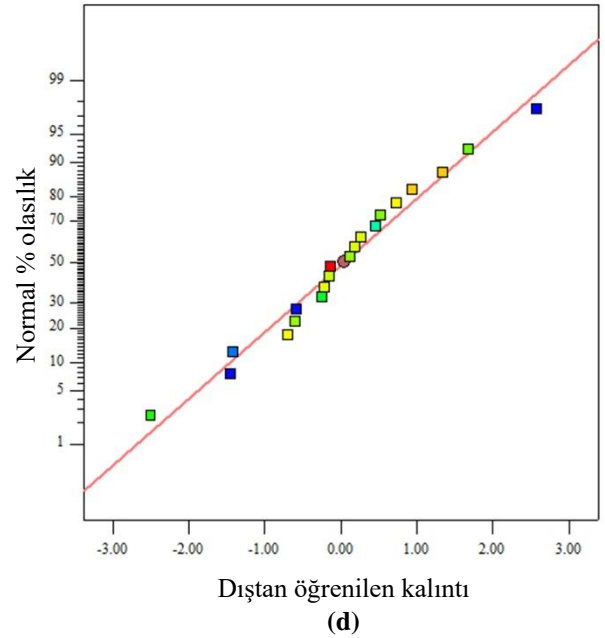
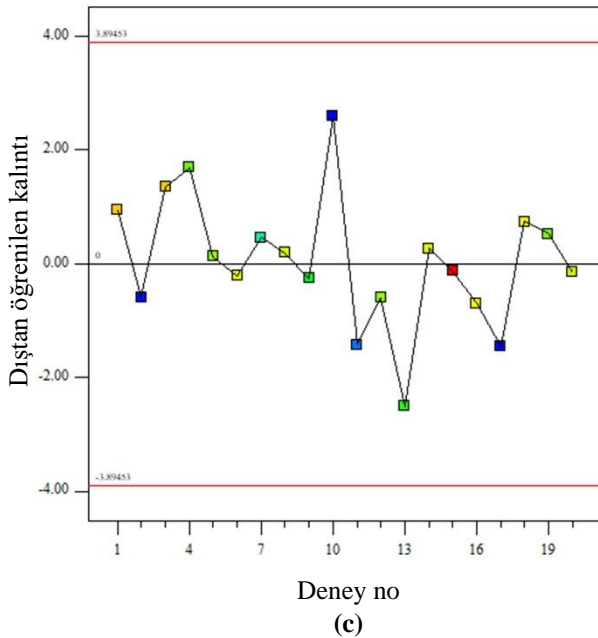
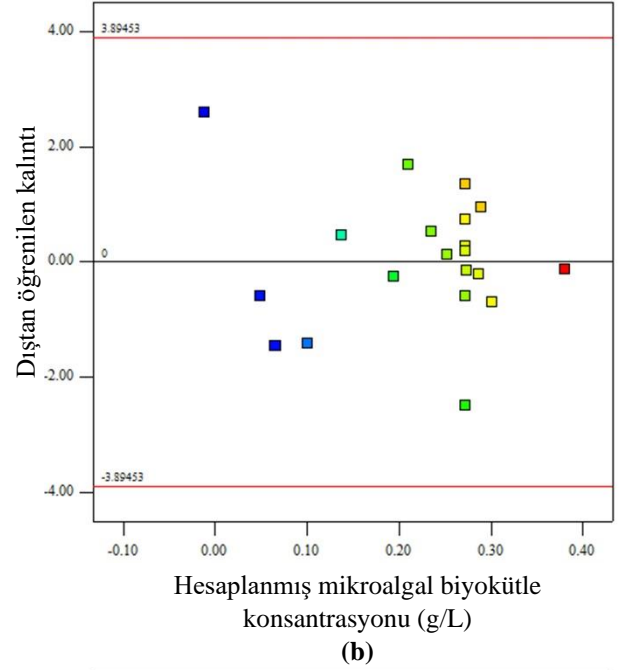
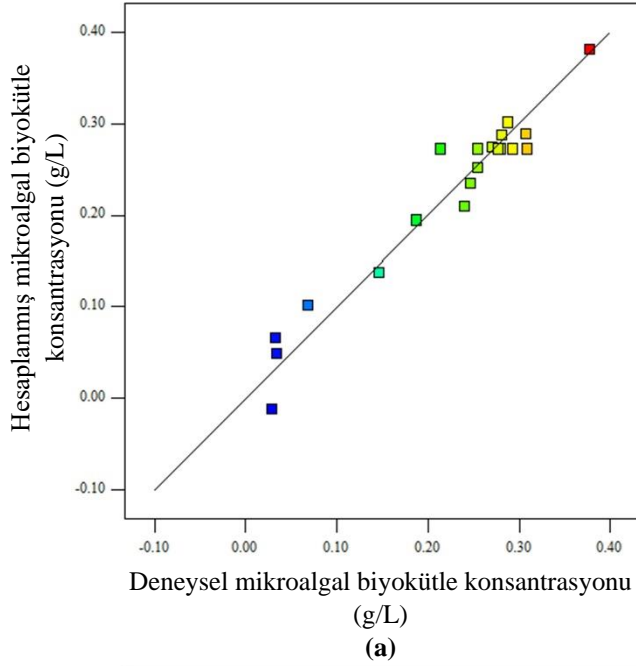
$$= -0,267 - 1,209 \times 10^{-3} A + 0,019 B + 0,048 C - 8,914 \times 10^{-5} AB - 3,073 \times 10^{-6} A^2 - 1,382 \times 10^{-3} C^2 \quad (2)$$

Tablo 3. *C. vulgaris* biyokütle üretimi optimizasyonu için RSM modelinin ANOVA tablosu

Kaynak	Karelerin toplamı	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri prob>F	
Model	0,19	0,032	31,75	<0,0001	Anlamlı
A- Kültür hacmi	0,028	0,028	28,02	0,0001	
B-İnokülasyon oranı	4,999x10 ⁻³	4,999x10 ⁻³	5,02	0,0431	
C-Süre	0,12	0,12	119,17	<0,0001	
AB	6,118x10 ⁻³	6,118x10 ⁻³	6,15	0,0276	
A ²	5,707x10 ⁻³	5,707x10 ⁻³	5,74	0,0324	
C ²	0,028	0,028	28,45	0,0001	
Uyum Eksikliği	7,365x10 ⁻³	9,206x10 ⁻⁴	0,83	0,6147	Anlamlı değil
Saf Hata	5,568x10 ⁻³	1,114x10 ⁻³			

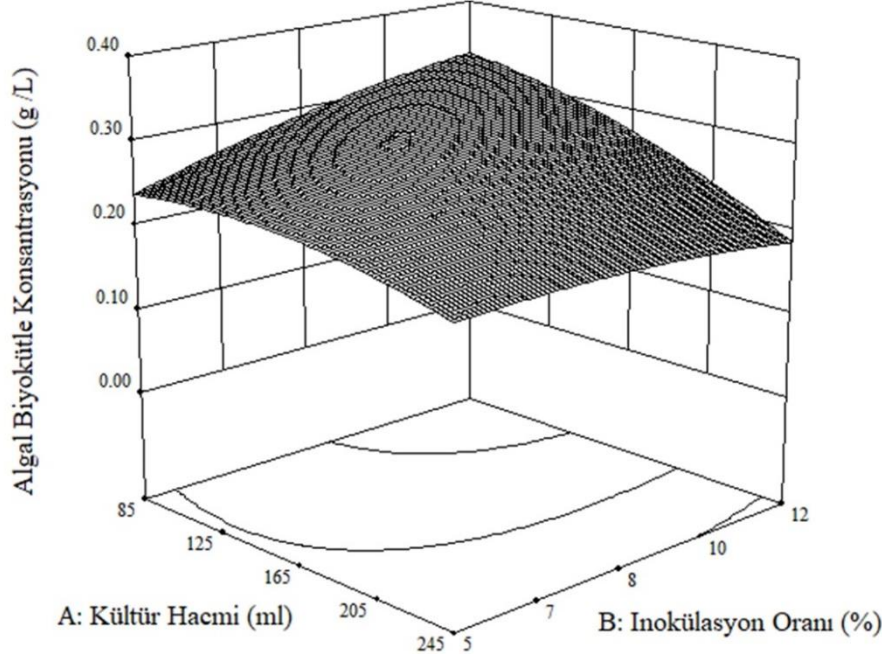
Standart sapma=0,032, R²=0,9361, Adj R²=0,9066, Pred R²=0,8203, Uygun keskinlik=21,579

ANOVA test sonuçlarından elde edilen modellerin yeterliliğini ve güvenilirliğini kontrol etmek için kalıntı ve normal olasılık yaygın olarak kullanılmaktadır (Pashaei vd., 2020). Bu amaçla ANOVA testinden elde edilen deneysel-hesaplanmış mikroalgal biyokütle konsantrasyonları, dıştan öğrenilen kalıntı-mikroalgal biyokütle konsantrasyonu, deney no-dıştan öğrenilen kalıntı ve dıştan öğrenilen kalıntı-normal dağılım olasılık grafikleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1a'dan görüldüğü gibi deneysel ve model ile hesaplanmış mikroalgal biyokütle konsantrasyon değerleri diagonale yakındır. Şekil 1b ve 1c kalıntı değerlerinin x eksenini boyunca $+3,894$ ve $-3,894$ arasında rastgele bir nokta dağılımının sergilendiğini gösterir. Bu durum cevap aralığı boyunca varyansın değişmediği anlamına gelir (Öz ve Kalender, 2021). Şekil 1d'de gösterilen normal dağılım olasılık grafiğindeki noktaların lineer bir hat olması ve bu grafikteki hataların normal dağılım sergilemesi nedenleriyle, geliştirilen modelin yeterli olduğu söylenebilir.

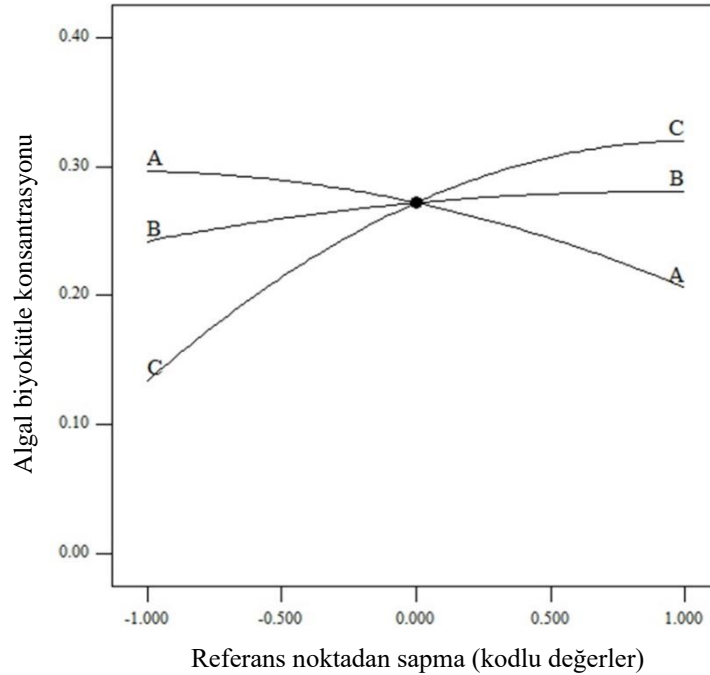


Şekil 1. RSM ile elde edilen bazı istatistiksel grafikler: (a) deneysel ve hesaplanmış mikroalgal biyokütle konsantrasyonlarının karşılaştırılması, (b) hesaplanmış mikroalgal biyokütle konsantrasyonu ile dıştan öğrenilen kalıntı değişimi, (c) deney no ile dıştan öğrenilen kalıntı değişimi, (d) dıştan öğrenilen kalıntı ile normal % olasılık değişimi.

Algal biyokütle üretiminin optimizasyonu için RSM'den elde edilen ve model üzerinde etkili ikili etkileşim parametresi olan kültür hacmi-inokülasyon oranına ait 3D grafiğı Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2'den düşük kültür hacim değerlerinde biyokütle üretiminin daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, optimum noktanın inokülasyon oranının yüksek, kültür hacminin ise düşük değerlerinde elde edilebileceğı Şekil 2'den söylenebilir. RSM analizleri sonucunda oluşturulan pertürbasyon grafiğı ise Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3'ten kültür hacmi (A) ve süre (C) parametrelerinin model üzerinde etkili olduğu fakat inokülasyon oranının görece daha az etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 2. *C. vulgaris* mikroalgal biyokütle üretimine ait kültür hacmi-inokülasyon oranı ikili etkileşimi için 3D grafiğı



Şekil 3. *C. vulgaris* üretimi üzerine optimize edilen parametrelerin pertürbasyon grafiğı

RSM analizleri sonucunda elde edilen model ile ileri sürülen optimum *C. vulgaris* biyokütle üretim şartları 85,693 mL kültür hacmi, %12,152 inokülasyon oranı ve 16,952 gün süre olarak belirlenmiştir.

4. Sonuç

C. vulgaris biyokütle üretiminde kültür hacmi, inokülasyon oranı ve üretim süresinin RSM ile optimizasyonu incelenmiştir. Cevap değişkeni olarak mikroalgal biyokütle konsantrasyonu seçilmiştir. Gerçekleştirilen istatistiksel hesaplamalar sonucunda geliştirilen modelin mikroalgal biyokütle üretimini yeterli seviyede temsil ettiği bulunmuştur. Bu sonuca ulaşmadaki belirleyici argümanlardan biri olan deneysel ve hesaplanan algal biyokütle konsantrasyon grafiği diyagonale yakındır. Hesaplanan algal biyokütle konsantrasyonu ile dıştan öğrenilen kalıntı grafiklerinde sabit varyans elde edilmiştir. Dıştan öğrenilen kalıntı % dağılım grafiğinden verilerin istatistiksel olarak normal dağılım sergilediği belirlenmiştir. ANOVA sonuçlarından incelenen tüm bağımsız değişkenlerin 0,05'den düşük p-değerleri ile geliştirilen model üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir. Bununla beraber, en düşük p-değeri ile kültür süresi model üzerinde en önemli parametredir. Kültür süresini önem sırasına göre kültür hacmi izlemektedir. İnokülasyon oranı ise çalışılan bağımsız değişkenler arasında etkisi en az olan değişken olarak belirlenmiştir. Kuadratik etkilerde inokülasyon oranının model üzerinde etkisi olmadığı ulaşılan bir başka önemli sonuçtur. Optimum üretim şartlarına ulaşmaya kadar kültür hacmi artışının biyokütle üretimini negatif yönde etkilediği, kültür süresi artışının ise pozitif yönde etkilediği görülmüştür. İkili parametre değişimlerinden sadece kültür hacmi-inokülasyon oranının modelde etkili olduğu gözlenmiştir. Bu konu üzerine gelecekte yapılacak çalışmalarda, mikroalgal *C. vulgaris* biyokütle üretiminin sabit kültür yerine alternatif tekniklerle yapılması ve bu tekniklerde üretim şartlarının optimize edilmesi önerilmektedir.

Teşekkür

Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği *C. vulgaris* örneklerinin temininde sağladığı katkıdan dolayı Fırat Üniversitesi Biyoloji Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Ahmet Kadri ÇETİN'e teşekkürlerimizi sunarız.

Referanslar

- Alami, A. H., Alasad, S., Ali, M. & Alshamsi, M. (2021). Investigating Algae for Co2 Capture and Accumulation and Simultaneous Production of Biomass for Biodiesel Production. *Science of the Total Environment*, 759, 143529.
- Anjos, M., Fernandes, B. D., Vicente, A. A., Teixeira, J. A. & Dragone, G. (2013). Optimization of Co2 Bio-Mitigation by *Chlorella Vulgaris*. *Bioresource technology*, 139, 149-154.
- Ayatollahi, S. Z., Esmailzadeh, F. & Mowla, D. (2021). Integrated Co2 Capture, Nutrients Removal and Biodiesel Production Using *Chlorella Vulgaris*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 104763.
- Aydın, G. Ş. (2019). Mikroalg Teknolojisi Ve Çevresel Kullanımı. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 4(1), 81-92.
- Azhand, N., Sadeghizadeh, A. & Rahimi, R. (2020). Effect of Superficial Gas Velocity on Co2 Capture from Air by *Chlorella Vulgaris* Microalgae in an Airlift Photobioreactor with External Sparger. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 104022.
- Barsanti, L. & Gualtieri, P. (2014). *Algae: Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology (Second Edi)*. Crc Press. In).
- Bohlouli, A., Afshar, M. R., Aboutalebi, M. & Seyedein, S. (2016). Optimization of Tungsten Leaching from Low Manganese Wolframite Concentrate Using Response Surface Methodology (Rsm). *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 61, 107-114.
- Brennan, L. & Owende, P. (2010). Biofuels from Microalgae—a Review of Technologies for Production, Processing, and Extractions of Biofuels and Co-Products. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(2), 557-577.
- Dissa, A., Desmorieux, H., Savadogo, P., Segda, B. & Koulidiati, J. (2010). Shrinkage, Porosity and Density Behaviour During Convective Drying of *Spirulina*. *Journal of food Engineering*, 97(3), 410-418.
- Gong, X., Wang, Y. & Kuang, T. (2017). Zif-8-Based Membranes for Carbon Dioxide Capture and Separation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(12), 11204-11214.

- Ho, S.-H., Huang, S.-W., Chen, C.-Y., Hasunuma, T., Kondo, A. & Chang, J.-S. (2013). Characterization and Optimization of Carbohydrate Production from an Indigenous Microalga *Chlorella Vulgaris* Fsp-E. *Bioresource technology*, 135, 157-165.
- Jia, Z., Liu, Y., Daroch, M., Geng, S. & Cheng, J. J. (2014). Screening, Growth Medium Optimisation and Heterotrophic Cultivation of Microalgae for Biodiesel Production. *Applied biochemistry and biotechnology*, 173(7), 1667-1679.
- Kativu, E. (2011). Carbon Dioxide Absorption Using Fresh Water Algae and Identifying Potential Uses of Algal Biomass. Faculty of Engineering and the Built Environment, University of the Witwatersrand, Johannesburg.
- Kazeem, M., Hossain, S., Hossain, M. & Razzak, S. (2018). Application of Central Composite Design to Optimize Culture Conditions of *Chlorella Vulgaris* in a Batch Photobioreactor: An Efficient Modeling Approach. *Chemical Product and Process Modeling*, 13(4).
- Kong, W.-B., Hua, S.-F., Cao, H., Mu, Y.-W., Yang, H., Song, H. & Xia, C.-G. (2012). Optimization of Mixotrophic Medium Components for Biomass Production and Biochemical Composition Biosynthesis by *Chlorella Vulgaris* Using Response Surface Methodology. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 43(3), 360-367.
- Kupgan, G., Abbott, L. J., Hart, K. E. & Colina, C. M. (2018). Modeling Amorphous Microporous Polymers for Co₂ Capture and Separations. *Chemical reviews*, 118(11), 5488-5538. doi: 10.1021/acs.chemrev.7b00691
- McAlice, B. J. (1971). Phytoplankton Sampling with the Sedgwick-Rafter Cell 1. *Limnology and Oceanography*, 16(1), 19-28.
- Moreira, D. & Pires, J. C. (2016). Atmospheric Co₂ Capture by Algae: Negative Carbon Dioxide Emission Path. *Bioresource technology*, 215, 371-379. doi: 10.1016/j.biortech.2016.03.060
- Moroney, J. V. (2009). Algal Photosynthesis. In eLS, John Wiley & Sons, 1-7.
- Oliveira, E. G., Duarte, J. H., Moraes, K., Crexi, V. T. & Pinto, L. A. (2010). Optimisation of *Spirulina Platensis* Convective Drying: Evaluation of Phycocyanin Loss and Lipid Oxidation. *International journal of food science & technology*, 45(8), 1572-1578.
- Oliveira, E. G., Rosa, G. S., Moraes, M. A. & Pinto, L. A. A. (2009). Characterization of Thin Layer Drying of *Spirulina Platensis* Utilizing Perpendicular Air Flow. *Bioresource technology*, 100(3), 1297-1303.
- Öz, Y. E. & Kalender, M. (2021). Optimization of Bacterial Cellulose Production from Sugar Beet Molasses by *Gluconacetobacter Xylinus* Nrrl B-759 in Static Culture. *Cellulose Chem. Technol.*, 55(9-10), 1051-1060.
- Pashaei, H., Ghaemi, A., Nasiri, M. & Karami, B. (2020). Experimental Modeling and Optimization of Co₂ Absorption into Piperazine Solutions Using Rsm-Ccd Methodology. *ACS omega*, 5(15), 8432-8448.
- Ryu, B., Kang, K.-H., Ngo, D.-H., Qian, Z.-J. & Kim, S.-K. (2012). Statistical Optimization of Microalgae *Pavlova Lutheri* Cultivation Conditions and Its Fermentation Conditions by Yeast, *Candida Rugopelliculosa*. *Bioresource technology*, 107, 307-313.
- Sabeti, M. B., Hejazi, M. A. & Karimi, A. (2019). Enhanced Removal of Nitrate and Phosphate from Wastewater by *Chlorella Vulgaris*: Multi-Objective Optimization and Cfd Simulation. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(3), 639-648.
- Sadeghizadeh, A., Moghaddasi, L. & Rahimi, R. (2017). Co₂ Capture from Air by *Chlorella Vulgaris* Microalgae in an Airlift Photobioreactor. *Bioresource technology*, 243, 441-447.
- Sepahvand, S., Jonoobi, M., Ashori, A., Gauvin, F., Brouwers, H., Oksman, K. & Yu, Q. (2020). A Promising Process to Modify Cellulose Nanofibers for Carbon Dioxide (Co₂) Adsorption. *Carbohydrate polymers*, 230, 115571.
- Web-1. A European Green Deal. (2019-2024). https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en. . Erişim Tarihi: 10.10.2021.

Yang, F., Long, L., Sun, X., Wu, H., Li, T. & Xiang, W. (2014). Optimization of Medium Using Response Surface Methodology for Lipid Production by *Scenedesmus* Sp. *Marine drugs*, 12(3), 1245-1257.



Daldırma Metodu ile Üretilen TiO İnce Filmlerin Derişime Bağlı Elektriksel, Optik ve Yapısal Analizi

Electrical, Optical and Structural Analysis Depending on Concentration of TiO Thin Films Produced via Dip-Coating Method

Necmi Serkan Tezel¹, Fatma Meydaneri Tezel², İ. Afşin Kariper^{3,4}

¹Department of Electrical-Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Karabük University, 78050, Karabük, TURKEY

²Department of Metallurgy and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Karabük University, 78050, Karabük, TURKEY

³Department of Science Education, Faculty of Education, Erciyes University, 38039, TURKEY

⁴Erciyes Technopark, Building Number 1, No. 41, 38039, Kayseri, TURKEY

Başvuru/Received: 09/02/2022

Kabul / Accepted: 30/06/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Özet

Bu çalışmada, farklı derişimlerde (A1: 0,8 Molar, A2: $1,25 \times 10^{-2}$ Molar, A3: $2,5 \times 10^{-3}$ Molar) hazırlanan çözeltilere 2 şer kez 5 saniye daldırma metodu (Dip-coating) ile cam lameller üzerine TiO ince filmleri üretilmiştir ve üretilen bu filmler 500 °C’ de tavlanmıştır. Genel olarak amorf yapıya sahip bu filmlerin $2\theta=25,5^\circ$ (1 0 1) Miller yönelim pikinde yayılma görülmüştür. Derişimin azalması ile küçük taneli yapılar, küresel şekilden daha irili ufaklı elipse doğru değişim göstermiştir. UV bölgede yansıtma özelliği oldukça fazla iken 400-700 nm görünür bölgede ise geçirgenlikleri oldukça fazladır. A1, A2 ve A3 derişimli TiO ince filmlerin enerji bant aralığı değerleri sırası ile $E_g= 3,52$ eV; 2,60 eV ve 3,03 eV olarak hesaplanmıştır. Derişimin artması ile elektriksel özdirenç değerlerinin artması, oksit alt tabakalardaki özel iletkenlikten dolayı metal benzeri tipik bir davranış gösterdiğinin kanıtıdır.

Anahtar Kelimeler

“İnce Film, Daldırma-Kaplama, TiO, Elektriksel Direnç, Optik Özellikler, E_{gap} ”

Abstract

In this study, TiO thin films were produced on glass lamels by Dip-Coating method at 2 times 5 seconds into solutions prepared at different concentrations (A1:0.8 Molar, A2: $1,25 \times 10^{-2}$ Molar, A3: $2,5 \times 10^{-3}$ Molar) and these films were annealed at 500 °C. In general, these films with an amorphous structure have $2\theta=25,5^\circ$ (1 0 1) a spread was observed at the Miller orientation peak. With a decrease in the concentration, small grains have changed from a spherical shape to an ellipse of larger and smaller sizes. While there are a lot of reflectivities in the UV region, their transmittance values are quite high in the visible region of 400-700 nm. The energy band gap values of TiO thin films with A1, A2 and A3 concentrations were calculated as $E_g= 3.52$ eV; 2.60 eV and 3.03 eV, respectively. The increase in the electrical resistivity values with increasing concentration is evidence that the exhibits a typical metal-like behavior due to the particular conductivity in the oxide sub-layers.

KeyWords

“Thin film, Dip-coating, TiO, Electrical Resistivity, Optical Properties, E_{gap} ”

1. Giriş

İnce film formunda büyütülen katı malzemeler, uygulamaya bağlı olarak optik ve mekanik kaplamaların çoğunda olduğu gibi pasif ve elektro-optik uygulamalarda olduğu gibi aktif olarak iki genel kategoriye ayrılır. Elektro-aktif uygulamalar saydam iletken ve foto-aktif kaplamaları içermektedir. Son yıllarda, titanyum ince filmler UV ışık koruması, gaz sensörleri, biyomedikal cihazlar, güneş enerjisi dönüşümü, kirleticilerin detoksifikasyonu gibi elektro-optik ve fotokimyasal uygulamalarından dolayı oldukça ilgi çekmektedir (Cacucci vd., 2013, 2014; Ganesh vd., 2017). Titanyum kaplamalar dış uyarılara karşı belirli bir tepki/reaksiyon oluşturabilirler. Örneğin titanyumun 3 eV bant kenarından daha büyük gelen ışığın enerjisi hole ve elektronların değerlik bandından iletkenlik bandına geçişini kolaylaştırır. Bu taşıyıcılar oksitlenme üretir ve titanyum tabakaların yüzeyi üzerine indirgenme reaksiyonları bu fotokatalitik etkiden sorumludur (Supriyanto vd., 2018). Bu uygulamalar için genellikle rutile ve brookite yapısından daha aktif olarak anatase fazı kabul edilmektedir. Bu nedenle titanyum ince filmlerin iyi bir şekilde kontrol edilen nanoyapıya sahip olması oldukça önemlidir (Méndez-Lozano vd., 2020).

Şimdilerde, TiO mikroelektronikte ara iletken tabaka olarak (Wasielewski vd., 2015), Si atomları için difüzyon bariyeri (Grigorov vd., 1998), yeni nesil termoelektrik malzemeleri (Okinaka&Akiyama, 2006; Ou vd., 2015) oluşturmak için umut veren bir bileşik olarak düşünülmektedir. TiO' in elektrik ve fotoelektrik özellikleri, potansiyel olarak fotovoltajik bir materyal (Fan vd., 2013; Nguyen vd., 2014), sensörler (Comini vd., 2000) ve titanyum oksit üzerine fotokatalizlerin performansını geliştiren bir bileşik (Chen vd., 2014) olduğu için geniş ölçekte çalışmalar yapılmıştır (Popov vd., 2018; Tseng&Chao, 2013; Zhao vd., 2011).

Metal malzemelerin bir çeşidi olarak Titanyum, kemiklerle iyi bir biyouyumluluk ve mekanik özelliklerinden dolayı biyotıp alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Gözenekli titanyum belirli boşluk yapısına sahiptir ki yoğun titanyum ile karşılaştırıldığında biyouyumluluğu daha iyidir. Özellikle kemik büyümesi ve kan akışı için gözenekli titanyum, makro, mikro ve mikro-makro arası boşluk yapılarını içermelidir (de Wild vd., 2016; Li vd., 2010; Wen vd., 2007; Xue vd., 2007) ve kemik büyümesini canlandırmak için gözenekli implantların gözeneklilik oranının %20-60 arasında olması gerekmektedir (X. Fan vd., 2012; Wang vd., 2020).

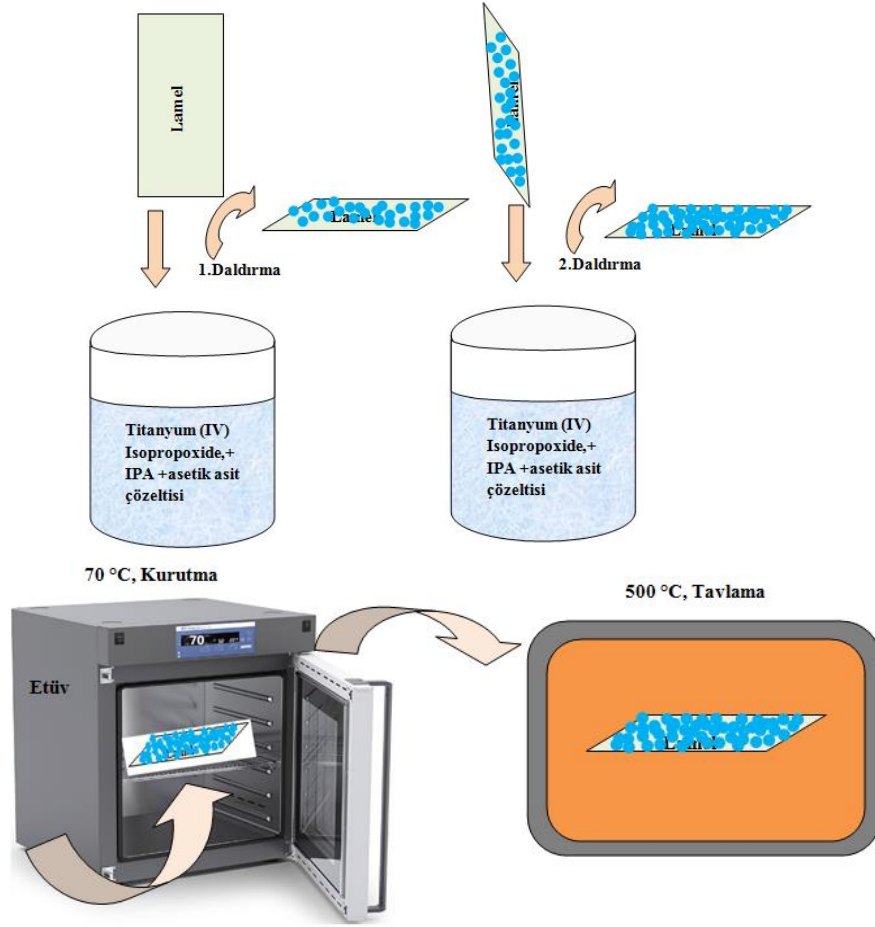
Güneş ışığının ultraviyole (UV) dalga boyuna göre genellikle üç banda ayrılır: UVC (200–280 nm), UVB (280–320 nm), UVA (320–400 nm) (Shi vd., 2013; Zayat vd., 2007). İnsan sağlığı ve malzemeler üzerine UV ışığın sebep olduğu zararlar düşünüldüğünde; UV koruyucu ajanlar gerekli ve güvenilir korumaları sağlayabilir. Bu koruyucu ajanlar genellikle organik ve inorganik olmak üzere iki çeşittir (Cao vd., 2013). İnorganik UV blokerleri, organik UV emiciler ile kıyaslandığında daha az toksiktir ve daha çevre dostudur (Y. Wang vd., 2015; Xu vd., 2018; Zhuang vd., 2014). Metal oksit içeren TiO₂, ZnO, SnO₂ vb. gibi yaygın inorganik UV koruyucu malzemeler, güvenilir kimyasal kararlılıkları, saçılma özellikleri, süper UV emicilik ve yansıtma gibi özelliklerinden dolayı mükemmel adaylardır (X. Li et al., 2014; Meng et al., 2011; Y. Zhang et al., 2012). Bulk yapıları TiO₂ ile karşılaştırılacak olursa, nano boyutlu TiO₂ parçacıkları kısa dalgaboyu aralığında genişleyen bir olguyla emilim gösterirler ve nano boyutlu TiO₂' in gelişmiş bir UV emme kabiliyetinin olduğu sonucuna varılır (Scierka vd., 2005). Ancak TiO₂ polimer üzerine kaplandığında tekdüze/homojen dağılımda bazı zorluklar oluşturmaktadır ve nanopartiküller arasındaki boşluklar aynı zamanda polimerler ve kumaşlar üzerine kaplanmış TiO₂' in UV koruyucu etkilerini zayıflatabilmektedir. Bu nedenle, yeni TiO₂ tabanlı kompozitlerin, saf TiO₂ ajanların bu olumsuz davranışlarını azaltmak için geliştirilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra, kristallenme formları ve tane şekilleri de büyük ölçüde TiO₂' in UV koruyucu performansını etkilemektedir. Işığın saçılma teorisine göre, genellikle nanopartiküllerin yüksek kırılma indisine sahip olması (2,708), yansıma ve ışığın saçılmasını geliştirmektedir. Rutile TiO₂ yüksek kırılma indisine sahiptir ve TiO₂' in diğer tip kristal formlarından daha iyi ışığı saçma ve yansıtma özelliği gösterir ki (L. Wang vd., 2019; A. P. Popov vd., 2005), rutile TiO₂ etkin bir inorganik UV koruyucu malzeme olabilir (Mcneil& French, 2000). Tane geometrisi açısından, TiO₂ nanoçubukların farklı en-boy oranları da farklı ışık yansıması ve saçılması gibi özellikler gösterebilir (Lademann vd., 2005). Literatür çalışmaları göz önüne alınacak olursa, iç minerallere yükleme/katkı yapılması nano boyutlu TiO₂' in kristal yapısı ve partikül boyutunu kontrol etmek için etkin bir metottur (Dong vd., 2019) ve geleneksel UV koruyucu ajanlar olarak TiO₂ mineral kompozitin potansiyel uygulamasını göstermektedir (J. Zhang vd., 2021). Titanyum ince filmler püskürtme, lazer ablasyonu, iyon aşılama, epitaksiyel (Kao vd., 2011), sol-jel (Lai vd., 2015), MOCVD (Méndez-Lozano vd., 2020), vakum depolama (Lai vd., 2015), polimerizasyon (Zhao vd., 2011) gibi metotlar ile üretilmişlerdir.

Bu çalışmada, cam lameller üzerine 500 °C'de tavllanmış TiO ince filmler çözelti derişimine bağlı olarak üretilmiştir. Yapısal özellikleri XRD ile, yüzey morfolojileri FESEM ile ve bileşimleri EDX ile belirlenmiştir. Bu ince filmler için film kalınlıklarından yararlanarak derişime bağlı elektriksel öz direnç değışimleri hesaplanmıştır. UV-vis ölçümleri ile optik sabitler ve enerji bant aralığı değeri elde edilmiştir.

2. Deneysel Yöntem

10 ml Titanyum (IV) Isopropoxide, 30 ml IPA, 1 ml asetik asit (0,8 Molar, A1) olacak şekilde 1. behere; 10 ml Titanyum (IV) Isopropoxide, 250 ml IPA, 1 ml asetik asit (1,25x10⁻² Molar, A2) olacak şekilde 2. behere ve 10 ml Titanyum (IV) Isopropoxide, 1250 ml IPA, 1 ml asetik asit (2,5x10⁻³ Molar, A3) olacak şekilde 3. behere farklı derişimli çözeltiler hazırlanmıştır. 50 mm x 50 mm x 1 mm boyutlarında lameller önce deterjanlı saf su ile yıkanmış ardından deiyonize su ile durulanmış ve etüvde kurumaya bırakıldıktan sonra kullanıma hazır hale gelmiştir. Temizlenen lameller 2' şer kez hazırlanan çözeltiye 5 saniye kadar daldırılmıştır.

Çıkarılan lameller etüv de 70 °C' de 10 dakika kurutulmuştur. Tavlama fırınında 500 °C' de tavllanmış ve fırın içinde soğutulmaya bırakılmıştır ve gözle görülür şekilde lameller üzerinde kalın bir tabaka olduğu gözlemlenmiştir. TiO₂ ince filmlerin üretimi için dip-coating metodu Şekil 1' de verilmiştir.



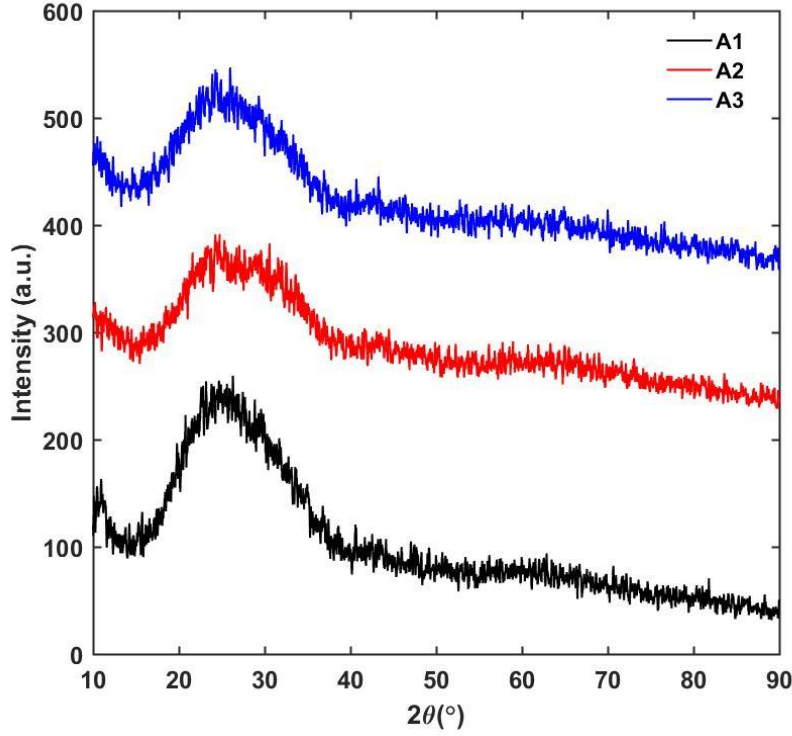
Şekil 1. TiO₂ İnce Filmlerin Üretimi İçin Dip-Coating Metodu.

X-ışını kırınım desenleri (XRD), 10°<2θ<90° aralığında bir CuKα₁ radyasyon kaynaklı XRD kırınım cihazı (Rigaku model, λ = 1.5406 Å) ile 3° /dk. hızında 0.02°' lik bir step ile ölçülmüştür. Numunelerin iki boyutlu (2D) yüzey morfolojileri FESEM (Carl Zeiss Ultra Plus Gemini FESEM) ile incelenmiş; bileşim analizleri ise EDX ile yapılmıştır. Derişime bağlı elektriksel direnç performansları ise Keithley 2400 Sourcemeter ve 2100/220 Keithley multimeter cihazından oluşan (four point probe) dört nokta tekniği ile I-V ölçümleri alınarak hesaplanmıştır. Optik ölçümler, oda sıcaklığında Hach Lange DR 5000 model UV-VIS spektrofotometre cihazı ile referans ışına kaplanmamış özdeş bir substrat yerleştirilerek alınmıştır. Filmlerin optik spektrumları 250-800 nm dalga boyu aralığında kaydedilmiştir. Film kalınlıkları ve yüzey pürüzlülükleri ise ölçüm kuvveti 0,75 mN olan Mitutoyo marka SurfTest model cihaz ile ölçülmüştür.

3. Sonuçlar ve Tartışma

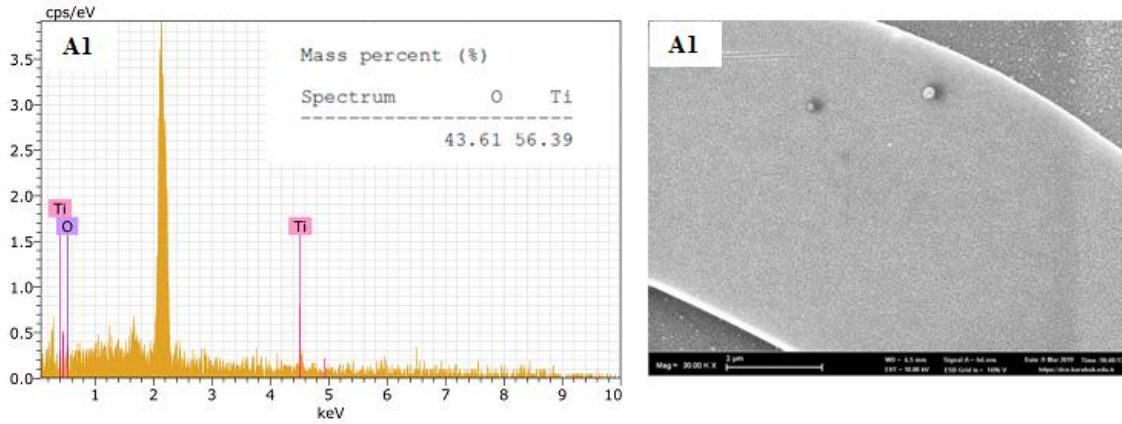
3.1. Yapısal, yüzeysel ve bileşim analizi

TiO ince filmlerin derişime bağlı 2θ=10°- 90°' de elde edilen XRD kırınım pikleri Şekil 2' de verilmiştir. Farklı derişimlerde (A1: 0,8 Molar, A2: 1,25x10⁻² Molar, A3: 2,5x10⁻³ Molar) 2' şer kez daldırma metodu ile üretilen ve 500 °C' de tavlanan TiO₂ ince filmlerin XRD kırınım desenlerinin belirgin bir şekilde amorf yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Her ne kadar amorf yapıya sahip olsalar da 2θ=25,5° de zayıf bir (1 0 1) yönelimli TiO₂ tetragonal yapının anatase fazına işaret etmektedir. Genel olarak amorf yapı oluşmasının nedenlerinden biri ise daldırma sayısının az olması, diğeri ise cam lamellerin amorf yapıya sahip olması ve yüzey gerilimlerinin fazla olması taban malzemeye yapışmayı/tutunmayı engellemektedir.

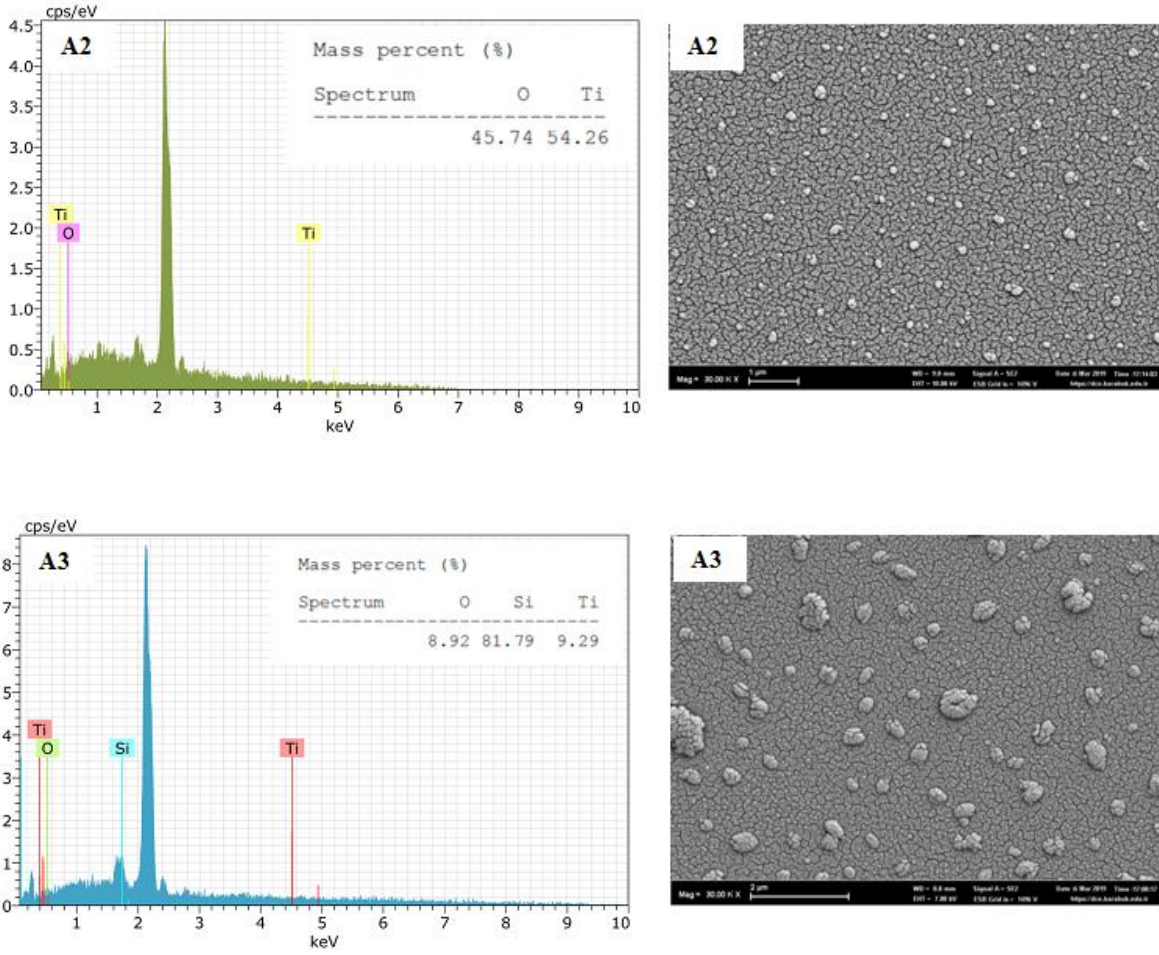


Şekil 2. TiO İnce Filmlerin XRD Kırınım Desenleri.

Farklı derişimlerde (A1: 0,8 Molar, A2: $1,25 \times 10^{-2}$ Molar, A3: $2,5 \times 10^{-3}$ Molar) 2' şer kez daldırma metodu ile üretilen ve 500 °C' de tavlanan TiO₂ ince filmlerin FESEM görüntüleri ve EDX sonuçları sırası ile Şekil 3' de gösterilmektedir. Aynı büyütme oranlarında (x30.000) incelenen görüntülerde, genel olarak homojen görünmekle birlikte aralarında boşluklarında olduğu, küresel şekilli, derişimi azalan A3 numunesi için irili ufaklı elips partikül şeklinde oluşum gösterdiği görülmektedir. Bileşim analizine göre (EDX), derişimin A1 numunesinden A3 numunesine doğru azalması ile Ti ve O elementel ağırlıkları da azalmaktadır.

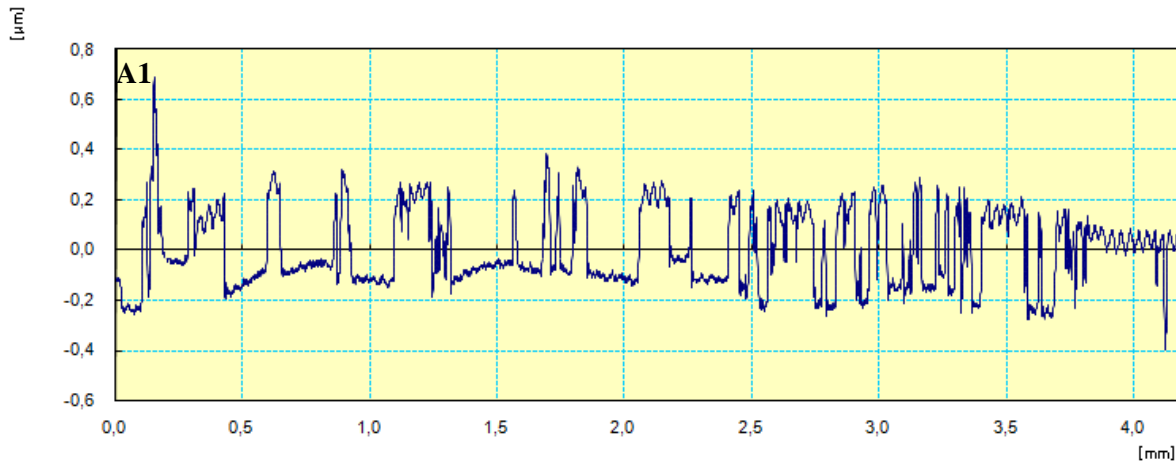


Şekil 3. A1, A2 ve A3 Derişimli TiO İnce Filmlerin FESEM görüntüleri ve EDX analizleri.

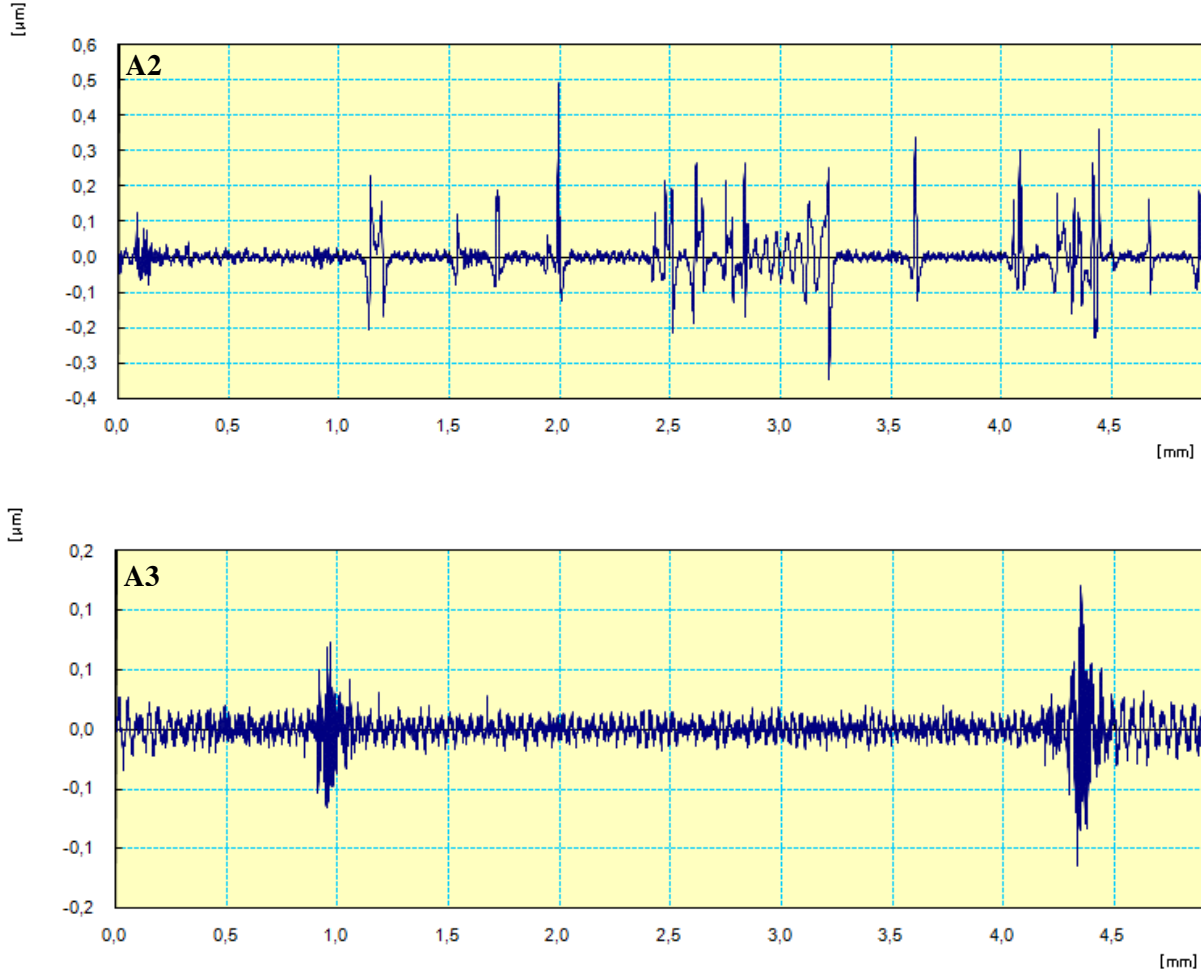


Şekil 3 (devam). A1, A2 ve A3 Derişimli TiO İnce Filmlerin FESEM görüntüleri ve EDX analizleri.

A1, A2 ve A3 derişimli TiO ince filmlerin yüzey pürüzlülük ve kalınlık analiz sonuçları Şekil 4’ de verilmiştir. Dalgaların pozitif yönde tepe noktalarının ortalaması yüzey pürüzlülüğünü, pozitif ve negatif yönde toplamlarının karekök ortalamasının kare kökü ise film kalınlıklarını vermektedir. Buna göre A1, A2 ve A3 derişimli TiO ince filmlerin yüzey pürüzlülük ve değerleri sırası ile 0,149 μm , 0,049 μm ve 0,012 μm ; kalınlıkları ise 0,961 μm , 0,814 μm ve 0,227 μm olarak elde edilmiştir. Buna göre derişimin artması ile kalınlıkların ve pürüzlülüğün arttığı görülmektedir.



Şekil 4. A1, A2 ve A3 Derişimli TiO İnce Filmlerin yüzey pürüzlülük ve kalınlık analiz sonuçları.

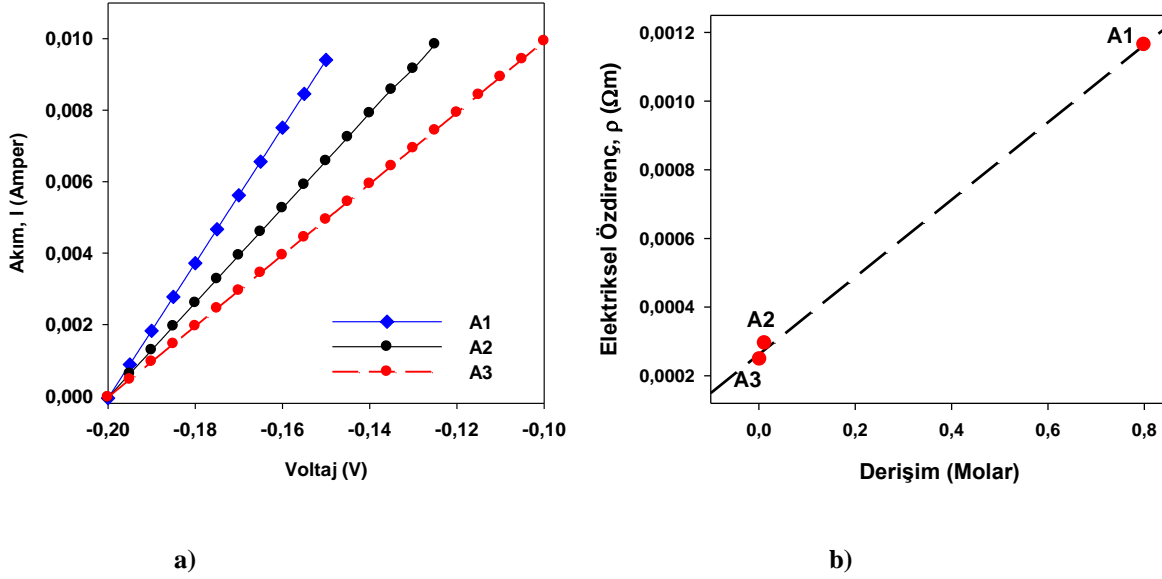


Şekil 4 (devam). A1, A2 ve A3 Derişimli TiO İnce Filmlerin yüzey pürüzlülük ve kalınlık analiz sonuçları.

3.2. Elektriksel Özdirenç Analizi

TiO İnce filmlerin A1, A2 ve A3 derişimlerine bağı akım-voltaj (I-V) ölçümleri Keithley 2400 sourcemeter ve 2100/220 Keithley multimetre cihazlarından oluşan dört nokta tekniğı (four point probe) ile -0,2 ile -0,1 V aralığında alınmıştır. Kullanılan probe' ların yarıçapları 0,5 mm' dir. Probe' ların arasındaki uzaklık 1 mm olacak şekilde ayarlanmıştır ve gümüş pasta ile oluşturulan kontaklara hafifçe dokundurulmuştur. Bütün ölçümler oda sıcaklığında ve karanlık ortamda alınmıştır. TiO ince filmlerin A1, A2 ve A3 derişimlerine bağı elektriksel özdirenç değerleri film kalınlıkları yardımı ile Denklem (1) (Tezel vd., 2019a; Tezel vd., 2019b) kullanılarak hesaplanmıştır. Burada ρ elektriksel özdirenç (Ωm), I akım (A), V potansiyel fark (Volt), t ise film kalınlıklarını ifade etmektedir. TiO ince filmlerin A1, A2 ve A3 derişimlerine bağı I-V ve ρ -Derişim grafikleri Şekil 5 (a ve b)'de verilmiştir.

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right) \quad (1)$$



Şekil 5. A1, A2 ve A3 Derişimli TiO İnce Filmlerin a) Akım-Voltaj (I-V), b) Elektriksel Direnç-Derişim (ρ -Derişim) grafiği.

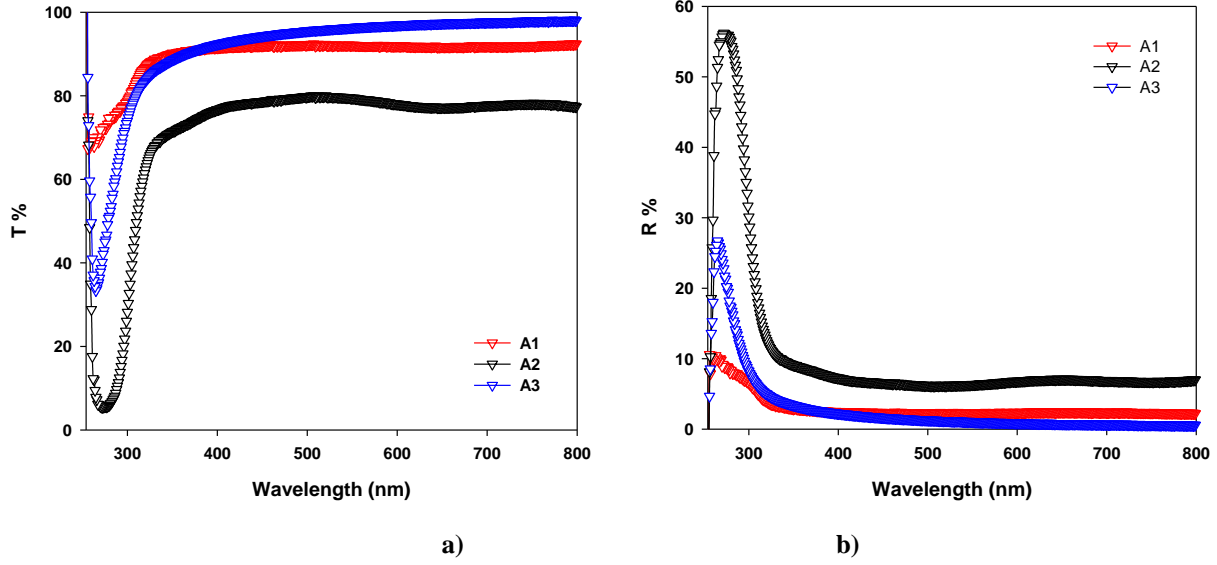
Buna göre TiO ince filmlerin çözeltili derişimi 0,8 M'dan $2,5 \times 10^{-3}$ M' a azalması ile elektriksel özdirenç değerlerinin de azaldığı görülmektedir. Derişimin artması ile ρ değerlerinin artması, ısıl işlemlerle Ti bakımından zengin tabakalardaki O miktarındaki artışa bağlanabilir. Bununla birlikte, özdirençin artması sadece Ti bakımından zengin tabakalardan değil, aynı zamanda O bakımından zengin olanlardan gelen toplam Ti miktarı ile bağlantılı olduğu gösterilmiştir (Cacucci vd., 2014). Oksit alt tabakalardaki özel iletkenlikten dolayı bu filmler metal benzeri tipik bir davranış göstermektedir. EDX analizlerine göre Ti ve O elementel oranların ve film kalınlıklarının artması sonucunda elektron-elektron veya elektron-kusur (O) saçılmaları nedeniyle elektronların alacakları serbest yolun kısalması, yüzey pürüzlülük oranının fazla olması gibi nedenler metallerde olduğu gibi tipik bir şekilde özdirenç değerini de artırmaktadır. Gaucci ve arkadaşları TiO₂/TiO/Ti tabakalı yapısını DC Magnetron Sputtering metodu ile üretmişlerdir ve 320, 325 ve 330 nm kalınlıklı bu filmler için 200 °C sıcaklıkta elektriksel özdirenç değerlerini sırası ile $1,85 \times 10^{-6}$, $1,21 \times 10^{-6}$ ve $1,34 \times 10^{-6}$ Ωm olarak bulmuşlardır. Başka bir çalışmaları ise oksijence zengin amorf ve rutile faz içeren TiO₂ için 300 K' den 500 K' e kadar elektriksel özdirenç değerlerinin sırası ile $5,76 \times 10^{-7}$ den $1,22 \times 10^{-5}$ Ωm' ye artmış olduğunu gözlemlemişlerdir (Cacucci vd., 2013, 2014). Bu çalışmada derişime bağlı olarak üretilen TiO ince filmlerin elektriksel özdirenç değerleri literatürde elde edilen değerlerden daha yüksektir. Bunun nedeni ise üretim metodu, film kalınlığı ve ölçüm sıcaklığıdır.

3.3. Optik Özellikler

UV-VIS spektrofotometre yardımı ile 250-800 nm dalgaboyu aralığında oda sıcaklığında ölçülen absorbans (A) ve yansıma (R) değerleri kullanılarak geçirgenlik (T) değerleri Denklem (2) yardımı ile hesaplanabilmektedir (Tezel vd., 2019a, 2019b). Buna göre A1, A2 ve A3 derişimli TiO ince filmlerin %T ve %R grafikleri Şekil 6 (a ve b)' de verilmiştir.

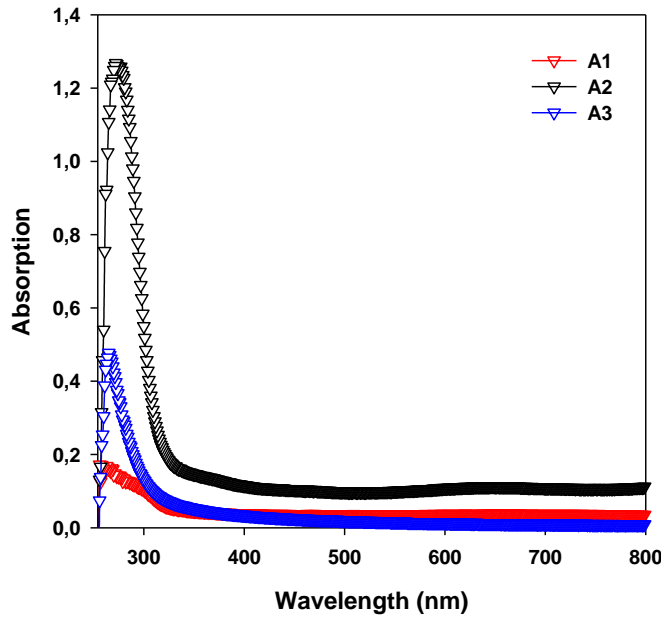
$$T = (1 - R)^2 e^{-A} \quad (2)$$

TiO kaplamaların yansıtma özelliği fazla olduğu için UV koruyucu materyaller olarak üretildiğini giriş kısmında belirtmiştik. % T grafiğine göre yaklaşık 250 ile 330 nm arası dalga boylarında (UV bölgede), derişime bağlı olarak üretilen TiO ince filmlerin geçirgenlikleri azalmakta ve yansıma değerleri artmaktadır. 400-700 nm arası görünür bölgede ise T geçirgenlik artarken, R yansıma da azalıp, dalga boyunun artması ile sabit değerlere ulaşmaktadır. Maksimum yansımının olduğu UV bölgede ışınların yansıması ve göze iletilmesinin azalması hususunda fayda sağlamaktadır. UV-C bölgede bu tür yansıtıcı malzemeler ile üretilen ledler sayesinde virüsler ve mikroplar istenilen bölgelerden arındırılabilir (Keçebaş & Şendur, 2018). Özellikle belli dalga boylarında ışık geçirgenliğinin yüksek olması optik camların kaplamasında TiO₂ kaplamanın tercih edilmesine neden oluyor. Görünür ışığın optik camlardan geçişinin yüksek olması yani çok fazla yansımaması ve soğurulmaması istenen bir özelliktir.



Şekil 6. A1, A2 ve A3 derişimli TiO ince filmlere ait a) Geçirgenlik (%T) ve b) Yansıma (%R) değerlerinin dalga boyuna göre değişimi.

Elektronik soğurma spektrumunun ölçümü nanomalzemelerin optik özelliklerini ve uygulamalarını anlamak için çok önemlidir. A1, A2 ve A3 derişimli TiO ince filmlerin absorpsiyon grafiği Şekil 7’ de görülmektedir. 260 nm civarında σ ve π orbitallerindeki elektronlar radyasyon absorbladığında, üst enerji seviyesi anti-bağ moleküler orbitallerine geçer (yani σ - σ^* ve π - π^*). Bağ yapamayan elektronlar (n) ise her iki bağın anti orbitallerine geçebilmektedir. Bu geçişlerin en belirginini 200 nm ile 700 nm arasında daha az enerjili ışınlar ile π - π^* ve n - π^* geçişleridir. π - π^* geçişlerin en önemli özelliği, çözelti içinde çözücünün polarlığı artıyorsa absorpsiyon piki de daha uzun dalga boyuna kaymasıdır (batokromik kayma veya kırmızıya kayma). n - π^* en önemli özelliği ise çözücünün polaritesinin artması ile kısa dalga boyuna doğru kaymasıdır (hipsokrom kayma; maviye kayma) (<https://acikders.ankara.edu.tr>). Buradaki absorpsiyon piki de 340 nm’ ye kadar yayılmıştır. Bu filmler mavi-yeşil bölgenin her iki tarafındaki ışığı emer, güneş pili tabakaları ve foto iletkenler olarak kullanılabilirler.

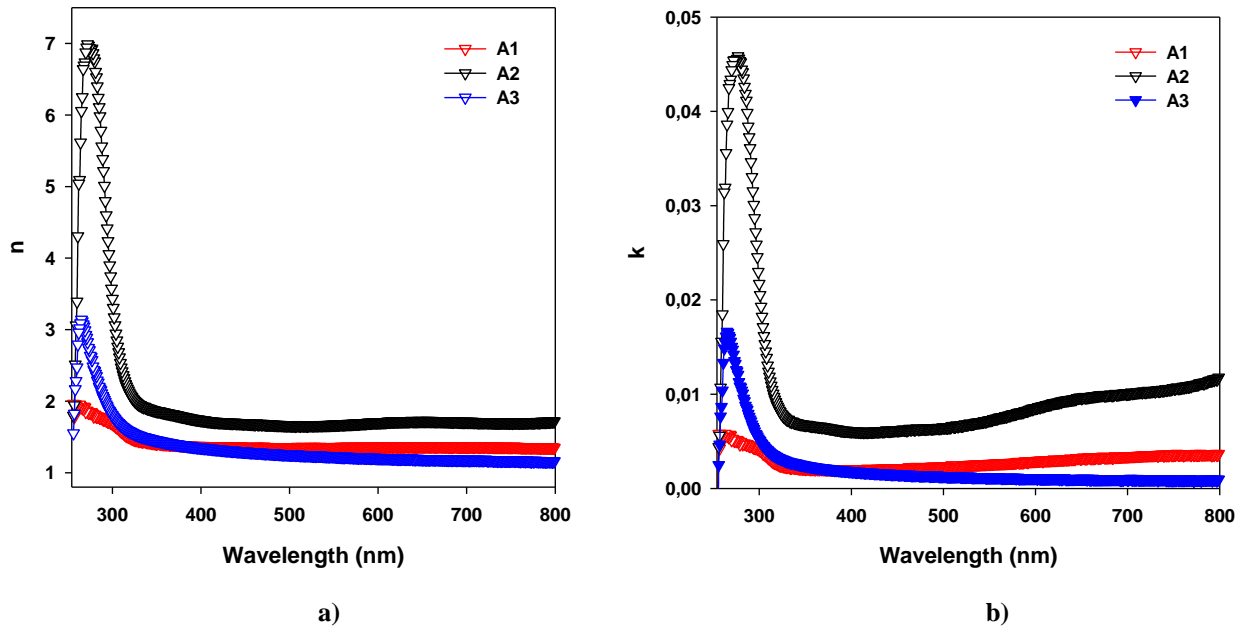


Şekil 7. A1, A2 ve A3 derişimli TiO ince filmlere ait Absorbans değerlerinin dalga boyuna göre değişimi.

Foton enerjisine bağılı olan optik dispersiyon sabitler, bağlanma-elektron geçişinin baskın olduğu bant aralığındaki yapıyı tanımlar. Malzeme yapısındaki bölgesel alan ve iyonların elektronik kutupluluğu ile ilgili olan kırılma indisi (n) ve sönümlenme katsayısı (k) film kalınlığından etkilenmektedir. Yansıma ve sönümlenme katsayılarının Denklem 3' de kullanılması ile kırılma indisi, dalga boyu ve absorbands değerlerinin Denklem 4' de kullanılması ile de sönümlenme katsayısı hesaplanmaktadır (Tezel vd., 2019a, 2019b). A1, A2 ve A3 derişimli TiO ince filmleri için (n) kırılma indisi ve (k) sönümlenme katsayısı eğrileri sırası ile Şekil 8 (a-b)' de verilmiştir.

$$n = \frac{1+R}{1-R} + \sqrt{\frac{4R}{(1-R)^2} - k^2} \quad (3)$$

$$k = \frac{\alpha\lambda}{4\pi} \quad (4)$$



Şekil 8. A1, A2 ve A3 derişimli TiO ince filmlere ait a) Kırılma indisi (n) ve b) Sönümlenme katsayısı (k) değerlerinin dalga boyuna göre değişimi.

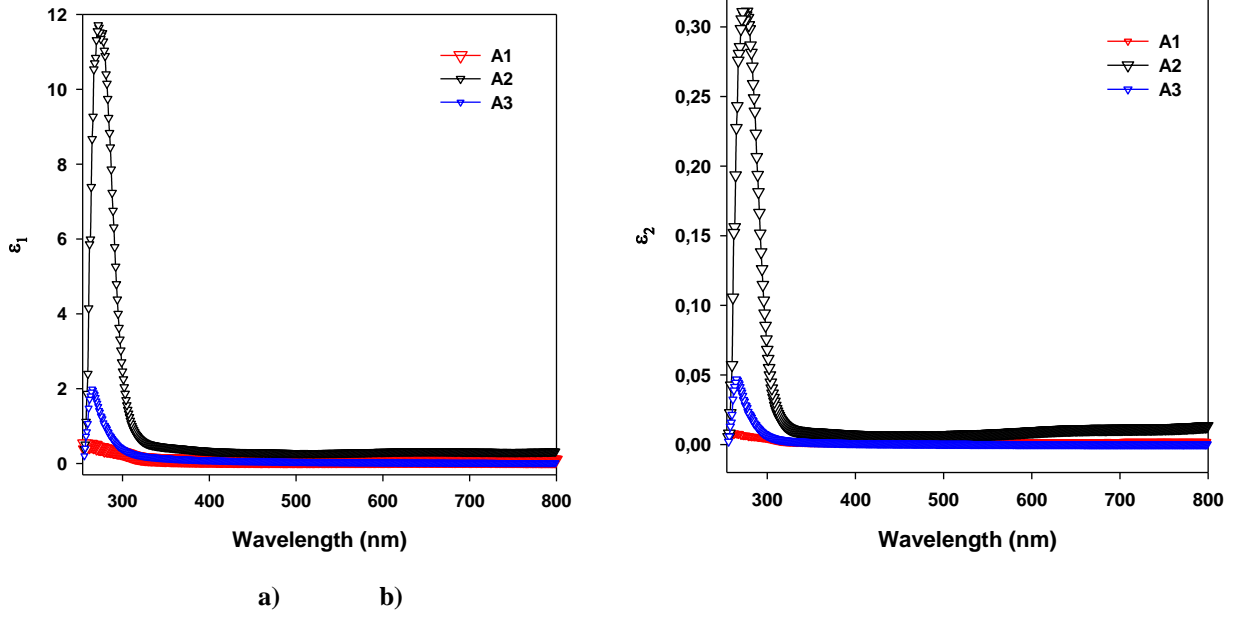
İnce filmlerin dielektrik sabitleri, kırılma indisi (n) ve sönümlenme katsayısı (k)' ya bağlı olarak reel ve sanal kısımdan oluşmaktadır (Tezel vd., 2019a, 2019b) ve Denklem (5-7) ile ifade edilmektedir.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \quad (5)$$

$$\varepsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (6)$$

$$\varepsilon_2 = 2nk \quad (7)$$

Burada ε_1 ve ε_2 sırası ile reel ve sanal (imaginary) dielektrik sabitlerini göstermektedir ve A1, A2 ve A3 derişimli TiO ince filmlerin reel ve sanal dielektrik sabitlerinin dalga boyuna göre değişimi sırası ile Şekil 9 (a-b)' de gösterilmektedir. Düşük dalga boylarında bütün filmler için bir artış gözlenirken, dalga boyunun artması ile azalma dikkat çekmektedir.

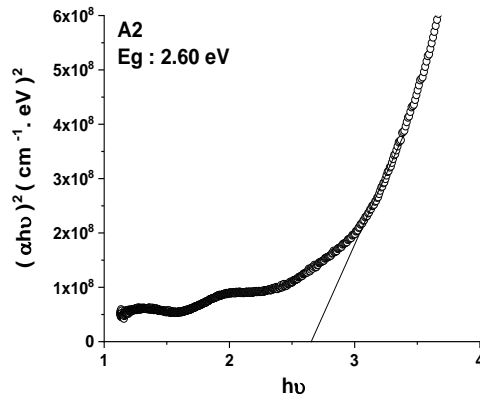
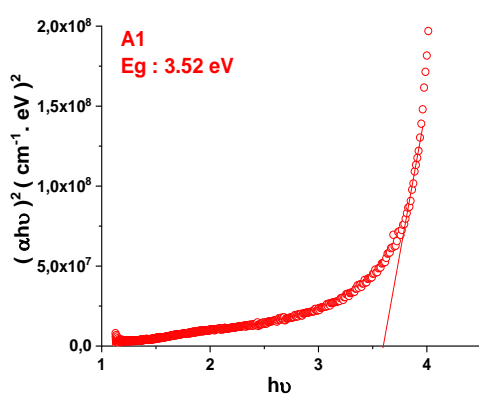


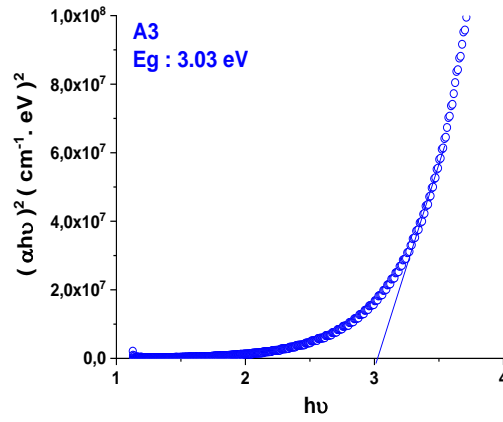
Şekil 9. A1, A2 ve A3 derişimli TiO ince filmlerin dalga boyuna göre **a)** Reel dielektrik sabitlerinin (ϵ_1) **b)** Sanal dielektrik sabitlerinin (ϵ_2) dalga boyuna göre değişim grafiği.

A1, A2 ve A3 derişimli TiO ince filmlerin absorpsiyon katsayısı kullanılarak E_{gap} değeri hesaplanmıştır. Absorpsiyon safsızlık durumu, oksijen boşlukları, mikro-gerilme, parçacık büyüklüğü, film kalınlığı vb. gibi değişen faktörlere bağlı olup, E_{gap} değeri de buna bağlı olarak değişmektedir ve Denklem (8)' den hesaplanmaktadır (Y. Wang vd., 2015; Xu vd., 2018; Y. Zhang vd., 2012).

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^n \quad (8)$$

Burada absorpsiyon katsayısı α , foton enerjisi $h\nu$, numunenin absorbans değeri A, $n=1/2$ ve 2 değeri sırası ile n direkt ve indirekt geçişler içindir (Tauc, 1974). A1, A2 ve A3 derişimli TiO ince filmler için Tauc-Plot grafiği, $(\alpha h\nu)^2$ ' nin $(h\nu)$ ' ye göre değişimi, Şekil 10' da verilmiştir. Şekle göre keskin çizgilerin $\alpha = 0$ ' da enerji eksenini kestiği nokta, E_{gap} değerini verir. Buna göre A1, A2 ve A3 derişimli TiO ince filmler için E_g değerleri sırasıyla $E_g = 3,52$ eV; 2,60 eV ve 3,03 eV olarak hesaplanmıştır. Nano boyuttaki değişim optik özellikleri önemli ölçüde etkilemektedir. Nedeni ise düşük boyutlarda kuantum sınırlama etkisi, enerji bant aralığı alt seviyelerini oluşturup yarılmalara sebebiyet verir ve enerji bant aralığları değişir. Bu çalışmada A2 numunesinin E_{gap} değeri diğer numunelere göre düşüktür. Bunun nedeni ise EDX analizine göre oksijen miktarının fazla olmasından dolayı bant yapısına bazı enerji seviyelerinin eklenmiş ve oksijen atomu-metal iyonlarının güçlü p-d etkileşiminden dolayı bant aralığının azaldığı düşünölmektedir.





Şekil 10. A1, A2 ve A3 derişimli TiO ince filmler için Tauc-Plot grafiği.

İnce filmlerin optik özellikleri deneysel metot, zaman, substrat çeşidi, üretim sıcaklığı, tavlama prosesleri, çözelti derişimi ve pH değeri, film kalınlıkları, yüzey pürüzlülükleri vb. deneysel şartların değişimine oldukça bağlıdır.

4. Sonuçlar

Bu çalışma, cam lameller üzerine daldırma yöntemi ile çözelti derişimine bağlı olarak üretilen ve 500 °C' de tavlanan TiO ince filmlerin yapısal, yüzeysel, optik ve elektriksel özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Bütün bu filmler için genel olarak amorf bir yapı elde edilmiştir. $2\theta=25,5^\circ$ (1 0 1) kırınım pikindeki yayılma anatase fazını işaret etmektedir. Aynı büyütme faktörlü FESEM görüntüleri incelendiğinde küçük taneli küresel yapılar derişimin artması ile elipse doğru bir şekillenme göstermiştir. Yine derişimin artması ile yüzey pürüzlülüğü ve film kalınlıkları artmıştır. Buna bağlı oksit alt tabakalardaki özel iletkenlikten dolayı metal benzeri tipik bir özellik göstermiş ve elektriksel özdirenci metallerde olduğu gibi artmıştır. Absorpsiyon safsızlık durumu, oksijen boşlukları, mikro-gerilme, parçacık büyüklüğü, film kalınlığı vb. gibi değişen faktörlere bağlı olup, E_{gap} değeri de buna bağlı olarak değişmektedir. Düşük boyutlarda kuantum sınırlama etkisi, enerji bant aralığı alt seviyelerini oluşturup yarılmalara sebebiyet verir ve enerji bant aralıkları değişir. A2 numunesi için oksijen miktarının fazla olmasından dolayı bant yapısına bazı enerji seviyelerinin eklenmiş ve oksijen atomu-metal iyonlarının güçlü p-d etkileşiminden dolayı bant aralığının azaldığı görülmektedir. Aborpsiyon piki de 340 nm' ye kadar yayılmıştır. Bu filmler mavi-yeşil bölgenin her iki tarafındaki ışığı emer, güneş pili tabakaları ve foto iletkenler olarak kullanılabilirler.

Referanslar

- Cacucci, A., Tsiaoussis, I., Potin, V., Imhoff, L., Martin, N., & Nyberg, T. (2013). The interdependence of structural and electrical properties in TiO₂/TiO/Ti periodic multilayers, *Acta Materialia*, 61 (11), 4215-4225. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.03.047>
- Cacucci, A., Heintz, O., Tsiaoussis, I., Avril, L., Potin, V., Imhoff, L., & Martin, N. (2014). Flash annealing influence on structural and electrical properties of TiO₂/TiO/Ti periodic multilayers. *Thin Solid Films*, 553, 47-51. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.11.053>
- Cao, T., Xu, K., Chen, G., & Guo, C. Y. (2013). Poly (ethylene terephthalate) nanocomposites with a strong UV-shielding function using UV-absorber intercalated layered double hydroxides. *Rsc Advances*, 3(18), 6282-6285. <https://doi.org/10.1039/C3RA23321A>
- Chen, Z., Zhong, W., Liang, Z., Li, W., Li, W., He, G., Wang, Y., Xie, Y., & He, Q. (2014). Photocatalytic activity enhancement of anatase TiO₂ by using TiO. *J. Nanomater.*, Article ID 298619, 9 pages. <https://doi.org/10.1155/2014/298619>
- Comini, E., Sberveglioni, G., Ferroni, M., Guidi, V., & Martinelli, G. (2000). NO₂ monitoring with a novel p-type material: TiO. *Sensors Actuators B Chem.*, 68 (1-3), 175-183. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(00\)00424-X](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(00)00424-X)
- de Wild, M., Zimmermann, S., Rüegg, J., Schumacher, R., Fleischmann, T., Ghayor, C., & Weber, F. E. (2016). Influence of microarchitecture on osteoconduction and mechanics of porous titanium scaffolds generated by selective laser melting. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 3(3), 142-151. <https://doi.org/10.1089/3dp.2016.0004>

Dong, Z., Ling, M., Jiang, Y., Han, M., Ren, G., Zhang, J., Ren, X., Li, F., & Xue, B. (2019). Preparation and properties of TiO₂/illite composites synthesized at different hydrothermal pH values. *Chemical Physics*, 525, 110394. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2019.110394>

Fan, X., Feng, B., Di, Y., Lu, X., Duan, K., Wang, J., & Weng, J. (2012). Preparation of bioactive TiO film on porous titanium by micro-arc oxidation. *Applied surface science*, 258(19), 7584-7588. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.04.093>

Fan, J., Fàbrega, C., Zamani, R. R., Hao, Y., Parra, A., Andreu, T., Arbiol, J., Boschloo, G., Hagfeldt, A., Morante, J. R., & Cabot, A. (2013). Enhanced photovoltaic performance of nanowire dye-sensitized solar cells based on coaxial TiO₂@TiO heterostructures with a cobalt(II/III) redox electrolyte. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 5 (20), 9872-9877, doi.org/10.1021/am402344d

Ganesh, V., Alizadeh, M., Shuhaimi, A., Adreen, A., Pandikumar, A., Jayakumar, M., Huang, N. M., Ramesh, R., Baskar, K., & Rahman, S. A. (2017). Correlation between indium content in monolithic InGaN/GaN multi quantum well structures on photoelectrochemical activity for water splitting. *J Alloy Compd*, 706, 629-636. doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.02.231

Grigorov, K. G., Grigorov, G. I., Drajeva, L., Bouchier, D., Sporken, R., & Caudano, R. (1998). Synthesis and characterization of conductive titanium monoxide films. Diffusion of silicon in titanium monoxide films. *Vacuum*, 51 (2), 153-155. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(98\)00149-3](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(98)00149-3)

<https://acikders.ankara.edu.tr> (27.05.2022)

Kao, C. H., Yeh, S. W., Huang, H. L., Gan, D., & Shen, P. (2011). Study of the TiO to anatase transformation by thermal oxidation of Ti film in air. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(13), 5648-5656. doi.org/10.1021/jp109082g

Keçebaş, M. A., & Şendur, K. (2018). Enhancing the spectral reflectance of refractory metals by multilayer optical thin-film coatings. *JOSA B*, 35(8), 1845-1853. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.35.001845>

Lademann, J., Schanzer, S., Jacobi, U., Schaefer, H., Pflücker, F., Driller, H., Beck, J., Meinke, M., Roggan, A., & Sterry, W. (2005). Synergy effects between organic and inorganic UV filters in sunscreens. *Journal of Biomedical Optics*, 10(1), 014008. <https://doi.org/10.1117/1.1854112>

Lai, C. L., Huang, H. L., Shen, J. H., Wang, K. K., & Gan, D. (2015). The formation of anatase TiO₂ from TiO nanocrystals in sol-gel process. *Ceramics International*, 41(3), 5041-5048. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.12.072>

Li, Y., Xiong, J., & Hodgson, P. D. (2010). Effects of structural property and surface modification of Ti₆Ta₄Sn scaffolds on the response of SaOS₂ cells for bone tissue engineering. *Journal of alloys and compounds*, 494 (1-2), 323-329. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.01.026>

Li, X., Wang, L., Pei, Y., & Jiang, J. (2014). Layer-by-layer assembled TiO₂ films with high ultraviolet light-shielding property. *Thin solid films*, 571(Part 1), 127-133. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.10.047>

McNeil, L. E., & French, R. H. (2000). Multiple scattering from rutile TiO₂ particles. *Acta materialia*, 48(18-19), 4571-4576. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00243-3](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00243-3)

Méndez-Lozano, N., Apátiga-Castro, M., Manzano-Ramírez, A., Rivera-Muñoz, E. M., Velázquez-Castillo, R., Alberto-González, C., & Zamora-Antuñano, (2020). Morphological study of TiO₂ thin films doped with cobalt by Metal Organic Chemical Vapor Deposition. *Results in Physics*, 16, 102891. doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102891

Meng, X., Zhang, Z., Luo, N., Cao, S., & Yang, M. (2011). Transparent poly (methyl methacrylate)/TiO₂ nanocomposites for UV-shielding applications. *Polymer Science Series A*, 53(10), 977-983. doi.org/10.1134/S0965545X11100099

Nguyen, T. T. N., Chen, Y. H., & He, J. L. (2014). Preparation of inkjet-printed titanium monoxide as p-type absorber layer for photovoltaic purposes. *Thin Solid Films*, 572, 8-14, <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.09.054>

Okinaka, N., & Akiyama, T. (2006). Latent property of defect-controlled metal oxide: nonstoichiometric titanium oxides as prospective material for high-temperature thermoelectric conversion. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 45 (9R), 7009-7010. doi.org/10.1143/JJAP.45.7009

Ou, C., Hou, J., Wei, T. R., Jiang, B., Jiao, S., Li, J. F., & Zhu, H. (2015). High thermoelectric performance of all-oxide heterostructures with carrier double-barrier filtering effect. *NPG Asia Materials*, 7(5), e182-e182. doi:10.1038/am.2015.36

Popov, A. P., Priezhev, A. V., Lademann, J., & Myllylä, R. (2005). TiO₂ nanoparticles as an effective UV-B radiation skin-protective compound in sunscreens. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38(15), 2564. https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/15/006

Popov, I. S., Enyashin, A. N., & Rempel, A. A. (2018). Size dependent content of structural vacancies within TiO nanoparticles: Quantum-chemical DFTB study. *Superlattices and Microstructures*, 113, 459-465. https://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.11.031

Sakatani, Y., Grosso, D., Nicole, L., Boissière, C., Soler-Illia, G. J. de A. A. and Sanchez, C. (2006). Optimised photocatalytic activity of grid-like mesoporous TiO₂ films: effect of crystallinity, pore size distribution, and pore accessibility. *J Mater Chem*, 16, 77-82. doi: 10.1039/B512824M

Scierka, S., Drzal, P. L., Forster, A. L., & Svetlik, S. (2005). Nanomechanical properties of UV degraded TiO₂/epoxy nanocomposites. *MRS Online Proceedings Library*, 841(1), Article number: R5.10 (2004). https://doi.org/10.1557/PROC-841-R5.10

Shi, W., Lin, Y., Zhang, S., Tian, R., Liang, R., Wei, M., Evans, D. G., & Duan, X. (2013). Study on UV-shielding mechanism of layered double hydroxide materials. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15(41), 18217-18222. https://doi.org/10.1039/C3CP52819G

Tauc, J. (1974). Optical Properties of Amorphous Semiconductors. In: Tauc, J. (eds) *Amorphous and Liquid Semiconductors*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8705-7_4

Tezel, N. S., Tezel, F. M., & Kariper, İ. A. (2019). Surface and electro-optical properties of amorphous Sb₂S₃ thin films. *Applied Physics A*, 125(3), 1-16. https://doi.org/10.1007/s00339-019-2475-2

Tezel, N. S., Tezel, F. M., & Kariper, İ. A. (2019). The impact of pH on the structural, surface, electrical and optical properties of nanostructured PbSe thin films. *Materials Research Express*, 6(7), 076422. https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab1675

Tseng, W. J., & Chao, P. S. (2013). Synthesis and photocatalysis of TiO₂ hollow spheres by a facile template-implantation route. *Ceramics International*, 39 (4), 3779-3787. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.10.217

Wang, L., Hu, X., & Wang, Z. (2019). Study on the influential factors and whitening mechanism of mineral whiteness. *Acta Petrologica Sinica*, 35(1), 137-145. doi: 10.18654/1000-0569/2019.01.10

Wang, Y., Mo, Z., Zhang, C., Zhang, P., Guo, R., Gou, Hu, R., & Wei, X. (2015). Morphology-controllable 3D flower-like TiO₂ for UV shielding application. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 32, 172-177. doi.org/10.1016/j.jiec.2015.08.013

Wang, Z., Xu, B., Yang, J., Yang, B., Xiong, H., Yang, G., & Wang, F. (2020). Investigation on preparation porous titanium through calciothermic reduction of porous TiO precursors. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 13137-13146. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.052

Wasielewski, R., Mazur, P., Grodzicki, M., & Ciszewski, A. (2015). TiO thin films on GaN(0001). *Phys. Status Solidi B*, 252 (5), 1001-1005, doi.org/10.1002/pssb.201451480

Wen, C. E., Yamada, Y., Nouri, A., & Hodgson, P. (2007). Porous titanium with porosity gradients for biomedical applications. *Materials science forum*, 539-543, 720-725. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.539-543.720

Xu, L., Shen, Y., Ding, Y., & Wang, L. (2018). Superhydrophobic and ultraviolet-blocking cotton fabrics based on TiO₂/SiO₂ composite nanoparticles. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 18(10), 6879-6886. https://doi.org/10.1166/jnn.2018.15463

- Xue, W., Krishna, B. V., Bandyopadhyay, A., & Bose, S. (2007). Processing and biocompatibility evaluation of laser processed porous titanium. *Acta Biomater*, 3 (6), 1007-1018. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2007.05.009>
- Zayat, M., Garcia-Parejo, P., & Levy, D. (2007). Preventing UV-light damage of light sensitive materials using a highly protective UV-absorbing coating. *Chemical Society Reviews*, 36(8), 1270-1281. <https://doi.org/10.1039/B608888K>
- Zhang, J., Ren, X., Li, D., Dong, Z., Wang, J., Ren, L., Xue, B., & Li, F. (2021). Enhanced ultraviolet shielding performances of TiO₂ nanorods in different crystalline structures and illite-loaded composites. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 608, 125532. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125532>
- Zhang, Y., Li, S., Huang, F., Wang, F., Duan, W., Li, J., Shen, Y., & Xie, A. (2012). Functionalization of cotton fabrics with rutile TiO₂ nanoparticles: Applications for superhydrophobic, UV-shielding and self-cleaning properties. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 86(3), 413-417. doi.org/10.1134/S0036024412030375
- Zhao, Q., Tan, T., Qi, P., Wang, S., Bian, S., Li, X., An, Y., & Liu, Z. (2011). Preparation and surface encapsulation of hollow TiO nanoparticles for electrophoretic displays. *Applied Surface Science*, 257 (8), 3499-3503. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.11.056>
- Zhuang, S., Xu, X., Yu, J., Feng, B., Xu, W., & Hu, J. (2014). Transparent SnO₂ QDs-based multifunctional glass for ultraviolet-blocking and enhanced hydrophobicity. *Materials Letters*, 128, 291-294. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.04.158>



Boraks Pentahidrat İkamemesinin Çimento Harcının Ses Geçirme ve Mekanik Özelliklerine Etkisi

Effect of Borax Pentahydrate Substitution on Soundproofing and Mechanical Properties of Cement Mortar

Ahmet Filazi¹ , Muharrem Pul² 

¹Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

²Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 16/02/2022

Kabul / Accepted: 28/06/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Bor madeni bakımından ülkemizin oldukça zengindir. Betonda boraks pentahidrat kullanımı ile ilgili çalışmanın az sayıda olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, boraks pentahidrat, çimento içerisine ağırlıkça 5, 10, 15, 20 ve %25 oranında ikame edilerek üretilen çimento harçlarının özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla çimento harçlarında ses geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımı özelliklerinin incelenmesi amacıyla için mekanik ve fiziksel bazı deneyler yapılmıştır. Yapılan test ve deneyler sonucunda, boraks pentahidrat kullanımının çimento harçlarında eğilme ve basınç dayanımı değerlerini düşürdüğü gözlenmiştir. Boraks pentahidrat ikameli çimento harçları içerisinde en yüksek eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve ultrasonik ses hızı geçişinin, %5 boraks pentahidrat ikameli harçlardan elde edildiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Boraks Pentahidrat, İşlenebilirlik, Eğilme ve Basınç Dayanımı, Ultrasonik Ses Hızı Ölçümü”

Abstract

Our country is very rich in terms of boron mine. It has been observed that there are few studies on the use of borax pentahydrate in concrete. In this study, the properties of cement mortars produced by substituting borax pentahydrate in cement at 5, 10, 15, 20 and 25% by weight were investigated. For this purpose, some mechanical and physical experiments were carried out to examine the sound transmission velocity, flexural and compressive strength properties of cement mortars. As a result of the tests and experiments, it was observed that the use of borax pentahydrate decreased the flexural and compressive strength values in cement mortars. It was determined that the highest flexural strength, compressive strength and ultrasonic sound velocity transmission among borax pentahydrate substituted cement mortars were obtained from 5% borax pentahydrate substituted mortars.

Key Words

“Borax Pentahydrate, Workability, Flexural and Compressive Strength, Ultrasonic Sound Velocity Measurement”

1. Giriş

Modern Bor Endüstrisinin 13. yy'a kadar dayandığı bilinmektedir. Türkiye'de ilk olarak Balıkesir'in Susurluk ilçesinde bor minerali tespit edilmiştir. İlerleyen yıllarda MTA ve ETİBANK gibi milli kurumlar ile bor minerali arama ve işletme faaliyetlerine başlamıştır. Ülkemizde halen ETİMADEN tarafından bor araştırmaları devam etmektedir. Dünyada bor madeni rezervleri ve üretimi açısından en fazla olduğu ülke Türkiye ve ABD'dir. Bor elementi üretimi bakımından, Rusya % 23, USA % 28, Türkiye % 33, ve diğer ülkeler % 16 seviyelerindedir. (Altun F.,2005).

Doğada serbest halde bulunmayan bor elementinin %19.8 B₁₀ ve %80.2 B₁₁'den oluşan, atom ağırlığı 10.81, atom numarası 5 olan, yarı iletken özellik gösteren elementtir. (Binici H, Sevinç A. H. ve Durgun M. Y., 2010). Bor elementinin minerallerinde bor oksit ikamesi ile, kalsiyum, sodyum ve magnezyum elementlerinden oluşur ve hidrat bileşikleri halindedir. Tinkal (Na₂B₄O₇.10H₂O), Boraks Pentahidrat (Na₂B₄O₇.5H₂O), Kolemanit (2CaO.3B₂O₃.5H₂O) ve Üleksittir (NaCaB₅O₉.8H₂O) sahip bor elementi ticari ürüne sahiptir. Bor elementinin zenginleştirilmesi sırasında atıklar ortaya çıkmakta ve bu atıklarda çevre problemleri ortaya çıkmaktadır (Erdoğan E., 2006). Bor elementinin farklı türleri betonun içerisine doğrudan ikame edilmeyerek, bağlayıcı olan çimentoya ikame edilmiştir (A. Uğurlu vd., (2004). Boraks atığının çimento ikamesi ile, priz süresinin uzadığı ve betonun basınç dayanımında azalmalar olduğunu ifade etmişlerdir. Borlu çimentolarda, bor ikamesinin hidratasyon süresini uzattığı ve priz süresini geciktirici olarak, bor elementini kullandıkları yaptıkları araştırmada söylemişlerdir (Pehlivanoglu H. E. vd., (2013). Kula vd. (2002) yaptıkları çalışmada, %1 tinkal cevheri atıkları ile çimentonun yer değiştirilmesiyle ilgili çalışmada, Portland çimentosunun özelliklerinde iyileşmeye neden olduğunu, priz süresini gecikme meydana gelse de çimento içerisinde %5'e kadar ikame edebileceğini söylemişlerdir. Targan vd. (2003) yaptıkları çalışmada, %4 kolemanit atığı ve puzolonik malzemelerle yaptıkları çalışmada, düşük puzolan içeren çimento ile ikame edilenlere göre, dayanımlarının yüksek olduğunu yaptıkları çalışmada söylemişlerdir. Buda bize puzolanik katkılarla ile bor atıklarının bir arada kullanılmasının çimentonun özelliklerini iyileştirmede daha iyi olacağını ifade etmektedir. tinkal ve kolemanit zenginleştirilmesine, ortaya çıkan atığın çimento içerisine ikame ederek yaptıkları çalışmada, tinkal üretimi atığının mekanik dayanımda artışlara ve radyoaktif geçirgenlikte azalmalara yol açtığını belirtmişlerdir (Boncukoğlu vd. (2001, 2002). Kolemanit elde ederken çıkan atıkların ise, çimento bünyesindeki tabii alçı taşı yerine kullanarak, çimento harcı ve betonda priz süresini uzadığını yaptıkları çalışmada ifade etmişlerdir.

Bu çalışmada, Boraks Pentahidrat, %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 ikame edilerek kompozit çimento harç örnekleri üretilmiştir. Üretilen bu harç örnekleri üzerinde, işlenebilirlik, eğilme ve basınç dayanımı ve ultrasonik ses hızı ölçümü deneyleri gerçekleştirilmiştir.

2. Deneysel Çalışma

2.1. Malzeme

Yapılan çalışmada, Boraks Pentahidrat ikameli çimento harcında, CEM I 42.5 R Portland çimentosu (PÇ), standart kum ve içme suyu kullanılmıştır. PÇ'nun, kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir (TS EN 197-1).

Tablo 1. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim (%)								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O +0,658 × K ₂ O
21,02	5,38	3,22	62,12	1,98	0,39	0,81	3,11	0,92
Fiziksel Özellikler								
Yoğunluk (g/cm ³)			Blaine inceliği (cm ² /g)			Yanma kaybı (%)		
3,18			3356			2,37		

Bu çalışmadaki boraks pentahidrat, ETİMADEN İşletmeleri Genel Müdürlüğünden temin edilen bor mineralidir. Tablo 2'de Boraks Pentahidrat Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri verilmiştir.

Tablo 2. Boraks Pentahidrat Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Kimyasal Özellik	Değer	Fiziksel Özellik	Değer
B ₂ O ₃	47,80-49,00 (%)	Yoğunluk	1,81 g/cm ³ (20 °C)
Na ₂ B ₄ O ₇ .5H ₂ O	100,00-102,51 (%)	Molekül Ağırlığı	291,35 g/mol
Na ₂ O	21,36-21,81 (%)	Erime Noktası	741 °C
SO ₄	200 max. (ppm)	Kaynama Noktası	1575 °C
Cl	70 max. (ppm)		
Fe	3 max. (ppm)		
Suda çözünmeyenler	150 max. (ppm)		

Çalışma sırasında, TS EN 196-1'e standardına göre, boraks pentahidrat ikameli çimento harç numuneleri üretilmiştir. Çimento harç üretiminde çimento ağırlığının %0 şahit, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında Boraks Pentahidrat ile örnek numuneler üretilmiştir. Tablo 3'de üretilen harç numune örneklerinin malzeme oranları gösterilmiştir.

Tablo 3. Karışıma giren malzeme miktarı (g)

Bileşenler	Kontrol	B5	B10	B15	B20	B25
Su	225	225	225	225	225	225
Çimento	450	427.5	405	382.5	360	360
Boraks pentahidrat	0	22.5	45	67.5	90	112.5
Rilem Cembureau Standart Kumu	1350	1350	1350	1350	1350	1350

Boraks pentahidrat ikameli, çimento harç örneklerinin işlenebilirliğini tespit etmek için, yayılma tablasında %110 \pm 5 yayılmayı sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Yayılma deneyleri, alt çapı ve üst çap ölçüleri 100 mm ile 70 mm ve boyu 60 mm olan kesik koni ile yapılmıştır. Harç, kesik koni içine iki tabaka halinde yerleştirilerek sıkıştırılmıştır. Deney sonunda oluşan çap ölçülerek ortalaması alınmıştır (ASTM C109 ,2016). Şekil 1’de mekanik dayanım ve ses geçirme hızı deneylerinde kullanılan 40×40×160 cm boyutundaki çimento harçları ve mekanik deneylerin yapılışı gösterilmektedir.

**Şekil 1.** Boraks Pentahidrat ikameli çimento harçları ve mekanik deneyler

2.2. Eğilme ve basınç dayanımının belirlenmesi

Boraks Pentahidrat ikameli çimento harçları için 7 gün ve 28 gün içme suyunda bekletilen 40×40×160 mm boyutundaki çimento harçları kür havuzundan çıkartılmıştır. Daha sonra (50 \pm 10) N/s yükleme değerindeki eğilme presi ile eğilme deneyleri ve (2400 \pm 200) N/s yükleme değerindeki basınç presiyle de 40×40 mm kesitindeki numuneler üzerinde basınç deneyleri yapılmıştır (TS 196-1).

2.3. Ultrases geçiş hızı deneyi

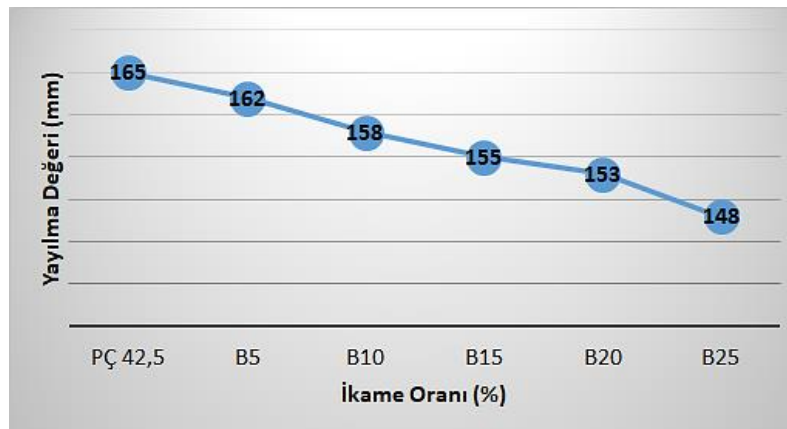
Kullanılan deney cihazı, 55 kHz’lik ses dalgasını, iki güç çevirici harç numune örneklerinin yüzey kısmına yerleştirerek, Ultrasonik test cihazından, ses geçiş süresi (t, μ s) okunarak, ses geçiş hızı (Vs, km/s) hesaplama yöntemi ile tüm örnekler uygulanarak veri sonuçları değerlendirilmiştir (ASTM C 597).

3. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan çalışmada, çimento harçlarının yayılma değerleri (işlenebilirlik), boraks pentahidrat ikameli çimento harç örnek numunelerinin, 7 gün ve 28 günlük eğilme, basınç dayanım deneyleri ve ultrases geçiş hızı deney veri sonuçları değerlendirilmiştir.

3.1. Yayılma deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Belirli oranlarda boraks pentahidrat ikameli çimento harçlarının, yayılma tablasında TS EN 196-1’e standardına göre yapılan yayılma deneyinden elde edilen veriler ile oluşturulan grafik Şekil 2’de verilmiştir.

**Şekil 2.** Boraks Pentahidrat İkameli Çimento Harçlarının Yayılma değerleri

Şekil 2’de görüldüğü üzere boraks pentahidrat ikame oranı arttıkça, yayılması azalmaktadır. Boraks pentahidrat ikameli üretilen kompozit harç örneklerinin işlenebilirliği azalmış, ikame oranı arttıkça yayılma değerini olumsuz yönde etkilemiştir. Bunun en büyük sebebi bor miktarı arttıkça su ihtiyacının artmasıdır. Kolemanit konsantratör atıklarıyla ilgili çimento harç örneklerinin üretiminde yaptığı çalışmada, borlu aktif belit çimentosu ile düşük hidratasyon ısılı çimentoların daha ziyade düşük yüzey/hacim oranlı yapı elemanları benzeri kütle betonlarında kullanılmasının daha uygun olduğunu ifade etmiştir (Eyyüboğlu, S., (2013). Ustabas (2012) Kolemanit ve üleksit ile yaptıkları çalışmada, her iki bor mineralinin çimentonun priz süresini artırdığını, üleksit mineralinin kolemanit mineraline kıyasla priz başlama süresini daha fazla artırdığını, eğilme ve basınç dayanım değerlerinde herhangi bir artışın olmadığını ifade etmişlerdir. Kolemanit harcı içerisindeki karışım suyunu bağlayarak harcın kıvamının azalmasına dolayısıyla harcın kıvamını azaltma özelliği olduğu belirtmişlerdir.

Bor ikameli üretilen çimento harç örneklerinde, PÇ’na göre çok düşük hidratasyon ısısı açığa çıktığından dolayı, sıcaklıkla oluşabilecek çatlakları önlemede, akışkanlığı yüksek olan betonların ve hidratasyon ısısını kontrol etmek için çok ideal bir mineral katkı malzemesi olarak kullanılabilir.

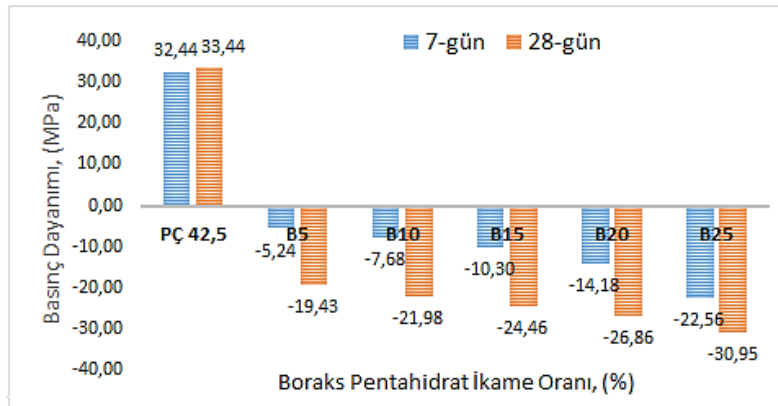
3.2. Basınç ve eğilme dayanımları deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Belirli oranlarda boraks pentahidrat ikameli çimento harçlarının, TS EN 196-1’e uygun şekilde basınç ve eğilme dayanımları testlerinden elde edilen değerler Tablo 4’te gösterilmektedir.

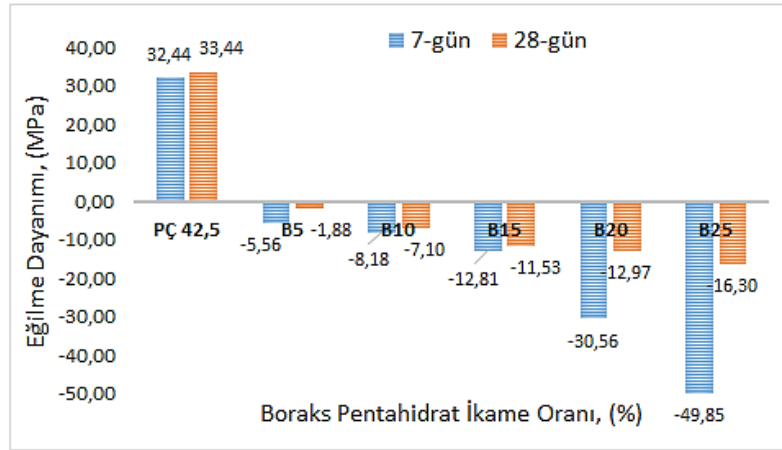
Tablo 4. Boraks pentahidrat İkameli Harçların 7 ve 28 Günlük Ortalama Basınç ve Eğilme Dayanımı Değerleri

Boraks Pentahidrat İkame Oranı	Basınç Dayanımı (MPa)		Eğilme Dayanımı (MPa)	
	7-gün	28-gün	7-gün	28-gün
PÇ 42,5 (%0)	32,44	52,50	6,48	9,02
B5 (%5)	30,74	42,30	6,12	8,85
B10 (%10)	29,95	40,96	5,95	8,38
B15 (%15)	29,10	39,66	5,65	7,98
B20 (%20)	27,84	38,40	4,50	7,85
B25 (%25)	25,12	36,25	3,25	7,55

Tablo 4’te de görüldüğü gibi 7 günlük boraks pentahidrat ikameli çimento harçlarının basınç ve eğilme dayanımları %0 ikameli PÇ 42,5 referans numuneyi (32.44 MPa) dayanımının altında kalmıştır. Bunun sebebi boraks pentahidratın ilk günlerdeki puzolonik reaksiyon tepkimesinin düşük olmasıdır. Boraks pentahidratın, çimento içerisine ikame oranı arttıkça eğilme ve basınç dayanım değerlerinde azalmalar yapılan çalışmada tespit edilmiştir. 28 günlük Boraks pentahidrat ikameli çimento harçlarının arasında en yüksek dayanımının %5 ikame oranında olduğunu görmekteyiz. Boraks pentahidratın ikame oranının artması ile eğilme ve basınç dayanımlarında azalma gözlemlenmiştir. Şekil 3 ve 4’te 7 ve 28 günlük Boraks pentahidratın ikameli çimento harcı basınç dayanımlarının PÇ 42,5 referans numuneye göre (%) cinsinden değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3. Boraks Pentahidrat İkameli Çimento Harçlarının Basınç Dayanımları yüzde değişimi



Şekil 4. Boraks Pentahidrat İkameli Çimento Harçlarının Eğilme Dayanımları yüzde değişimi

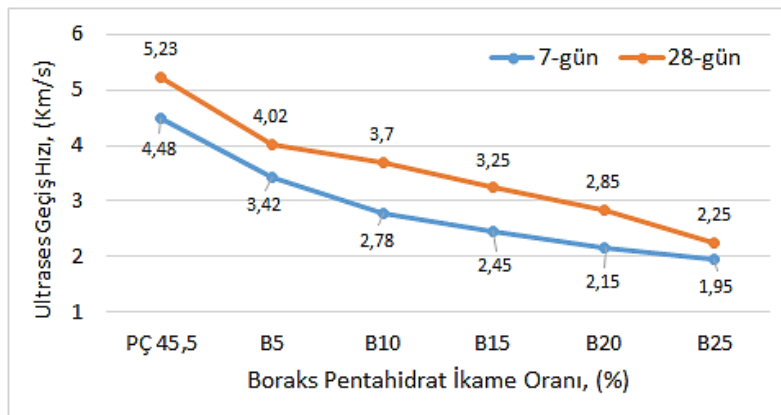
Şekil 2 ve Şekil 3' teki grafikler incelendiğinde, eğilme ve basınç değerleri incelendiğinde şahit numuye göre dayanım değerleri düşük çıkmıştır. Boraks pentahidrat ikameli çimento harçlarına göre kıyas yapıldığında en yüksek basınç dayanımı %5 ikameli (42,30 MPa), en düşük basınç dayanımı ise %25 ikame oranında tespit edilmiştir. Eğilme dayanımı da basınç dayanımına benzer şekilde gerçekleşmiştir. Boraks pentahidrat oranını artması ile basınç dayanımı arasında ters orantılılık söz konusudur.

Literatürde yapılan çalışmada (Özdemir, M., Öztürk, N.U.,2003), bor içeren kil atık ikameli çimentoda katkı malzemesi olarak kullanımı araştırılmıştır ve bu araştırma sonucunda, Türk Standartları (TS) değerleri mukayese yaparak değerlendirmişlerdir. Bu değerlendirme sonucunda, %5 ve %10 kadar çimento katkısı olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Aydın (2009) yaptığı çalışmada kolemanit atığının çimento ile %3, %5, %10 ve %15 oranında ikame etmişlerdir. Yapılan bu çalışmanın dayanım sonucunda %3 ve %5 bor ikamesini dayanım özelliklerini geliştirdiğini ifade etmişlerdir. Bor atığının, mineral katkı olarak betonda kullanılabileceği yaptıkları çalışmada söylemişlerdir. Olgun vd. (2007), kolemanit atığının alçıtaşı yerine kullanılmasıyla priz süresinin artırdığını, harç örneklerinin ilk günlerde basınç dayanım değerinin düşük olduğunu yaptıkları çalışmada söylemişlerdir. Fındık (2007) yapılan bir çalışmada ise, çimento ve beton için mineral katkısının olarak, bor atığının %3 ve %5 oranında kullanmış ve bor katkılı örnek numunelerin, şahit numunelerden daha düşük rötre yaptıklarını bor ikameli harç örneklerinin kontrol numune örneklerine göre %40 daha düşük rötre değeri verdiği için dolayı rötre azaltıcı katkı olarak kullanılabileceği söylemişlerdir. Benk ve Çoban (2012) yaptıkları çalışmada, %2.5 boraks eklenerek yapılan sertleşmiş H3PO4 veya NH4NO3 melas bağlayıcının çimento veya harca alternatif olabileceği sonucuna varmışlardır.

Sonuç olarak, yapılan çalışma ve literatür incelendiğinde, bor atıklarının betonun dayanımını ve kıvamını arttırmak için mineral katkıları betona veya çimentoya ikame edilebileceği yapılan çalışma göstermiştir. Ayrıca boraks pentahidrat ikame edilen çimentonun hidrasyon ısısını düşürerek, özellikle kütle betonu gibi betonların bazı özelliklerini iyileştirileceği düşünülmektedir.

3.3.Ultrases geçiş hızı deneyi sonuçlarını değerlendirilmesi

ASTM C 597 standardında beton katilerinin ultrases geçiş hızı değerleriyle yapılan karşılaştırmaları Tablo 5'te, belirli oranlarda boraks pentahidrat ikameli çimento harçlarının, 7 ve 28 günlük ultra ses geçiş hızlarına ait ölçüm sonuçları ise Şekil 5'teki grafikte verilmiştir.



Şekil 5. Boraks Pentahidrat İkameli Çimento Harçlarının Ultrases Geçiş Hızları

Tablo 5. Ultrases Geçiş Hızı Değerleri

Hız (km/s)	≥4.5	3.5-4.5	3.0-3.5	2.0-3.0	≤2.0
Beton kalitesi	Çok İyi	İyi	Orta	Zayıf	Çok Zayıf

Şekil 5’te verilen ultrasonik ses hızı deney very sonuçları incelendiğinde, referans numunenin 7 ve 28 günlük değerleri “mükemmel” olarak, %5, %10 ve %15 boraks Pentahidrat ikameli çimento harçların 28 günlük “iyi” olarak değerlendirilmiştir. Neville, (1990) yaptığı araştırmasında; ses geçiş hızı değeri 3,5-4,5 Km/s arasında olan betonlar için iyi kalitededir. Elde edilen ultrases geçiş hızı değerlerine göre, %20 ve %25 ikameli numuler ise “zayıf” olarak tespit edilmiştir. Boraks pentahidrat ikameli çimento harçlarında en yüksek ses hızına, %5 Boraks Pentahidrat içeren numunelerde ulaşıldığı yapılan çalışmada görülmüştür. Ultrases geçiş hızının en yüksek control numunesinde olduğu, en düşük ise %25 ikameli çimento harcı numunesinde olduğu ortaya çıkmıştır. Üretilen boraks pentahidrat ikameli çimento harç örneklerinin ultrases geçiş hızı süreleri için % 3,87-4,15 Km/s arasındaki katkılar için 3,63-4,89 Km/s arasında ve kür-katkı yüzdesinin ise 3,63-4,80 aralığında kaldığı için üretilen numunelerin iyi kalitede Kabul edilebileceği anlaşılmaktadır. Erdoğmuş, E.,(2006) kolemanit konsantratör atığı ikamesi ile yaptığı araştırmada, çimento harcı karışımlarının ikamesiz çimentoya göre daha fazla suya ihtiyacı olduğunu, basınç dayanım değerlerinin ise ikamesiz çimento harcından daha düşük çıktığını söylemişlerdir. Ayrıca kolemanit konsantratör ikamesini priz süresini artırdığı, basınç dayanımını düşürdüğünü yapılan çalışmada ifade etmişlerdir.

Sonuç olarak yapılan katkı ile birlikte çimento kullanım özelliklerine göre avantaj ve dezavantajlar sağlamıştır. Ayrıca bazı sonuçların düşük olmasına rağmen standartların üzerinde olduğu ve ekonomik olması sebebiyle üretilmesi herhangi bir sakınca yoktur.

4. Sonuçlar

Boraks Pentahidrat ikameli Çimento Harçları için yapılan çalışmanın genel sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- 7 günlük en yüksek basınç dayanımı değeri referans numunesi en düşük basınç dayanımı değerini hidrasyon süresi uzun olan Boraks Pentahidrat ikame oranı en yüksek numune vermiştir. Boraks Pentahidrat erken yaş dayanımını azaldığı yapılan çalışmada görülmüştür.
- Boraks pentahidrat miktarının artmasıyla, işlenebilirliği düşüğünü ve çimento harçlarının daha fazla suya ihtiyacı olduğu yapılan çalışmada ortaya çıkmıştır.
- 28 günlük basınç ve eğilme dayanımları incelendiğinde, ikamesiz çimento harcının eğilme ve basınç dayanımı en yüksek elde edilmiştir. İkameli çimento harcı dayanım değerlerinde en yüksek dayanımı ise, %5 ikame oranında olduğunu görmekteyiz.
- Boraks pentahidrat ikameli çimento harçlarının ultrases geçiş hızı verileri ile basınç dayanımı verilerinin sonuçları kıyaslandığında %5 Boraks pentahidrat içeren çimento harcı numunelerin olduğu gözlemlenmiştir.
- Ultrases geçiş hızı üretilen numunelerden ne kadar hızlı geçerse numunelerin içerisindeki boşluk oranı o kadar az demektir. Ultrases hızına bakıldığı zaman, çimento harçlarının basınç dayanımı ile kıyas edildiğinde, ses geçiş hızı yüksek olan beton basınç dayanımını daha iyi, hızı düşük olan numunelerde ise basınç dayanımı daha az dayanıklı olduğu söylenebilir.
- Bor minerallerinin zenginleştirirken ortaya çıkan atıkları, canlılara ve çevreye verdiği zararları en aza indirgeyerek, bor atıklı kompozit malzemelerin üretilmesi, enerji tüketiminin azaltılması buna bağlı olarak maliyetlerin düşmesi, sürdürülebilir kompozit çimentolu bağlayıcılar üretilmiş olacaktır.
- Betonun dayanımını ve kıvamını arttırmak için bu tür bor mineralleri betona ikame edilebilir. Boraks İkame edilen çimentonun hidrasyon ısısını azaltarak, özellikle kütle betonu gibi betonların bazı özelliklerini iyileştirildiği görülmüştür.
- Bor ikameli üretilen çimento harç örneklerinde, PC’na göre çok düşük hidrasyon ısısı açığa çıktığından dolayı, sıcaklıkla oluşabilecek çatlakları önlemede, akışkanlığı yüksek olan betonların ve hidrasyon ısısını kontrol etmek için çok ideal bir mineral katkı malzemesi olarak kullanılabilir.

Referanslar

Altun F (2005). Bor. Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, 1: 80, Ankara

ASTM C597-16, Betondan Darbe Hızı için Standart Test Yöntemi, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org

ASTM C109 / C109M - 16a, “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars”, (2016).

Aydın U (2009). Kolemanit Atığının Beton Dayanımına Olan Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya.

Benk, A. ve Çoban, A., (2012). Possibility of producing lightweight, heat insulating bricks from pumice and H3PO4- or NH4NO3-hardened molasses binder. *Ceramics International*, 38 (2012) 2283–2293.

- Binici H, Sevinç A H ve Durgun M Y (2010). Barit, Bazaltik Pomza, Kolemanit ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonların Özellikleri. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(1), Kahramanmaraş
- Boncukoglu, R., vd., (2001), Utilization of borogypsum as set retarder in portland cement production, Cement and Concrete Resarch, 32, 471- 475.
- Boncukoglu, R., vd., (2002). “Utilization of trommel sieve waste as an additive in portland cement production”, Cement and Concrete Resarch, 32, 35 - 39.
- Erdoğan E (2006). Çimento Bor Katkısı, Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu İlavesiyle Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Erdoğan, E. (2006). “Çimento Bor Katkısı, Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu İlavesiyle Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, İstanbul, (2006).
- Eyyüboğlu, S., (2013), “Kolemanit Konsantratör Atıklarının Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, 130s.
- Fındık A (2007). Kolemanit Konsantratör Atığının Beton ve Harç Numunelerinin Bazı Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay
- Kula I., Olgun A., Sevinc V., Erdogan Y. (2002). .An investigation on the use of tincal ore waste, fly ash and coal bottom ash as Portland cement replacement materials. Cem. Concr. Res. 32, pp. 227– 232.
- Pehlivanoglu H. E. vd, (2013). “The Effect of Boron Compound to Setting Time of Cement and Controllability., SDU International Technologic Science Vol. 5, No 3, December 2013 pp. 39-48.
- Olgun A ve Erdoğan Y (2001). Etibor Bandırma Borik Asit İşletmesi Atıklarının Seramik Endüstrisinde Kullanımı. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. Sayı 2 Kütahya: 58-61
- Özdemir, M., Öztürk, N.U., (2003), “Utilization of clay wastes containing boron as cement additives”, Cement and Concrete Research, 33, 1659–1661.
- Targan Ş., Olgun A., Erdoğan Y., Sevinç V. (2003). Influence of natural pozzolan, colemanite ore waste, bottom ash, and fly ash on the properties of Portland cement. Cem. Concr. Res. 33, pp. 1175-1182,
- TS EN 197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, 2012.
- TS EN, T. 196-1, Methods of testing cement–Part 1: Determination of strength. Turkish Standard Institution, Ankara, 2016.
- TS EN 1015-3, (2000).Kagir Harcı Deney Metotları-Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini(Yayımla Tablası ile). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- Uğurlu vd., (2004). “Bor İçeren Kil Atıkların Çimento İçerisinde Değerlendirilmesi. Uluslararası Bor Sempozyumu, 23-25 Eylül 2004 Eskişehir Türkiye”.
- Ustabaş, İ., (2012). Kolemanit ve Üleksitin Çimentoda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Rize Üniversitesi, ss:367-375 Uyanık, O., Gülay, F.G. ve Tezcan, S., 2012.



İç Ortam Bitkilerinin Takibi için IoT Tabanlı Akıllı Gömülü Sistem Tasarımı

IoT Based Smart Embedded System Design for Indoor Plants Tracking

Hayati Mamur^{1*}, Zeynep Dicle², Süleyman Erdener³

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, 45140, Manisa, TÜRKİYE

²RFTEK Elektronik, Eyüpsultan, İstanbul, Türkiye

³Vestel Elektronik Sanayi ve A. Ş., Manisa Teknokent, 45140, Manisa, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 25/02/2022

Kabul / Accepted: 30/06/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Günümüzde gömülü sistem teknolojilerinden olan mikrodenetleyicilerdeki gelişmeler bu teknolojik uygulamaları ucuzlatmış ve nesnelerin interneti (IoT-Internet of Things) çalışmalarını ivmelendirmiştir. İnsanların yaşamlarını kolaylaştırmak için interneti kullanma istekleri artmıştır. Bu isteklerden biri, yaşadıkları ortamlarından bir süreliğine uzaklaştıklarında iç ortamlarda organik olarak yetiştirdikleri bitkilerinin canlı ve verimli kalmalarını istemeleridir. Bu çalışmada, iç ortamda organik gıda üretiminin daha verimli ve daha uzun olmasını sağlamak amacıyla IoT'li bir gömülü sistem uygulaması gerçekleştirilmiştir. Ortamda yetiştirilen bitkinin takibi IoT'li akıllı bir gömülü sistem ile yapılarak kullanıcı mobil cihazla bilgilendirilmiş ve iklimlendirme ayarlarını yapmıştır. Sistemde, algılayıcılar ile ortamın durumu belirlenmiştir. Bu bilgiler mikrodenetleyiciye aktarılmıştır. Mikrodenetleyici gelen veriler analiz edip gerekli uyarıları Wi-Fi üzerinden yetiştiriciye ulaştırmıştır. Yetiştiricinin ve mikrodenetleyicinin yazılan algoritmaları ile gerekli durumlarda sisteme müdahale etmesi sağlanmıştır. Sonuçta, iç ortam bitkilerine ait olan verilerin IoT tabanlı gömülü sistem ile anlık takibinin yapılması, sisteme uzaktan müdahale edilmesini sağlamış ve bitkilerin yaşam ömrü uzatılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Gömülü sistem, mikrodenetleyici, nesnelerin interneti, IoT, tarım”

Abstract

Today, developments in microcontrollers being embedded system technologies have made these technological applications cheaper and accelerated the Internet of Things (IoT) studies. People's desire to use the internet to make their lives easier has increased. One of these requests is that they want their plants grown organically in indoor environments to remain alive and productive when they are away from their living environment for a while. In this study, an embedded system application with IoT has been implemented in order to ensure that organic food production in the indoor environment is more efficient and longer. The plant grown in the environment was tracked with a smart embedded system with IoT, and the user was informed with a mobile device and the environment conditioning settings were carried out. In the system, the state of the environment was determined with the sensors. This information is transferred to the microcontroller. The microcontroller analyzed the incoming data according to the previously taught information and delivered the necessary warnings to the grower via Wi-Fi. With the algorithms written by the grower and the microcontroller, it is ensured that the system intervenes when necessary. Ultimately, instant monitoring of the data belonging to indoor plants with the IoT-based embedded system enabled remote intervention in the system and the lifespan of the plants was extended.

Key Words

“Embedded system, microcontroller, internet of things, IoT, agriculture”

1. Giriş

Gömülü sistemler, işlemci içerisine yazılan bir program ile çevresel elemanları bağımsız bir şekilde çalıştıran ve kontrol eden elektronik sistemler olarak tanımlanmaktadır (Türk and Lüy, 2021). Gömülü sistemler hem mikroişlemcili hem de mikrodenetleyicili donanımlar ile yapılmaktadır (Duran and Teke, 2019). Her mikrodenetleyicili sistem gömülü sistem olarak isimlendirilirken her gömülü sistem mikrodenetleyicili sistem değildir. Son zamanlarda mikrodenetleyicili gömülü sistemler diğer gömülü sistemlere nazaran oldukça ucuz mal edilebilmektedir (Malinowski and Yu, 2011). Kolay bulunabilir olmaları, sistem kurulumunun basitliği, az enerji harcamaları ve yüksek performans göstermeleri nedenlerinden dolayı yaygın bir kullanım alanı bulmaktadırlar (Salah and Zneid, 2019).

Mikrodenetleyicili sistemlere kablosuz veri aktarımının eklenmesi Endüstri 4.0 uygulamalarından olan nesnelerin interneti (IoT-Internet of Things) uygulamalarını arttırmıştır (Kanoun et al., 2021). IoT ile nesneler; mobil telefonlar, tabletler, bilgisayarlar ve hatta nesneler birbirleri ile haberleşebilir duruma gelmiştir (Chiang and Zhang, 2016). Birbirleri arasındaki haberleşmeleri radyo frekans (RFID-Radio Frequency Identification) (Cui et al., 2019), Bluetooth (Dasu and Raghunath, 2021) ve kablosuz sensör ağları (WSN-Wireless Sensor Networks) (Mishra and Varma, 2021) gibi iletişim yolları ile gerçekleştirmektedirler (Erdal and Ergüzen, 2020). Böylelikle nesnelerin uzaktan izlenebilirliği, kontrolü ve toplanan verilerinin analiz edilebilirliği sağlanmıştır (Liao et al., 2020). Bunlara ek olarak, akıllı mobil telefonlardaki Android ve IOS program geliştirme uygulamaları bu IoT uygulamalarının paralelinde hızlı bir ivme ile artmaya devam etmektedir (Ray, 2016). Bu gelişmelere bağlı olarak birbiri ile haberleşen cihaz sayılarının daha fazla artacağı öngörülmektedir (Khanna and Kaur, 2020).

İnternet, akıllı mobil telefonları ve mikrodenetleyicilerdeki gelişmelerin paralelinde evlerde kullandığımız buzdolabından (Rao et al., 2021) aydınlatma sistemlerine (Singh et al., 2019) kadar pek çok donanım IoT tabanlı olarak çalışır hale gelmiş ve bulut ağlara veri aktarır durumdadırlar (Kılıç and Bayır, 2017). Bunlarla birlikte akıllı evler (Taj et al., 2018), akıllı şehirler (Szum, 2021) ve akıllı tarım (Hu et al., 2020) gibi terimler beraberinde kullanılmaya başlanmıştır. Endüstride otonom olarak çalışan süreçlerin verileri merkezi denetim ve veri edinim sistemleri (SCADA-Supervisory Control and Data Acquisition System) ile internetten bağımsız olarak yapılırken, internet teknolojileri ve gömülü sistemlerin ilerlemesi ile IoT temelli bulut SCADA sistemleri yaygınlaşmıştır (Demircan and Akyüz, 2019). Böylece endüstriyel IoT kavramı ortaya çıkmıştır (IIoT-Industrial IoT) (Ercan and Kutay, 2016). Hem IoT sistemlerde hem de IIoT sistemlerde bulut ağlarına taşınan veriler oldukça büyük sistemleri oluşturmuştur. Tüm verilerin kablosuz ağlarla internet ortamına aktarılması ve buradan kontrol edilmesi beraberinde veri güvenliğini sorgulanır hale getirmiştir (Terence and Purushothaman, 2020). Bu dezavantajlarının olmasına rağmen IoT hızla uygulama alanı bulmaya devam etmektedir.

Son yıllarda meydana gelen gelişmeler tarım alanında otonom ve akıllı sistemleri gündeme getirmiştir. Bu sistemlerle ilgili IoT temelli akıllı algoritmali mikrodenetleyici uygulamaları dikkati çekmektedir. Bu alanda, araştırmacılar ve mühendislerin yaptıkları uygulamalar insanların yaşamlarını kolaylaştırıcı nitelikte olan ön açıcı çalışmalardır. Uzaktan kontrollü dronlar ile tarımsal alanların denetlenmesi (Altın et al., 2021), Bluetooth teknolojilerini kullanan akıllı sera uygulamaları (Öztürk et al., 2021), topraksız tarım uygulamaları (Baydur et al., 2021), düşük maliyetli sulama sistemleri (Alpay, 2021) ve karar verme algoritmalarına sahip sera otomasyonları (Ayan and Şenol, 2016) ilgi çekici uygulamalar arasında görülmektedir. Yine, tarımsal alanları ilgilendiren damlama sulama sistemleri (Bingöl et al., 2018), elma bahçelerinin sulama durumunun nem sensörü ile bilinmesi (Işık, 2017) ve gerçek zamanlı iç ortam hava kalitesi izleme sistemi (Üçgün et al., 2020) kurularak bulut ağlarına IoT sistemlerle veriler iletilmekte, analiz edilmekte ve istenildiğinde müdahale edilmektedir. Bunlara ek olarak, kümes hayvancılığında verimliliğin artırılması (Durgun, 2021), akıllı tarım için hava durumu izleme (Soy and Dilay, 2021), süper kapasitör ile birlikte kullanılan solar enerjili kablosuz gömülü sistem veri iletimi (Yüksel, 2019) gibi yapılan IoT çalışmalarına rastlamak mümkündür.

Kentleşmenin artmasıyla insanların yeşile ve tarımsal üretimde genetiği değiştirilmemiş olan ürünlere rağbetlerinin artması akıllı organik tarımı iç ortama entegre etme fikrini ortaya çıkartmıştır. Bununla birlikte, bazı tarım ürünleri yetiştirenlerin güvenin azalması bu tür arayışlara giren insanları kendi ürünlerini üretmeye sevk etmiştir. Dahası, gıda fiyatlarının gün geçtikçe artması insanları iç ortamlarda bitki yetiştiriciliğine daha da fazla yönlentmiştir. Ancak iç ortamda bitkilerin bakımı kolay olmadığından, iç ortamda bitki yetiştirmede birçok problemle karşı karşıya kalınmaktadır. Birçok bitki uygun iklimlendirmenin sağlanamaması sebebiyle ölmektedir. Bu çalışmanın amacı, akıllı tarımı iç ortamda kullanarak tarımsal üretimin verimliliğini yükseltmek, toprak canlılığını artırmak ve ürün yönetiminde verilen zararı en aza indirmektir. Bu amacı gerçekleştirmek için IoT temelli akıllı mikrodenetleyicili gömülü sistem tasarımı yapılmıştır. Sistemde, saksı bitkilerinin toprağının nem oranı, ortamın nem oranı, ortamın sıcaklığı, bitkinin aldığı ışık, bitkinin büyüme hızı bilgileri son teknoloji ürünü olan sensörler yardımıyla alınmıştır. Böylelikle iç ortamda yetiştirilen bitkilerin takibi ve analizi yapılarak kullanıcının yetiştirdiği bitki hakkında verileri tutulmuş ve analiz edilmiştir. Sisteme kontrol sinyali gönderilerek bitkiye uygun su verilmiş ve su israfının önüne geçilmiştir. Ek olarak, bitkinin konumuna göre verdiği veriminin verileri tutulmuştur. Bununla birlikte bitkiye verilen gübrelerle verdiği ürünlerin verileri kaydedilmiştir.

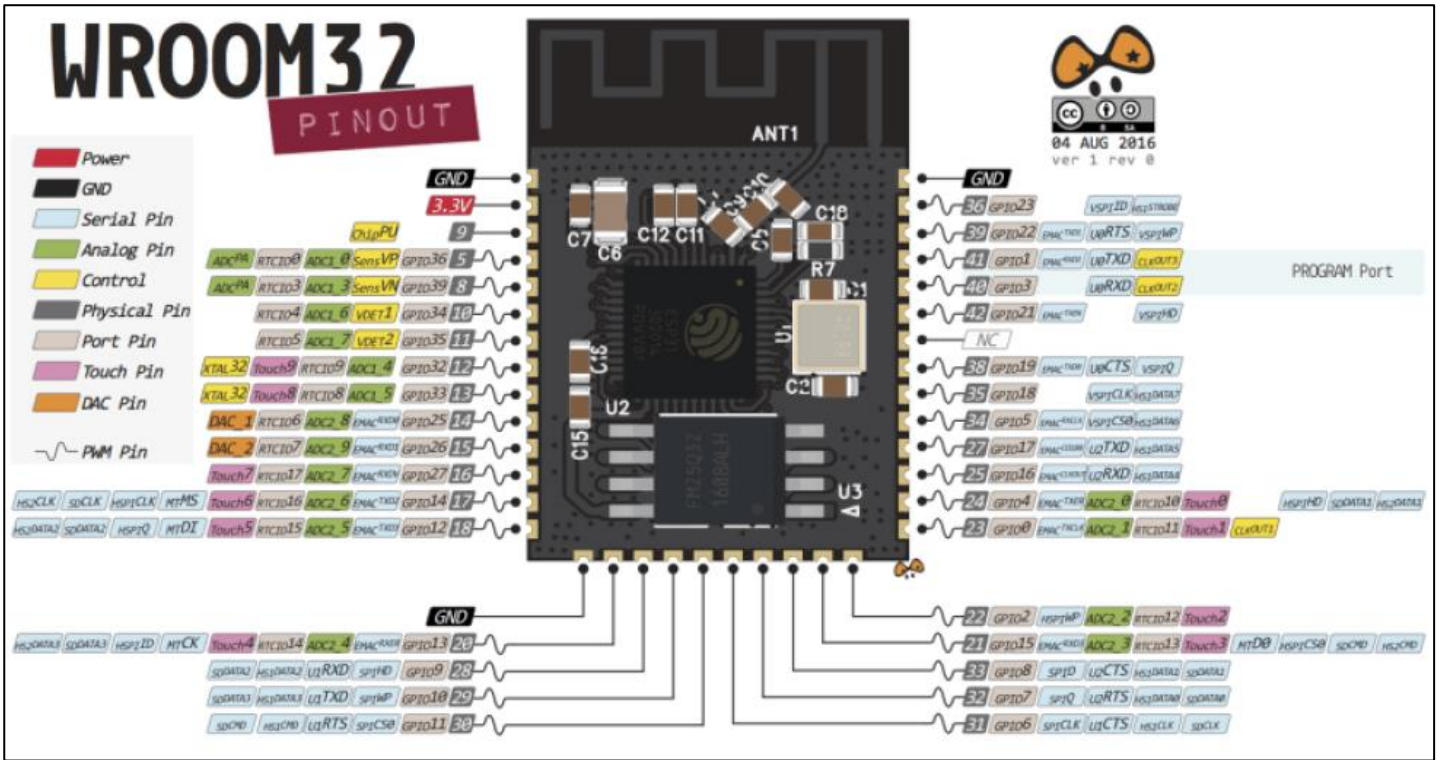
Çalışmanın sunumu için "Giriş" bölümünde, IoT kavramı, kullanım alanları ve IoT sistemlere duyulan ihtiyaç ile ilgili genel bilgiler verilip yapılan literatür çalışmaları açıklanmıştır. İkinci bölümde, iç ortam bitkilerinin takibinde IoT tabanlı akıllı gömülü sistem tasarımını yapmak için kullanılan "Materyal" sunulmuştur. Daha sonra üçüncü bölümde "Metot" verilmiştir. Dördüncü bölümde, uygulamadan elde edilen çıktılar ve değerlendirmeler "Yorumlar" bölümünde verilmiştir. Son olarak beşinci bölümde, yapılan çalışmadan çıkartılan genel çıkarımlar "Sonuçlar" bölümünde açıklanmıştır.

2. Materyal

Bu çalışmada, ESP-WROOM-32 mikrodenetleyicisi, DHT11 sıcaklık ve nem sensörü, iki elektrotlu toprak nem YL-69 higrometre sensörü, GY-30 ışık sensörü, 1,44 inç Arduino TFT LCD ekran modülü ve OV7670 kamera modülü kullanılmıştır. Mobil uygulama yazılımı için Blyn uygulaması ile yazılım yapılmıştır. Sensörlerle toprağın pH değeri, toprağın su seviyesi, ortamın sıcaklığı, ortamın nemi, ortamın ışık yoğunluğu değerleri ESP-WROOM-32 mikrodenetleyicisine iletilmiştir. Mikrodenetleyiciye bağlanan Arduino TFT LCD ekran modülünde alınan bilgiler ve uyarılar gösterilmiştir. ESP-WROOM-32 mikrodenetleyicisindeki Wi-Fi ile tüm veriler veri tabanında depolanmıştır. Yapılan mobil uygulama ile analiz için veri tabanından alınan değerler kullanıcıya anlık ulaştırılabilmektedir.

2.1. Mikrodenetleyici

Uygulamada kullanılan ESP-WROOM-32 mikrodenetleyicisinin en önemli özelliklerinden bir tanesi üzerinde Wi-Fi modülünü bulundurmasıdır. Ayrıca Bluetooth modülü de içermektedir. Mikrodenetleyicinin içerisinde Xtensa® 32-bit LX6 mikroişlemcisi vardır. 32 tane GPIO pini ile dış ortama bağlanabilir. 16 tane analog dijital çevirici (ADC-Analog Digital Converter), 2 tane seri çevresel arayüz (SPI-Serial Peripheral Interface), 1 tane ara entegre devre iletişimi (I²C-Inter-Integrated Circuit), 1 tane evrensel asenkron alıcı verici iletişimi (UART-Universal Asynchronous Receiver Transmitter), 32 tane darbe genişlik modülasyonu (PWM-Pulse With Modulation) pinleri bulunmaktadır. 2,7 V- 3,3 V besleme gerilimi ile çalışmaktadır. Veri hızı 150 M/s'dir. 2,4-2,5 GHz frekans aralığında çalışmaktadır. ESP-WROOM-32 mikrodenetleyicisinin pin isimleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. ESP-WROOM-32 mikrodenetleyicisinin pin isimleri

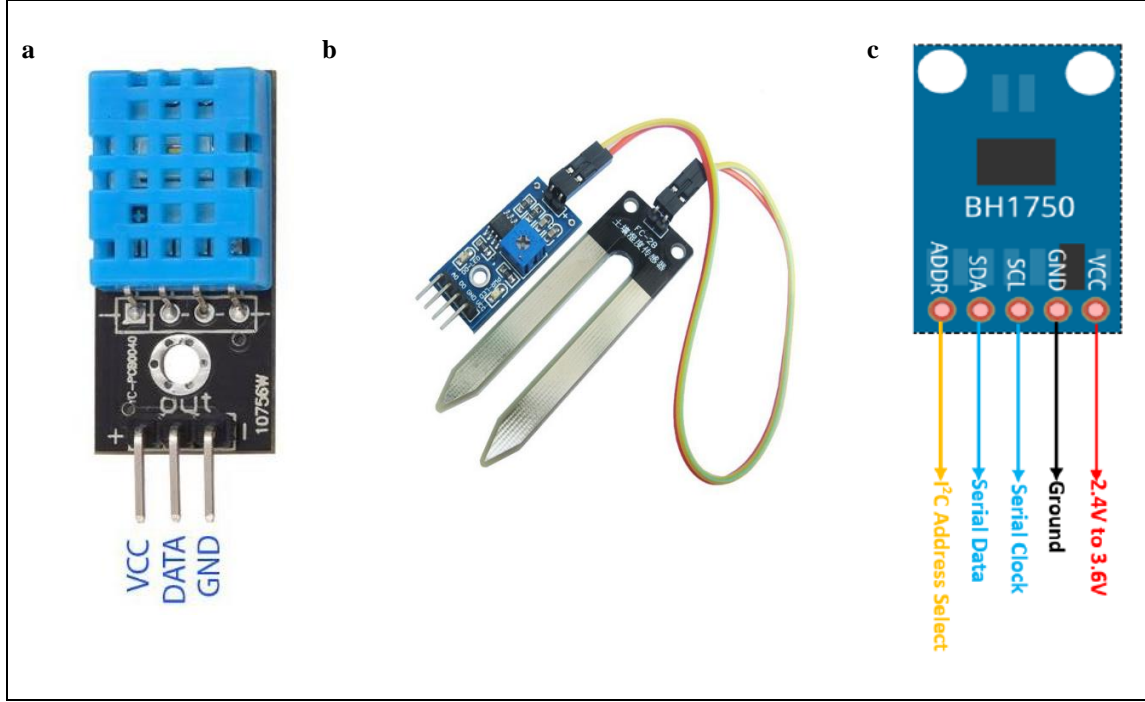
2.2. Sensörler

Sistemde sıcaklık ve nem sensörü olarak DHT11 sensörü kullanılmıştır. DHT11 dijital sinyal çıkışı olan bir sıcaklık ve nem sensörüdür. Ortamda bulunan sıcaklık ve nemin algılanması için kullanılmıştır. Bu sensör dijital sinyal toplama tekniğini ve sıcaklık nem algılama teknolojisini kullanır. Kullanıcılara güvenilir algılama ve uzun süreli kararlılık sağlar. Ek olarak, hem dirençli tipte bir nem ölçüm algılayıcısı hem de NTC sıcaklık ölçüm algılayıcısını bünyesinde barındırır. Sıcaklık ve nem sensörünün yapısı Şekil 2'a da gösterilmiştir.

Bitkilerin yetiştiği toprağın neminin ölçülmesi iki elektrotlu toprak nem YL-69 higrometre sensörü ile yapılmıştır. Bu sensörün elektrotları bitkinin yaşadığı toprağına daldırılır. Toprağın nem seviyesine bağlı olarak oluşan dirençten dolayı bir gerilim farkı oluşur. Oluşan gerilim farkı toprağın nem miktarını belirtir. Nem miktarı arttıkça direnç değeri azalır. İletkenlik artar. Kartın üzerinde yer alan ayarlı direnç ile hassasiyet ayarı yapılabilmektedir. Modül dijital çıkış verebildiği gibi analog çıkışta sunabilmektedir. Ayrıca potansiyometre ile eşik seviyesi değiştirilmesi gerçekleştirilebilmektedir. Toprak nem sensörü pin yapısı Şekil 2b'de verilmiştir.

Bitkilerin bulunduğu ortamın ışık seviyesi GY-30 ışık sensörü ile ölçülmüştür. Bu sensör kartı üzerinde BH1750FVI analog-dijital çeviriciye sahiptir. Bu çevirici 16 bitlik dijital çıkışıdır. I²C seri haberleşme protokolü ile mikrodenetleyicilerle haberleşir. İletişimde

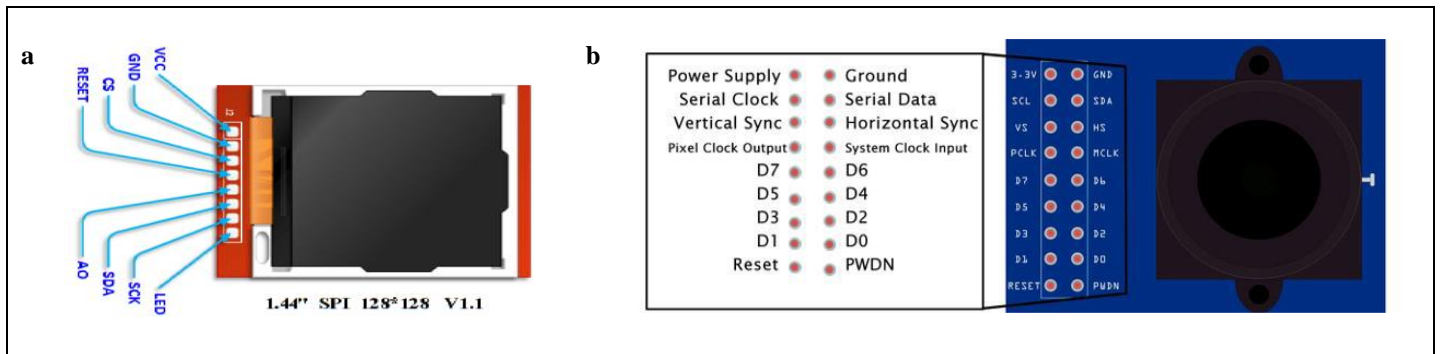
seri saat senkronizasyon pini (SCL-Serial Clock) ve seri veri iletişim pini (SDA-Serial Data) olarak iki pin kanalı kullanılmaktadır. Işık yoğunluğu sensörü Şekil 2c’de verilmiştir.



Şekil 2. Sensörler a) DHT11 sıcaklık ve nem sensörü; b) YL-69 toprak nem sensörü ve c) GY-30 ışık yoğunluğu sensörü.

Sistemde ILI9163C tabanlı ekran sürücüsüne sahip 1,44 inç Arduino TFT LCD ekran modülü anlık verilerin gösterilmesi ve kullanıcıya bilgiler verilmesi için kullanılmış bir ekrandır. Bu ekran 128×128 piksel çözünürlüğe sahiptir. Seri çevresel arayüz (SPI-Serial Peripheral Interface) ile mikrodenetleyici haberleşmesini byte olarak gönderilmesi ile gerçekleştirir. Dolayısı ile master-slave olarak senkron bir haberleşme seçeneğini sunar. Şekil 3a’da Arduino TFT LCD ekran gösterilmiştir.

Bitkilerin görüntülerinin alınması için sistemde OV7670 kamera modülü kullanılmıştır. Bu modül transistör-transistör-lojik (TTL) ara birimine sahip bir Arduino modülüdür. Görüntü alma ve işleme çalışmaları için tasarlanmıştır. UART üzerinden görüntü ve veri okuyabilir. UART haberleşmesinde veri alma için RX pini kullanılırken veri gönderilmesi için TX pini kullanılır. Haberleşme asenkron yapılıdır. Şekil 3b’de OV7670 kamera modülü verilmiştir.



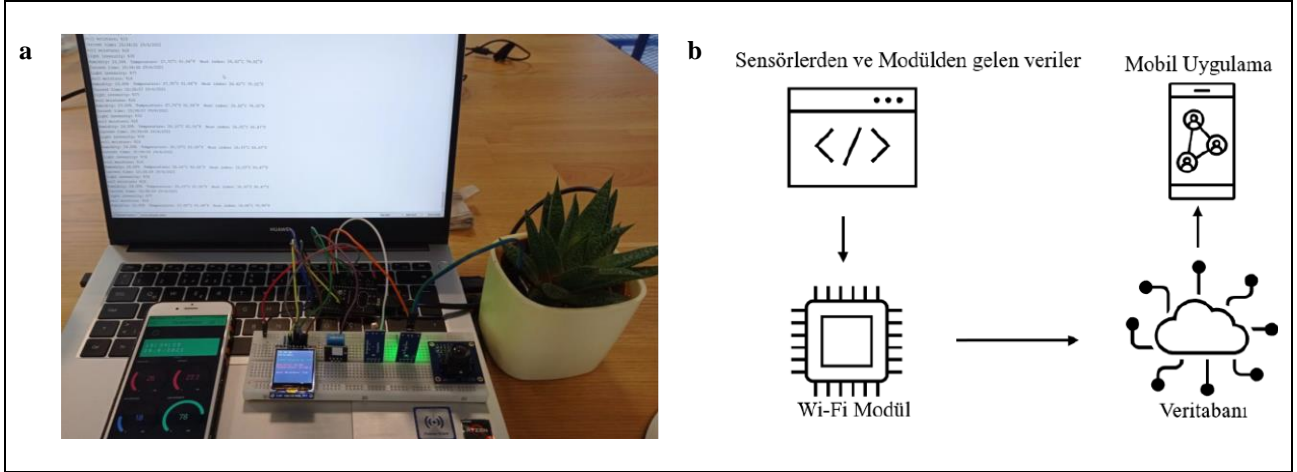
Şekil 3. Sistemin a) Arduino TFT LCD ekranı; b) OV7670 kamera modülü.

Mobil uygulama için Blynk uygulaması kullanılmıştır. Bu Blynk uygulaması IOS ve Android ile çalışan mobil telefonlarda kullanılmaktadır. ESP32, ESP8266 ve Arduino gibi geliştirme kartları ile yapılan IoT tabanlı ürünlerle iletişim kurulmasına yarayan bir yazılım platformudur. Yapılan mikrodenetleyicili sistemin değişkenlerinin görselleştirilmesini, analiz edilmesini, depolanmasını ve kontrol edilmesini imkanlarını sağlar.

3. Metot

Çalışmada, iç ortam bitkilerinin yetiştirildiği birkaç tane saksı üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bunların bulunduğu ortamın verileri algılayıcılar yardımı ile analog olarak ölçülmüştür. Bu analog veriler 10 bitlik analog dijital çeviricisi olan (ADC-Analog Digital Converter) ESP-WROOM-32 mikrodenetleyiciye aktarılmıştır. Anlık olarak veriler Arduino TFT LCD ekranında görülürken sisteme bağlanan Wi-Fi modül sayesinde tüm veriler mobil ortama aktarılmıştır. Blynk uygulaması ile yazılan program mobil ortamda verilerin kaydı ve gösterilmesini sağlamıştır. ESP-WROOM-32 sistemine yerleştirilen OV7670 kamera modülü vasıtasıyla bitkilerin görüntüleri sürekli olarak izlenmiştir. Bitkide meydana gelen önemli değişiklerin olduğu veriler bir belleğe aktarılmıştır. Bu bellekteki veriler daha sonra analiz edilerek bitki için en uygun ortam koşullarının ne olduğu belirlenebilecektir. ESP-WROOM-32 mikrodenetleyicisinin programı Arduino IDE’de C dilinde yazılmıştır.

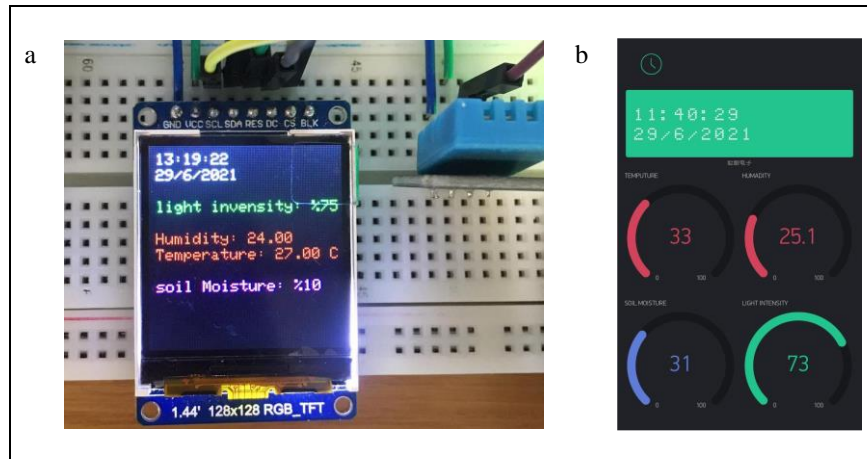
Çalışmanın gerçekleştirilen durumu Şekil 4a’da gösterilmiştir. Uygulanmış çalışmanın veri akış diyagramı Şekil 4b’de verilmiştir. Sistemden alınan verileri Wi-Fi modülü ile veri tabanına aktarılmıştır. Veri tabanındaki veriler mobil uygulamaya aktarılmıştır.



Şekil 4. Sistemin a) Uygulaması; b) Veri akış diyagramı.

Sistemde sensörler ve modüllerin gerekli haberleşme protokolleri ve bağlantıları sağlamıştır. ESP-WROOM-32 mikrodenetleyicisiyle sıcaklık nem sensörü, ışık yoğunluğu sensörü, toprak nem sensörleri analog pinlere bağlanmıştır. Arduino TFT LCD ekran SPL haberleşme protokolünü kullandığı için gerekli SPL pinleriyle bağlantıları sağlanmıştır. Kamera modülü için UART pinleri ve dijital pinler ile bağlantı yapılmıştır. Sensörlerden alınan veriler doğru bir şekilde TFT LCD ekrana yansıtılmış ve telefona aktarılmıştır. Arduino TFT LCD ekran için Arduino IDE’de hazır Adafruit_GFX ve Adafruit_ST7735 kütüphaneleri kullanılmıştır. Arduino TFT LCD ekran görüntüsü Şekil 5a’da gösterilmiştir.

Verilerin IoT ile mobil telefona aktarılması için Blynk uygulamasından faydalanılmıştır. Geliştirilen yazılım görüntüsü Şekil 5b’de verilmiştir. ESP-WROOM-32 mikrodenetleyicisindeki Wi-Fi modülü ile Blynk uygulamasında geliştirilen arayüz ile veriler alınmıştır.



Şekil 5. Sistemde kullanılan a) TFT LCD ekran; b) Blynk uygulaması.

4. Yorumlar

Tasarlanan sistemdeki amaç kullanıcının yetiştirdiği bitkinin durumu anlık olarak kullanıcıya aktarabilmektir. Sistemin yapılan denemeler sonucu istenildiği gibi çalıştığı tespit edilmiştir. Sistemin farklı ortamlarda çalışmaları denenip kontrol edilmiştir. Gün içinde farklı ışık yoğunlukları ile çalıştırılmış ve bir hata ile karşılaşmamıştır. Dikilen bitkinin farklı toprak nemlerinde nem bilgileri alınarak veri edinimi sağlanmıştır. Farklı günlerde ortamın sıcaklık ve nem bilgileri kaydedilmiştir. Bütün sensör değişimleri Arduino TFT LCD ekran ve mobil uygulama da anlık olarak görülmüştür. Yapılan çalışmalarda yetiştirilen bitkinin tasarlandığı şekilde ortam sıcaklığı ve nemi, ışık yoğunluğu, toprak nemi verileri doğru ve senkron bir şekilde ekran modülüne yazdırılmıştır. Bu veriler doğru ve senkron biçim de mobil uygulamaya da aktarılmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmanın yazılımı ilk başta Visual Studio Code üzerinde Platformio eklentisiyle yapılmaya başlanmıştır. Fakat daha sonra kütüphane ekleme durumlarında hatalar alındığı için Arduino IDE yazılımına geçilmiştir. Fakat kamera modülü ve diğer donanımlar kullanıldığında mikrodenetleyicinin çok kısa bir süre içinde fazla ısınma problemi ile karşılaşmıştır. Bu çalışmanın hayata geçirilmesiyle üreticiler için ortamda akıllı mikrodenetleyicili gömülü sistemleri kullanarak organik yetiştiricilik yapabileceklerdir.

5. Sonuçlar

Gerçekleştirilen bu çalışma için ortamda üretilen veya yetiştirilen bitkilerin iklimlendirme takibinin, analizinin yapılmasını, akıllı tarım tekniklerinin teknolojiyle birleştirilmesini sağlayarak daha verimli üretim olanağının kazandırılmasını sağlayan bir IoT uygulaması olmuştur. Projede kullanılan sensörler ile ortamın durumu algılanarak bu veriler yine son nesil teknoloji ürünü olan ESP-WROOM-32 mikrodenetleyiciye aktarılmıştır. Mikrodenetleyici gelen bilgileri daha önceden öğretilmiş olan bilgilere göre analiz etmiş gerekli uyarıları Wi-Fi üzerinden yetiştiriciye bildirmiştir. Blynk arayüz uygulaması ile bitkinin durumu sürekli izlenebilmiştir.

Çalışmada kullanılan kamera sayesinde bitkinin yetiştirme süreçleri kolaylıkla izlenebilmektedir. Yetiştirilen bitkilere özgü algoritmalar yazılarak bitkilerin daha hızlı bir şekilde büyümesi ve ürün vermesi görüntü işleme teknikleri ile yapılabilecek çalışmalar arasında yer almaktadır. Bu geliştirilen algoritmalar akıllı tarım uygulamalarına katkı sağlayacaktır. Sistemde kullanılan ışık sensörü sayesinde geliştirilecek bir yöntem ile bitkinin ışık açısı ayarlanabilir veya ışıklandırma seçenekleri kontrol edilebilir. Bu durum bitkinin daha hızlı büyümesini netice verecektir. Toprak verilerinin değerlendirilmesi ile bitki gelişim sürecine etki eden durumlar çıkartılabilir.

Referanslar

- Alpay, T. (2021). Düşük Maliyetli DTMF tabanlı akıllı sulama sistemi. *Computer Science, 5th International Artificial Intelligence and Data Processing symposium*, 242-249. <https://doi.org/10.53070/bbd.990114>
- Altın, C., Ulutaş, H., Orhan, E., Er, O., & Akdoğan, V. (2021). Internet of things technology based agricultural spraying drone design for remote farming applications. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* <https://doi.org/10.18466/cbayarfbe.781368>
- Ayan, M., & Şenol, R. (2016). Bulanık mantık tabanlı – uzaktan erişimli sera otomasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknolojisi Dergisi* 4, 734–746.
- Baydur, C., Sahin, S., Gökçen, A., & Yeşil, B. (2021). ARM based smart water meter with LoRa for soilless agriculture application. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 352–357 <https://doi.org/10.31590/ejosat.957639>
- Bingöl, O., Özkaya, B., & Bayram, M. (2018). Kablosuz sensör ağ tabanlı uzaktan damlama sulama sistemi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 6, 554–563. <https://doi.org/10.21923/jesd.443576>
- Chiang, M., & Zhang, T. (2016). Fog and IoT: An overview of research opportunities. *IEEE Internet Things Journal* 3, 854–864. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2584538>
- Cui, L., Zhang, Z., Gao, N., Meng, Z., & Li, Z. (2019). Radio frequency identification and sensing techniques and their applications—A review of the state-of-the-art. *Sensors* 19, 4012. <https://doi.org/10.3390/s19184012>
- Dasu, V., & Raghunath, S. (2021). Network technologies and microcontrollers in internet of things (IoT)-A review. *i-Manager's Journal on Communication Engineering and Systems* 10, 1. <https://doi.org/10.26634/jcs.10.1.18160>
- Demircan, B., & Akyüz, E. (2019). IoT and cloud based remote monitoring of wind turbine. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 15, 337–342. <https://doi.org/10.18466/cbayarfbe.540812>
- Duran, F., & Teke, M. (2019). Akıllı yol durum sensörü tasarımı. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi* 396–401. <https://doi.org/10.29137/umagd.510777>

- Durgun, Y. (2021). Nesnelerin interneti teknolojisinin kümes ortamına uygulanması ve etkileri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 28, 463–468. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1005685>
- Ercan, T., & Kutay, M. (2016). Endüstride nesnelerin interneti (IoT) uygulamaları. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* 16, 599–607. <https://doi.org/10.5578/fmbd.43411>
- Erdal, E., & Ergüzen, A. (2020). Internet of things (IoT). *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi* 12, 24–34. <https://doi.org/10.29137/umagd.827676>
- Hu, X., Sun, L., Zhou, Y., & Ruan, J. (2020). Review of operational management in intelligent agriculture based on the internet of things. *Frontiers of Engineering Management* 7, 309–322. <https://doi.org/10.1007/s42524-020-0107-3>
- Işık, M. F. (2017). Tarımsal arazi sulama sistemlerinde mobil uygulamalar: Örnek bir çalışma. *Politeknik Dergisi* 20, 725–731. <https://doi.org/10.2339/politeknik.339409>
- Kanoun, O., Bradai, S., Khriji, S., Bouattour, G., El Houssaini, D., Ben Ammar, M., Naifar, S., Bouhamed, A., Derbel, F., & Viehweger, C. (2021). Energy-aware system design for autonomous wireless sensor nodes: A comprehensive review. *Sensors* 21, 548. <https://doi.org/10.3390/s21020548>
- Khanna, A., & Kaur, S. (2020). Internet of things (IoT), applications and challenges: A comprehensive review. *Wireless Personal Communications* 114, 1687–1762. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07446-4>
- Kılıç, T., & Bayır, E. (2017). An investigation on internet of things technology (IoT) in smart houses. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi* 9, 196–207. <https://doi.org/10.29137/umagd.349107>
- Liao, B., Ali, Y., Nazir, S., He, L., & Khan, H. U. (2020). Security analysis of IoT devices by using mobile computing: a systematic literature review. *IEEE Access* 8, 120331–120350. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3006358>
- Malinowski, A., & Yu, H. (2011). Comparison of embedded system design for industrial applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 7, 244–254. <https://doi.org/10.1109/TII.2011.2124466>
- Mishra, L., & Varma, S. (2021). Middleware technologies for smart wireless sensor networks towards internet of things: A comparative review. *Wireless Personal Communications* 116, 1539–1574. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07748-7>
- Öztürk, E., Çelik, Y., & Kirci, P., (2021). Akıllı tarımda sensör uygulaması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 28, 1279–1282. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1013749>
- Rao, K. S., Sridhar, M. B., & Pavani, L., (2021). IoT based smart fridge application. *International Journal of Engineering Research & Technology* 10, 367–376.
- Ray, P. P. (2016). A survey of IoT cloud platforms. *Future Computing and Informatics Journal* 1, 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.fcij.2017.02.001>
- Salah, W. A., & Zneid, B. A. (2019). Evolution of microcontroller-based remote monitoring system applications. *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 9, 2354. <https://doi.org/10.11591/ijece.v9i4.pp2354-2364>
- Singh, P. P., Khosla, P. K., & Mittal, M. (2019). Energy conservation in IoT-based smart home and its automation. *Energy Conservation for IoT Devices* 155–177. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7399-2_7
- Soy, H., & Dilay, Y. (2021). A conceptual design of LoRa based weather monitoring system for smart farming. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 28, 906–910. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1011947>
- Szum, K. (2021). IoT-based smart cities: A bibliometric analysis and literature review. *Engineering Management in Production and Services* 13, 115–136. <https://doi.org/10.2478/emj-2021-0017>
- Taj, S., Asad, U., Azhar, M., & Kausar, S. (2018). Interoperability in IOT based smart home: A review. *Review of Computer Engineering Studies* 5, 50–55. <https://doi.org/10.18280/rces.050302>
- Terence, S., & Purushothaman, G. (2020). Systematic review of internet of things in smart farming. *Transactions on. Emerging Telecommunications Technologies* 31, e3958. <https://doi.org/10.1002/ett.3958>

- Türk, F., & Lüy, M. (2021). Embedded systems and application areas in engineering. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi* 13, 256–265. <https://doi.org/10.29137/umagd.1053602>
- Üçgün, H., Gömbeci, F., Yüzgeç, U., & Yalçın, N. (2020). IoT tabanlı platform ile gerçek zamanlı iç ortam hava kalitesi izleme sistemi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 7, 370–381. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.730919>
- Yüksel, M. E. (2019). The design and implementation of a batteryless wireless embedded system for IoT applications. *Electrica* 19, 1–11. <https://doi.org/10.26650/electrica.2018.28092>



Kollajen/Jelatin/Bal Esaslı Çift Katmanlı Doku İskelesi Üretimi ve Karakterizasyonu

Fabrication of Double-layered Tissue Scaffolds with Collagen/Gelatin/Honey Blends and Its Characterization

Yaren Erdem¹ , Sahra Ezgi Süngü¹ , Ömer Aktürk^{1*} 

¹Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, 71450 Kırıkkale, Türkiye

Başyuru/Received: 01/03/2022 **Kabul / Accepted:** 30/06/2022 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/07/2022
Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Bu projede, doğal, biyouyumlu ve biyobozunur polimerler olan kollajen/jelatin karışımından liyofilizasyon yoluyla gözenekli bir doku iskelesi üretilmiş, daha sonra bu katman üstüne elektro-eğirme yöntemi ile jelatin/polietilen oksit (PEO)/bal karışımıyla nanofibröz bir tabaka biriktirilmiştir. Doku iskelesi, gluteraldehit buharı ile muamele edilip sonrasında EDC/NHS kimyasallarıyla çapraz bağlanmıştır. Karakterizasyon için; Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, Termogravimetrik analiz (TGA), Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM), gözenek boyut dağılımı testi ve sulu ortamda degradasyon testleri yapılmıştır. Liyofilize katman, 1:1 (w/w) kollajen/jelatin karışımıyla üretilip, üst tabaka ise jelatin/PEO/bal karışımlarının en uygun oranı (2:2:2 w/w, %6 w/v toplam malzeme) seçilerek elektro-eğirme yöntemiyle bu katman üstüne toplanmıştır. İskelenin liyofilize katmanı 5–200 µm arasında geniş bir gözenek boyut dağılımına sahiptir. Çapraz bağlamadan sonra, gözenek boyut dağılımı (30–40 µm civarında yoğunlaşarak) daha homojen hale gelmiştir. SEM analizine göre, düzenli bir fiber boyut dağılımı ($D_{ort} = 423 \pm 85$ nm) elde edilmiş ve çapraz bağlama ve yıkama işlemlerinden sonra az miktarda fiber kaynaşması meydana gelmiştir. TGA ve degradasyon sonuçlarına göre, çapraz bağlama sonrasında iskele sağlamlığı artmıştır. Sonuç olarak, geliştirilen doku iskelesi, sahip olduğu sağlam, gözenekli ve fiberli yapısıyla farklı doku mühendisliği uygulamaları için uygun bir aday olabilir.

Anahtar Kelimeler

“Kollajen, jelatin, bal, elektro-eğirme, doku iskelesi”

Abstract

In this project, a porous tissue scaffold composed of collagen/gelatin, which are natural, biocompatible, and biodegradable polymers, was fabricated by lyophilization, then a nanofibrous gelatin/polyethylene oxide (PEO)/honey blend was accumulated onto this layer via the electro-spinning process. The tissue scaffold was cross-linked by treating with glutaraldehyde vapor followed by EDC/NHS reagents. For the characterization, Fourier Transformed Infrared (FTIR) spectroscopy, Thermogravimetric Analysis (TGA), Scanning Electron Microscopy (SEM), pore size distribution analysis, and aqueous degradation tests were performed. While the lyophilized layer was fabricated by 1:1 (w/w) collagen/gelatin mixture, the top layer was electro-spun onto this layer by selecting the most appropriate blend ratio (2:2:2 w/w, %6 w/v total material). The lyophilized scaffold layer had a wide pore size distribution in the 5–200 µm range. After the cross-linking, pore size distribution became more homogenous (concentrating around 30–40 µm). According to SEM analysis, a uniform fiber size distribution ($D_{ave} = 423 \pm 85$ nm) was obtained and after the cross-linking and rinsing processes a slight fiber fusion occurred. Regarding the TGA and degradation results, the scaffold robustness increased after the cross-linking. Overall, the developed tissue scaffold with its stable, porous and fibrous form could be a suitable candidate for different tissue engineering applications.

Key Words

“Collagen, gelatin, honey, electro-spinning, tissue scaffold”

1. Giriş

Kollajen hayvanlardaki ve insan vücudundaki temel yapısal proteindir ve hücre dışı matrisinin (ECM) biyolojik ve yapısal bütünlüğünü sağlama konularında önemli bir rol oynar ve dokulara fiziksel bir dayanak sağlar. Kollajenin biyomalzeme geliştirilmesinde ve doku mühendisliği uygulamalarında çok tercih edilen doğal bir polimer olması onun sahip olduğu biyoyumluluğu, biyobozunurluğu, gözenekli yapısı, iyi geçirgenliği ve düşük immünojenite özelliklerine bağlanabilir (Dong & Lv, 2016). Doku mühendisliği uygulamalarında arzulanan bütün bu önemli özelliklere sahip olmasına rağmen kollajen saf halinde mekanik olarak zayıftır ve sulu ortamda hızlı degradasyon göstermektedir (Dong & Lv, 2016). Bu sebeple kollajenin çapraz bağlanması için fiziksel ya da kimyasal yöntemler tercih edilebilmektedir. En yaygın olan fiziksel yöntemler, Morötesi (UV) ve gamma ışınımı ve dehidrotermal muameledir (Maslennikova vd., 2015; Takitoh vd., 2015; Wang vd., 2015). Ayrıca, genipin (Liu & Wang, 2013; Nagaoka vd., 2014), glutaraldehit (Yoshioka & Goissis, 2008), N-hidroxy-sulfosuccinimide (NHS) ile birlikte 1-ethyl-3-(3-dimethylaminopropyl)-carbodiimide hydrochloride (EDC) gibi karbodiimidler, (Arafat vd., 2015; Vrana vd., 2007) kollajenin sulu ortam kararlılığını ve mekanik bütünlüğünü arttırmak için yaygın bir şekilde kullanılan biyolojik ya da sentetik çapraz bağlayıcılardan bazılarıdır.

Kollajene alternatif olarak kullanılan jelatinin kökeni de hidrolize kollajene dayanmaktadır ve doku mühendisliği alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır, çünkü biyolojik kökenlidir, ayrıca biyoyumluluk, biyobozunurluk, immünojenik olmama, iyi hücre etkileşimi ve ticari olarak kolay bulunabilirlik, kolay işlenebilirlik, düşük maliyet gibi özellikleri mevcuttur (Campiglio vd., 2019). Ancak, kollajenin kısmi hidrolizi sonucu elde edilen jelatin doğal halinde (çapraz bağlı olmadığında) suda çözünen bir proteindir ve bu sebeple onu biyolojik ortamlarda suda çözünmeyen bir forma getirmek, mekanik özelliklerini geliştirmek ve kararlılığını arttırmak için çapraz bağlamak gereklidir (Campiglio vd., 2019). Jelatini çapraz bağlamak için birçok farklı yöntem bulunmaktadır. Yine kollajende olduğu gibi genipin (Nguyen vd., 2016), glutaraldehit (Gomes vd., 2017) ve karbodiimidler (Skopinska-Wisniewska vd., 2021) gibi kimyasallar yaygındır.

Jelatinden nanofiberlerin elektro-eğrilmesi, doku mühendisliği ve rejeneratif tıp alanlarında çok popülerdir, çünkü dokuların doğal hücre dışı matrisinin (ECM) biyokimyasal ve ultra yapısal özelliklerini taklit ederler (Campiglio vd., 2019). Bu sebeple, birçok çalışma jelatinden ya da jelatinin doğal ya da sentetik polimer karışımlarından, doku mühendisliği için elektro-eğrilmiş iskele geliştirmek üstüne odaklanmıştır (Dias vd., 2017; Gautam vd., 2014; Gomes vd., 2017). Bu çalışmalarda özellikle deri (Dias vd., 2017; Gautam vd., 2014; Gomes vd., 2017), kornea (Rose vd., 2019), kıkırdak (Aliakbarshirazi & Talebian 2017), sinir (Heidari vd. 2019) doku mühendisliği alanlarında başarılı sonuçlar elde edildiği söylenebilir.

Yukarıda bahsedilen bu elektro-eğrilmiş jelatin nanofiberlerin özellikleri içerisine doku mühendisliği açısından önemli bir katkı maddesi olan bal eklenerek daha da geliştirilebilir. Balın geçmişten bu yana gelen önemli yara iyileştirici potansiyeli olduğu farklı kaynaklarda bildirilmektedir (Martinotti vd., 2015; Ranzato & Martinotti, 2016). Bununla birlikte, balın antimikrobiyal etkinliği, immün düzenleyici etkisi, yaralı dokulardaki enflamasyonu başlatıp, baskılıyor olması ve deri hücrelerindeki (fibroblast ve keratinosit) olumlu etkileri (hücre göçü, kollajen organizasyonu, tekrardan epitelleşme vb) mevcuttur (Martinotti & Ranzato, 2018). Bal, bu bahsedilen antienflamatuar, antibakteriyel etkinliği ve yara tedavi edici etkisi gibi özellikleri sayesinde rejeneratif tıp araştırmacılarının ilgisini çekmektedir. Örneğin; Hixon vd. (2017a) içine %5 Manuka balı katılmış ipek fibroin kriyojel ve elektro-eğrilmiş iskeleleri antimikrobiyal etkinlikleri açısından kıyaslamıştır. Yine aynı araştırma grubu başka bir çalışmalarında (Hixon vd., 2017b) kronik kemik enfeksiyonları tedavisi için Manuka balı katılmış ipek fibroin kriyojeller ile çalışma yapmışlardır. Başka bir çalışmada, Manuka balı içeren poli(e-kaprolakton) (PCL) nanofiber iskeleler, fibroblastların iskele içine girişini arttırırken, gram negatif *E. coli* bakterisinin büyümesini baskılamıştır (Minden-Birkenmaier vd., 2015). Maleki vd. (2013), elektro-eğirme yoluyla polivinil alkol (PVA) ve İran-Tebriz balı kullanarak nanolifli ağ üretmiş ve antienflamatuar ilaç uygulaması denemiştir. Bunlarla birlikte balın, kitosan (El-Kased vd., 2017), jelatin (Wang vd., 2012) ve aljinat (Nazeri vd., 2015) gibi çeşitli biyopolimerler ile harmanlandığı çalışmalar da mevcuttur.

Torras vd. (2018), üç boyutlu hücre kültür modelleriyle epitel dokuların taklit edilmesi konusunu derinlemesine irdelemiştir. Buna göre; epitel katmanlar için işlevsel *in vitro* modeller, temel araştırma, hastalık modellemesi, ilaç keşfi ve doku replasmanı için anahtar öğedirler. Dokuların *in vivo* ortamda kompleks mimari yapısını taklit edebilen *in vitro* modeller için artan bir talep mevcuttur. Geleneksel önklinik modeller genel olarak iki boyutludur ya da hayvan modellerine dayanmaktadır. Bu modeller, erken biyolojik yanıtlar konusunda faydalı bilgiler sağlayabilirler ve yüksek verimli ilaç taraması için uygundur, ayrıca hayvan modellerinde canlıdaki dokuların etkileşimi ve karmaşık fizyolojisi de taklit edilmektedir. Ancak iki boyutlu modellerin düşük tahmin kapasitesi ve hayvan modellerindeki türe özgü farklılıklar ve etik kaygılar gibi sorunlar yüzünden kısıtlamalar mevcuttur. Bu sebeple 3 boyutlu *in vitro* modeller geliştirilmiştir ve bu modeller hücre biyolojisindeki, mikromühendislik, biyomalzeme ve biyofabrikasyon konularındaki gelişmelere dayanmaktadır. Tekrardan inşa edilmiş insan epitelyumu 3 boyutlu doku modelleri (kornea epiteli ya da deri epidermisi için) bu alanda en çok çalışılan konulardandır, çünkü hayvanlarda yapılan iritasyon testlerinin yerini başarılı bir şekilde alabilmektedirler (Lee vd., 2017).

Literatürde yapılan benzer çalışmalarda, balın nanofiberli iskeleler içine başarılı bir şekilde eklenip farklı doku mühendisliği uygulamaları için deneyler yapılmış olsa da bu çalışmada geliştirilen iki katmanlı doku iskelesi benzersizdir. İki katmanlı doku iskelesinin yapısı, deri ve kornea gibi bazı dokuların orijinal yapısını taklit etmektedir, yani gözenekli alt katman (deri dermisi ya da kornea stroması) ve daha sıkı fiberli üst katmandan (deri epidermisi ya da kornea epitelyumu) oluşmaktadır. Deri (epidermis) ve kornea gibi dokularda epitelyum, hücrelerin büyümesi için gözenekli ve katman katman farklılaşmış hücrelerden oluşan bir yapıdadır. Bu çalışmanın hipotezi de geliştirilecek iki katmanlı yapı ile epitel hücreler için bir taşıyıcı görevi görececek olan bir doku

iskelesi geliştirilmesidir. Üst katman (nanofiberli yapı), hücrelerin iskeleye ilk tutulumu ve hızlı proliferasyonu için uygun ağısı yapıda, alt katman (köpüksü yapı) hücre göçü ve farklılaşması için uygun gözenekli yapıda tasarlanmıştır. Doku iskelesini karakterize etmek için bu çalışma kapsamında bazı fiziksel ve kimyasal testler yapılmıştır: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, Termogravimetrik analiz (TGA), Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM), gözenek boyut dağılımı testi ve sulu ortamda hidrolitik ve enzimatik degradasyon testleri. Bu ön deneylerle elde edilen ilk sonuçlar, gelecekte yapılması planlanan hücre kültürü çalışmaları ve farklı doku iskelesi uygulamaları için (deri ve kornea gibi) önemlidir.

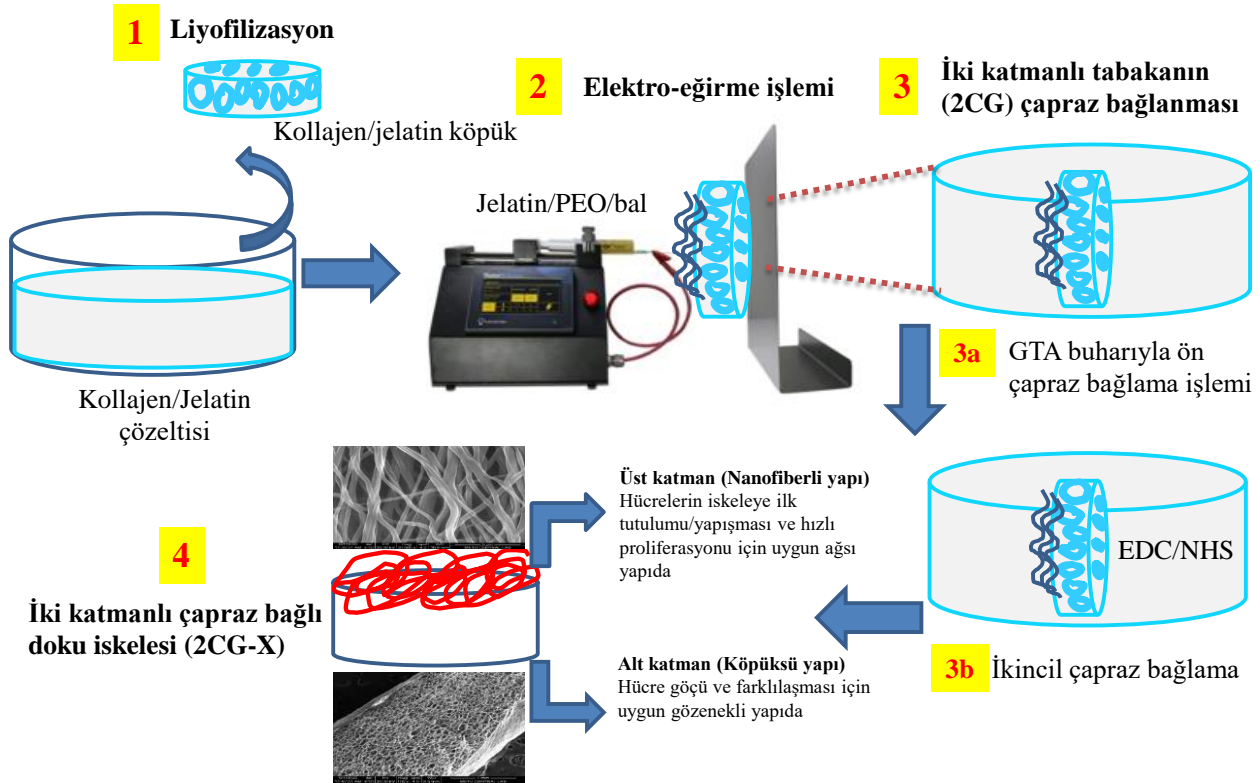
2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Kollajen (Tip I, öküz aşıl tendonundan elde edilmiş), jelatin (Tip A, domuzdan elde edilmiş), polietilen oksit (PEO, ortalama Mw ~4,000,000) glutaraldehit (Derece I, %25 H₂O içinde), EDC (*N*-(3-Dimethylaminopropyl)-*N'*-ethylcarbodiimidehydrochloride), NHS (*N*-Hydroxysuccinimide), etanol [Absolute, ≥ 99.8% (GC)], asetik asit, fosfat tamponlu salin (PBS) tabletler, Sigma-Aldrich (Almanya) firmasından alınmıştır. Lokal bir marketten bal (Balpamak süzme çiçek balı) alınmıştır. Bütün diğer kimyasallar (hepsi analitik derecede) ve sarf malzemeler, aksi belirtilmediği müddetçe, ISOLAB (Germany) firmasından alınmıştır.

2.2. Doku iskelesinin üretimi

Bu çalışmada; iskele ana malzemesi (alt katman) olarak kollajen/jelatin, üst katmanda ise jelatin, PEO ve bal kullanılmıştır. Doku iskelesinin alt katmanı olan jelatin/kollajen köpüğü üretmek için öncelikle %3'lük asetik asit çözeltisi içinde jelatin (%1 w/v) ve kollajen (%1 w/v) çözeltileri hazırlanmıştır. Ardından bu çözeltilerden eşit hacimde (5 mL) alınarak karıştırılmış, cam petri kalıplara dökülerek - 80 °C buzdolabında 1 gün boyunca dondurulmuştur. Daha sonra liyofilizatörde dondurup-kurutma işlemiyle (yaklaşık - 40 °C çember sıcaklığı, 0,07 mbar vakum basınçta) tamamen kuruyana kadar köpüksü yapı üretilmiştir. Nanofiberli yapının, yani doku iskelesinin üst katmanının, üretilmesi için elektro-eğirme yöntemi kullanılmıştır. Elektro-eğirme cihazı ile nanofibröz matris üretiminde optimum koşullar belirlenmiş ve bu koşullara göre elektro-eğirme işlemi yapılmıştır. Optimize edilen alet çalışma parametreleri; şırınga pompası akış hızı 0,6 mL/h, voltaj 8 kV, şırınga metal ucu toplayıcı arası mesafe 23,5 cm aralıklarında ayarlanmıştır. Belirlenen bu koşullarla sağlam ve nanofiberli yapıda iskeleler üretilmiştir. Bu nanofiberli iskeleler, toplayıcı olarak seçilen hareketli (1200 rpm) alüminyum disk üstüne sabitlenmiş liyofilize jelatin/kollajen köpükler üstünde 1 saat boyunca toplanmıştır. Üretilen iskelelerin sulu ortam dayanıklılıklarını artırmak için ilk olarak 45 dakika boyunca geniş bir kap içerisinde %3 (w/v) glutaraldehit (GTA) buharı ile ve daha sonra 2 saat boyunca EDC/NHS kimyasallarıyla (2 mg/mL: 1 mg/mL, % 100 etanol içinde çözünmüş) çapraz bağlama işlemi yapılmıştır. Sonrasında, reaksiyona girmemiş GTA kalıntılarını temizlemek için 0,2 M glisin çözeltisi ile 1 saat boyunca muamele edilmiş ve son olarak da büyük bir behere saf su alınarak iyice yıkanmıştır. Bu işlemler bittikten sonra bütün iskeleler, liyofilizatörde dondurup-kurutma işlemine (yaklaşık - 40 °C çember sıcaklığı, 0,07 mbar vakum basınçta) tabi tutulmuş ve + 4 °C'de buzdolabındaki desikatör içinde bir sonraki testlere kadar saklanmıştır. Bütün yapılan test basamakları aşağıdaki gibi şematize edilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. İki katmanlı doku iskelesinin üretilme basamakları.

2.3. Doku iskelesinin karakterizasyonu

2.3.1. Fourier dönüşümlü kızıl ötesi (FTIR) spektroskopisi

Test gruplarının kimyasal yapısı; ATR Fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektrometresi ile (ATR FT-IR) (IFS/66S, Hyperion 1000) Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı'nda (ODTÜ Merlab) analiz edilmiştir. Her bir spektrum ZnSe ATR kristal hücresi üstünde transmittans modu içinde 4 cm^{-1} netliği ve $4000\text{--}400 \text{ cm}^{-1}$ spektral aralıkta 256 taramanın toplamıyla elde edilmiştir.

2.3.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

Test gruplarının morfolojisi, taramalı elektron mikroskobu ile ODTÜ Merlab'da incelenmiştir. Analizden önce numuneler altın-paladyum ile kaplanmış ve iskelelerin tepeden ve yandan kesit mikrografi görüntüleri alınarak yüzey yapısı incelenmiştir.

2.3.3. Gözenek boyut dağılımı analizi

İskelelerin gözenek boyut dağılımı, cıvalı porozimetre ile (Poremaster 60, Quantachrome Corporation, USA) düşük basınç analizi yapılarak (0–50 psi) ODTÜ Merlab'da gerçekleştirilmiştir. Kısaca, iskele gözenekleri basınç 0'dan (büyük gözenekler) 50 psi (nispeten küçük gözenekler) değerine arttırılarak cıva ile doldurulmuştur. Gözenek hacmine (gözenekler içine giren cıva hacmi/iskele ağırlığı) karşı ilgili gözenek boyutunu gösteren data porozimetre ile elde edilmiştir.

2.3.4. Sulu ortamda hidrolitik ve enzimatik degradasyon testleri

Test gruplarının enzimli ya da enzimsiz sulu ortamlardaki degradasyonu (bozunum) incelenmiştir (Akturk & Keskin, 2016). Hidrolitik degradasyon (HD) için, kesilen numuneler ($1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$) PBS (pH: 7,2, 0,01M, 5 mL) içine konmuş ve $37 \text{ }^\circ\text{C}$ ' de 1 hafta inkübe edilmiştir. Enzimatik degradasyonu (ED) incelemek için ise, iskeleler $60 \text{ }\mu\text{L}$ (1 mg/mL , d-H₂O) tip I kollajenaz çözeltisi eklenmiş aynı inkübasyon ortamına (pH: 7,2, 0,01M, 5 mL) konulmuştur. Belirli inkübasyon periyotlarında (hidrolitik degradasyon için 1, 4 ve 7 gün; enzimatik degradasyon için ise 2, 4 ve 6 saat) iskeleler inkübasyon ortamından alınarak gravimetrik analiz ile kuru ağırlıkları ölçülmüş ve % degradasyon sonuçları aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır:

$$\% \text{Degradasyon} = \frac{W_d - W_t}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

W_d test örneklerinin başlangıçtaki kuru ağırlığını, W_t ise her bir inkübasyon zamanı sonundaki kuru ağırlıkları temsil etmektedir.

2.3.5. Termogravimetrik analiz (TGA)

Test gruplarının TGA analizi ODTÜ Merlab'da yapılmıştır. İskeleler azot içeren atmosferde $22\text{--}700 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında dakikada $30 \text{ }^\circ\text{C}$ tarama hızıyla analiz edilerek termogramları çıkarılmıştır.

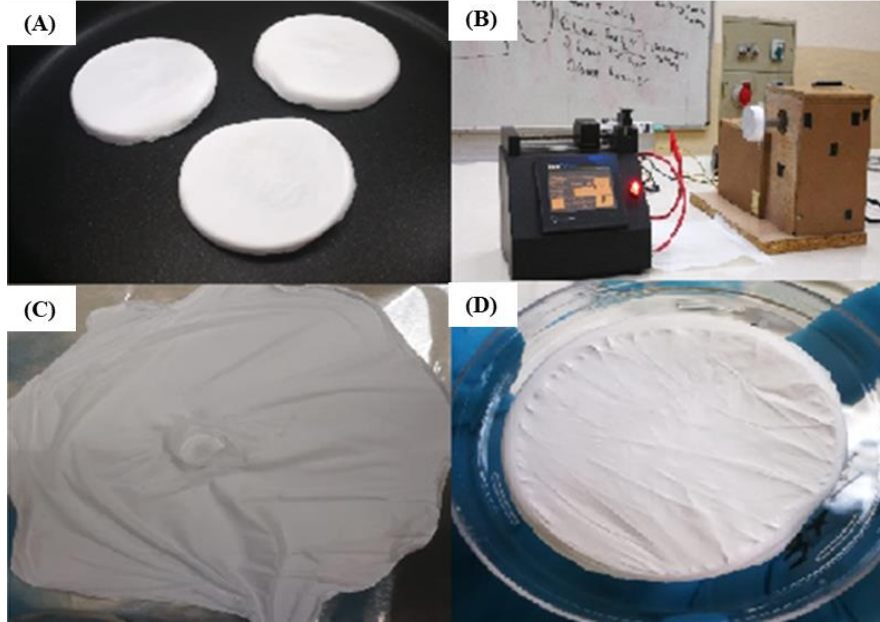
2.4. İstatistik analizi

Elde edilen bulgular, Excel paket program kullanılarak değerlendirilmiştir. Excel programındaki Veri Çözümleme Aracı kullanılarak ikili gruplar arasındaki istatistiksel kıyaslama eşit varyanslar varsayarak t-Test ile yapılmıştır. Gruplar arasındaki farklar $p < 0,05$ değeri için anlamlı kabul edilmiştir. Data; ortalama \pm standart sapma şeklinde ifade edilmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Doku iskelesinin üretilmesi

Doku iskelesinin liyofilize köpük katmanını üretmek için eşit derişimde (1%) kollajen ve jelatin karışımları kullanılarak dondurup-kurutma işlemi sonunda sağlam ve homojen yapılar elde edilebilmiştir (Şekil 2A). Daha sonra bu köpük katman, elektro-egirme aletinin dönen alüminyum diski üstüne sabitlenerek üzerine nanolifli bir membran biriktirilmiştir. (Şekil 2B). Nanofiberli katman üretmek için jelatin/PEO/bal malzemelerinin farklı karışım oranları kullanılmış ve en başarılı olan iki ağırlık oranı, ilk olarak sadece metalik toplayıcı ekranda denenerek, 1:2:2 ve 2:2:2 (w/w) olarak bulunmuştur (Şekil 2C). En son olarak, jelatin/PEO/bal için 2:2:2 (w/w) oranı, kollajen/jelatin (1:1 w/w) köpük katmanı üstüne başarılı bir şekilde toplanabilmiştir (Şekil 2D). Bu iki katmanlı tabakanın birbirine sıkıca bağlandığı, Şekil 2A ve 2D'den net bir şekilde anlaşılmaktadır.

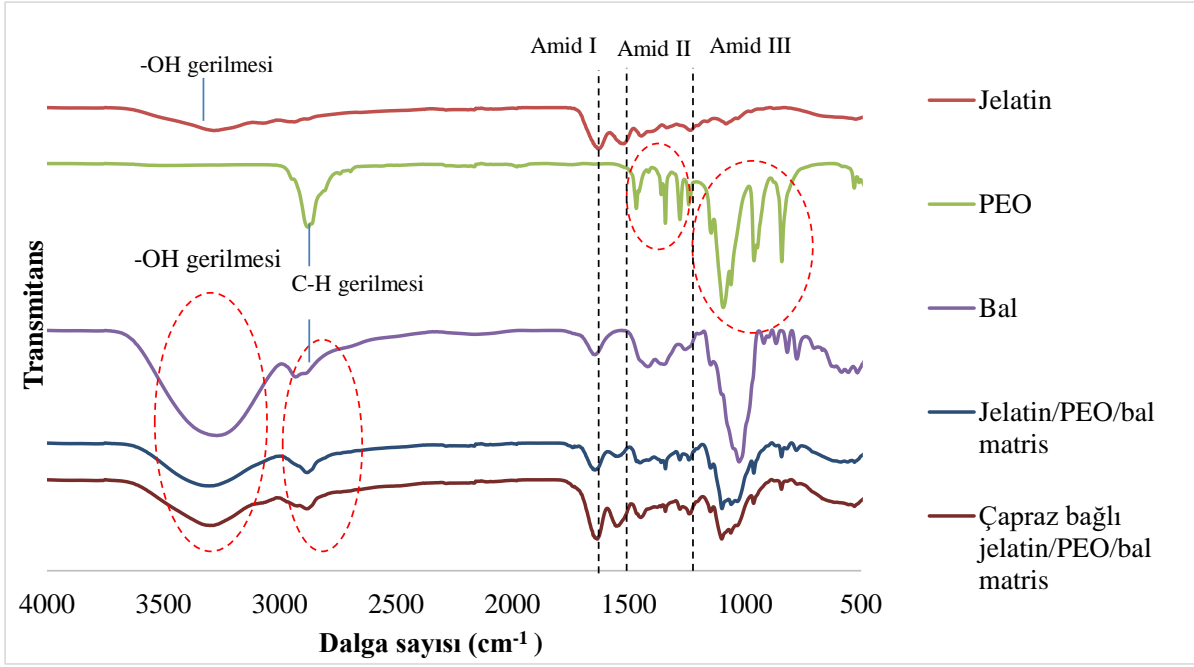


Şekil 2. (A) Kollajen/jelatin (1:1 w/w, %1 w/v toplam polimer) çözeltisiyle liyofilizatörde üretilmiş köpüksü yapı, (B) elektro-eğirme cihazı, (C) jelatin-PEO-bal (2:2:2 w/w, %6 w/v toplam malzeme) çözeltisi ile elde edilen nanofiber yapı örneği, (D) elde edilen iki katmanlı yapı (2CG) (köpüksü yapı üzerine nanofiber yapı sentezlenmiş numuneler).

3.2. Doku iskelesinin karakterizasyonu

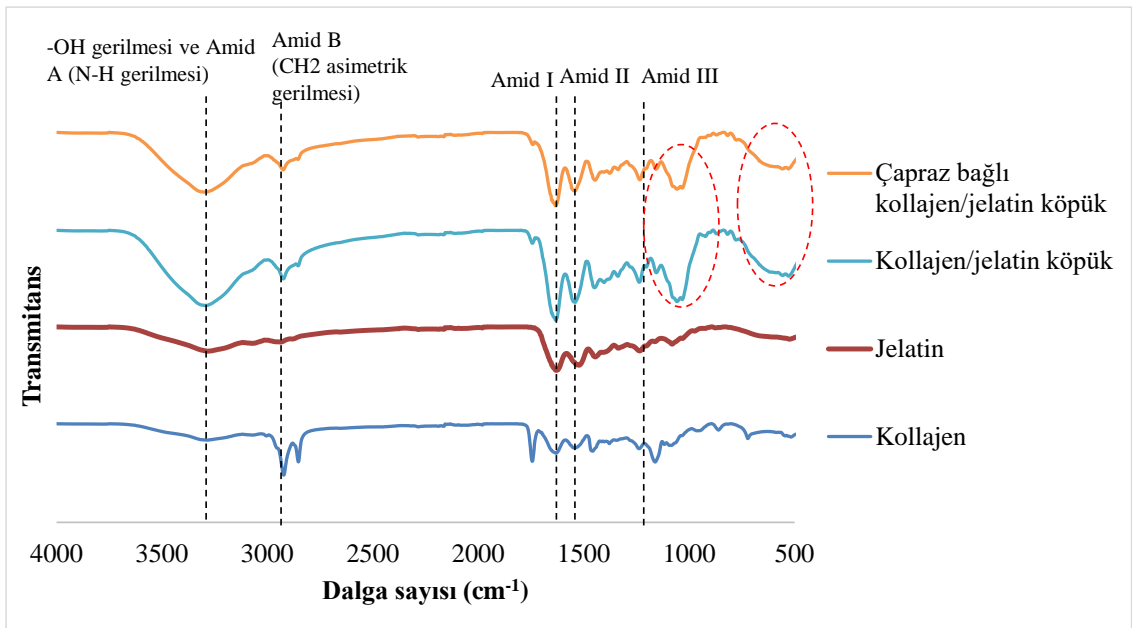
3.2.1. Fourier dönüşümlü kızıl ötesi (FTIR) spektroskopisi

Şekil 3'te gösterildiği gibi çapraz bağlı olan ve olmayan nanofiber grupları ve grupları oluşturan tüm bileşenlere ait karakteristik pikler FTIR spektrumlarında gözlemlenmiştir. Jelatin/PEO/bal nanofiber gruplarında (çapraz bağlı olan ve olmayan), 840 cm^{-1} 'de görülen küçük pikler, karbonhidratlara ait C–O ve C–C gerilme titreşimlerini (Nguyen vd., 2019; Pataca vd., 2007), 780 cm^{-1} 'de görülen küçük pikler ise baldaki sakkarit konfigürasyonları için C–H bükülme titreşimlerini (Gok vd., 2015; Nguyen vd., 2019) işaret eder. Çapraz bağlama işleminden sonra bu piklerin şiddetinde hafif bir düşüş görülmesi, balın işlemler sırasında bir miktar sulu ortama özütlendiğini gösterir. 550 cm^{-1} civarında görülen geniş pik yine baldaki şeker moleküllerine bağlı C–H bükülme titreşimlerini göstermektedir (Sarkar vd., 2018) ve nanofiber gruplarında da bu bant görülmektedir. Baldaki şekerlere (ya da su ve organik asitlere) bağlı OH grupları sayesinde nanofiberli grupların her ikisinde de 3300 cm^{-1} 'deki (–OH gerilmesi) geniş ve derin pik belirgindir (Kozłowicz vd., 2020). 1150 cm^{-1} – 950 cm^{-1} arasında görülen pikler karbonhidratlardaki C–H gerilme titreşimini, C–O–C grubu içindeki C–O gerilme titreşimini, C–OH grubu içindeki C–O gerilme titreşimini ve karbonhidrat yapısındaki C–C gerilme titreşimini gösterir (Kozłowicz vd., 2020). Balın nanofiberler içine katılmasıyla hidroksil gruplarına ait absorpsiyon piklerinde artış diğer çalışmalarda da gözlemlenmiştir (Sarkar vd., 2018). Balda görülen 2931 cm^{-1} 'deki pikler (C–H gerilmesi) şeker omurgasında bulunan $-\text{CH}_2$ ve $-\text{CH}_3$ fonksiyonel gruplarına aittir (Kozłowicz vd. 2020) ve yine her iki nanofiber grubunda belirgindir. Jelatindeki amid bant bölgeleri literatüre bakarak çıkarılmıştır (Dias vd., 2017). Balda (1645 cm^{-1}) ve jelatinde (1627 cm^{-1}) üst üste binmiş halde bulunan –OH deformasyon titreşimi ve amid I bandına ait pik (C = O gerilme ve C–N gerilme titreşimi) şiddeti ve yeri çapraz bağlı olan jelatin/PEO/bal nanofiber grubunda (1634 cm^{-1}) değişmiştir. Çapraz bağlı olmayan jelatin/PEO/bal nanofiber grubunda ise balınkiyle aynıdır. Sadece jelatinde görülen amid II için 1526 cm^{-1} 'deki pikler (C–N gerilme ve N–H bükülme) nanofiber gruplarında belirgin bir şekilde sola kaymış (1550 cm^{-1} civarı) ve çapraz bağlı grupta şiddeti iyice artmıştır. Yine jelatine özgü amid III için 1234 cm^{-1} (N–H bükülme ve C–N gerilme titreşimi) bantlarında görülen pikler fiber gruplarında yaklaşık aynı konumda (1240 cm^{-1}) bulunmuştur. Özellikle jelatinde doğal olarak görülen peptid bağlarıyla alakalı amid bantlarındaki değişimler (çapraz bağlama işleminden sonra bazı piklerde görülen şiddet ve konum değişiklikleri) buradaki kimyasal fonksiyonel grupların çapraz bağlamada görev aldığına işaret eder. Balda bulunan 1419 cm^{-1} (C–OH grubundaki O–H deformasyonu ve alkenlerdeki C–H deformasyonu) piki fiberlerde yok olmuşken ve 1348 cm^{-1} (C–OH grubundaki –OH deformasyonu) görülen pik (Kozłowicz vd., 2020), PEO'dan kaynaklı 1342 cm^{-1} ($-\text{CH}_2$ asimetrik bükülme) piki (Abdelrazek vd., 2018) ile üst üste binmiştir. Şekil üstünde de kesikli çizgi şeklinde daire içine alınan PEO'ya ait pikler fiberli grupta gözlemlenmiştir, yani PEO, işlemler sonunda yapıda hala bulunmaktadır. PEO için bant atamaları literatür bilgisine dayandırılmıştır (Abdelrazek vd., 2018). 2878 cm^{-1} 'deki keskin bant metilen grubunun asimetrik C–H gerilimine aittir. Diğer bantlar: 1467 cm^{-1} ($-\text{CH}_2$ makaslama) ve 1342 cm^{-1} ($-\text{CH}_2$ asimetrik bükülme), 1241 cm^{-1} 'deki nispeten küçük bant (CH_2 simetrik burulma), 1145 cm^{-1} 'de bulunan absorpsiyon bandı (C–O–C gerilme), 961 cm^{-1} (C–O gerilme hareketi ile CH_2 rocking) ve 841 cm^{-1} 'de (CH_2 rocking hareketi) görülen bantlar olarak sıralanabilir.



Şekil 3. Nanofiberli iskele üst katmanı ve bunun bileşenlerinin FTIR spektrumları.

Şekil 4'te gösterildiği gibi kollajen ve jelatine ait karakteristik amid pikleri köpüklerin FTIR spektrumlarında görülmüştür. Kollajene tip I'e ait karakteristik absorbsans bantları: 3286 cm^{-1} 'de (N-H grubu gerilme titreşimi), 1631 cm^{-1} 'de (amid I bandıyla alakalı N-H bükülme titreşimi ile çiftlenmiş C = O gerilme titreşimi), 1540 cm^{-1} (amid II bandıyla alakalı C-N gerilme titreşimine çiftlenmiş N-H bükülme titreşimi) ve 1238 cm^{-1} (amid III bandıyla alakalı N-H deformasyon ve C-N gerilim titreşimi kombinasyon pikleri) olarak sıralanmıştır (Gautam vd., 2014). GTA buharıyla çapraz bağlama işlemi sadece nanofiberli kısmın alt köpük katmana daha homojen şekilde bağlanmasını sağlamıştır ve bu çapraz bağlama etkisi Şekil 3'te gösterilmiştir. EDC/NHS çapraz bağlama işlemi ise ana çapraz bağlama yöntemidir. Bu ikinci çapraz bağlama işleminden sonra, köpük katmanların (çapraz bağlı olan ve olmayan) spektrum sonuçlarında dikkate değer bir değişim olmamıştır, çünkü EDC/NHS sıfır uzunlukta bir çapraz-bağlayıcıdır. Benzer sonuçlar Skopinska-Wisniewska vd. (2021) ve Hoon Lee vd. (2019) çalışmalarında da görülmüştür. Köpük gruplarında 1000 ve 500 cm^{-1} civarlarındaki bantlar (Şekil 4'te kırmızı kesikli daireler içine alınmıştır), yukarıda detaylı bir şekilde anlatıldığı gibi köpük içine nüfuz etmiş baldan kaynaklıdır. FTIR için hazırlanan köpük numuneler iki katmanlı yapılardan alındığı için spektrumda bunlar da görülmüştür.

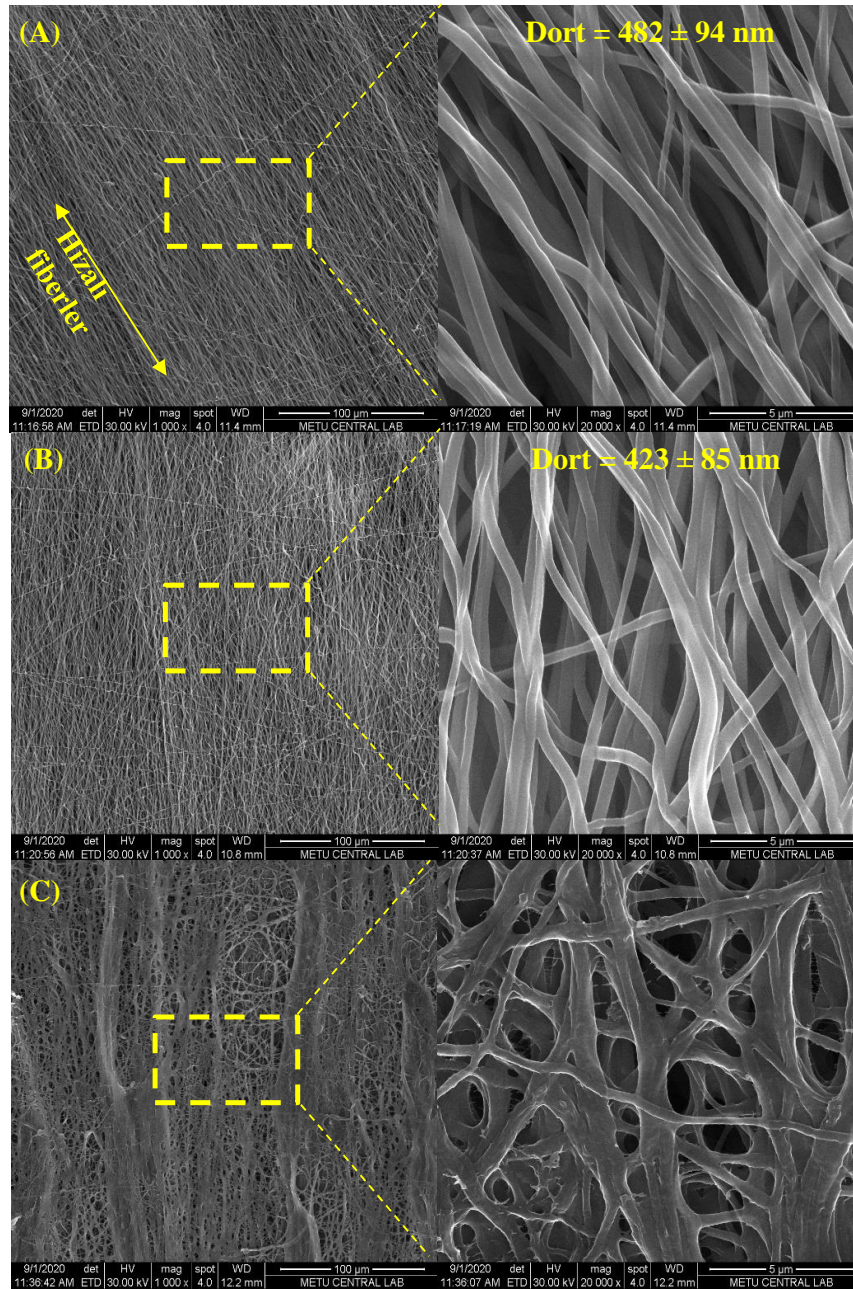


Şekil 4. Köpük yapıda iskele alt katmanı ve bunun bileşenlerinin FTIR spektrumları.

3.2.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

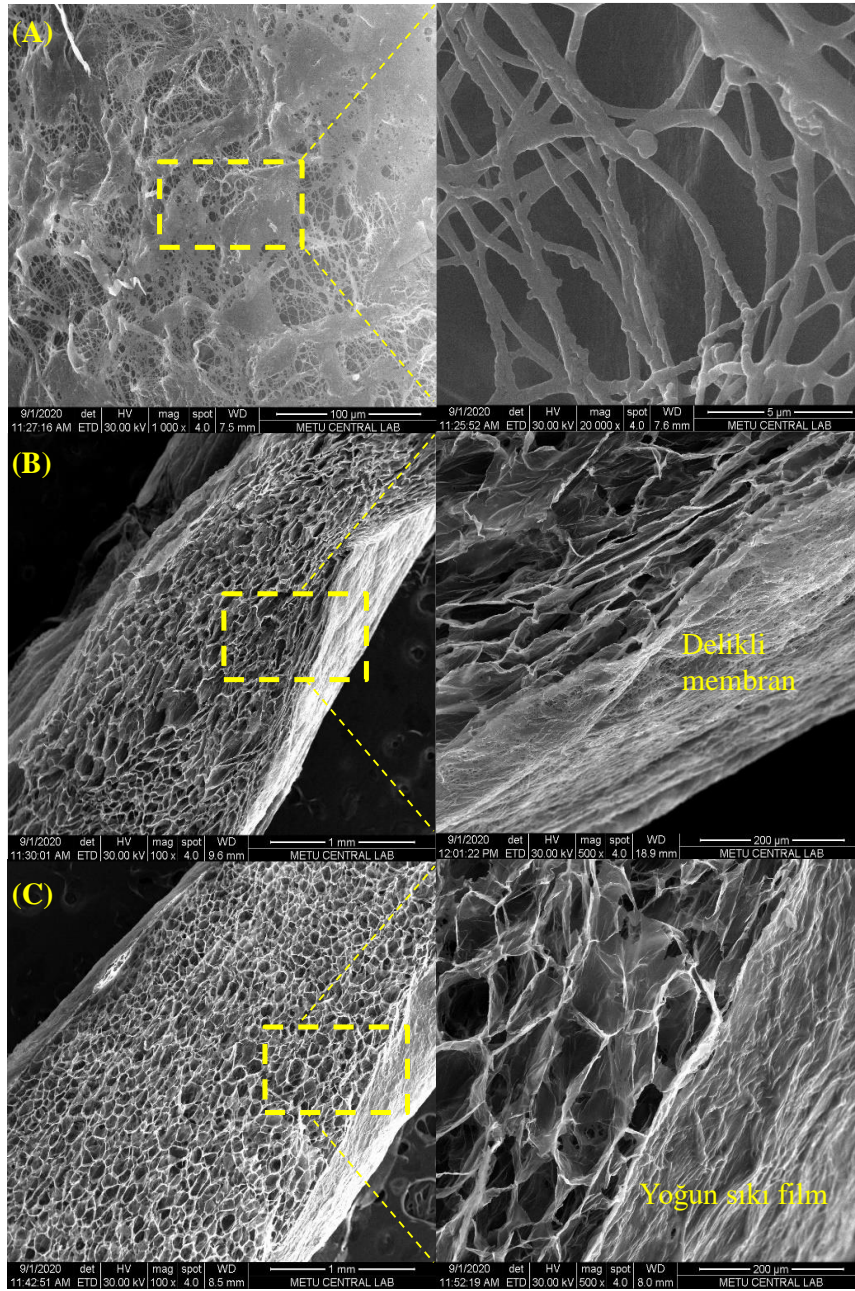
SEM görüntülerine göre (Şekil 5A, 5B), iki farklı deney grubunda da nanofiber morfolojisi yoğun, düzleşmiş (şerit benzeri), düzgün boyut dağılımlı ve damla (boncuk) içermeyen yapıdadır. Farklı jelatin miktarlarıyla hazırlanan bu gruplarda $400\text{--}500\text{ nm}$

fiber çap aralığında nanofiberli yapılar elde edilmiştir. Nanofiberlerin düzleşmiş yapısı elektro-eğirme çözeltilerinin yüksek polimer konsantrasyonu sebebiyle viskoz olmasına ve balın higroskopik (nem tutan) özelliğine bağlanabilir. Elektro-eğirme çözeltilerinin viskozitesi arttığında ve bal kullanılan benzer diğer çalışmalarda fiberin toplayıcı üstünde nemli bir şekilde birikmesi sebebiyle benzer morfolojiler gözlenmiştir (Sarkar vd., 2018; Topuz & Uyar, 2017). Zaten toplayıcı diskin dönme etkisiyle de bu morfoloji daha belirgin hale gelmiş olabilir. Toplayıcı ekranın bu dönme etkisiyle belli bir yönde hizalı fiberler de oluşmuştur (Şekil 5A). Çapraz bağlama işlemi sonunda fiber yapısı korunmuş, bazı bölgelerdeki fiberler de birbirine GTA etkisiyle kaynaşmıştır (Şekil 5C). Ancak, çapraz bağlama işleminden sonraki suda yıkama sırasında bazı fiberlerde kopmalar ve suda çözümler de meydana gelmiştir. Literatürde balla yapılan elektro-eğirme çalışmalarında bu çalışmadakine benzer fiber çapı aralıkları elde edilmiştir. Örneğin; PVA/jelatin/çam balı kullanılarak elde edilen nanofiberli matlarda ortalama fiber çapı, kullanılan balın derişimi artıkça büyümüşür (321–494 nm) ve elde edilen düzgün ve boncuk içermeyen fiberlerin doku mühendisliği uygulamaları için uygunlukları vurgulanmıştır (Parin vd., 2021). Benzer şekilde Sarhan vd. (2016), ürettiği PVA/kitozan/bal nanofiberleri için ortalama fiber çapını 284–464 nm aralığında bulmuş ve bal derişimiyle doğru orantılı bir şekilde arttığını göstermiştir. Tang vd. (2019) çalışmasında yine aynı paralellikte sonuçlar bulunmuştur. Çalışmalarında, bal içeren aljinat/PVA nanofibröz membranların yüksek bal içeriğiyle ortalama fiber çapları artmış (379–528 nm) ve geniş fiber çap dağılımlı, nispeten düzensiz morfolojide fiberler elde edilmiştir.



Şekil 5. Farklı fiberli matrislerin SEM mikrografileri ve fotoğrafları: (A) jelatin/PEO/bal (1:2:2 w/w, %5 w/v toplam malzeme), (B) jelatin/PEO/bal (2:2:2 w/w, %6 w/v toplam malzeme), (C) çapraz bağlı jelatin/PEO/bal (2:2:2 w/w, %6 w/v toplam malzeme, GTA ve EDC/NHS karışımıyla çapraz bağlanmış).

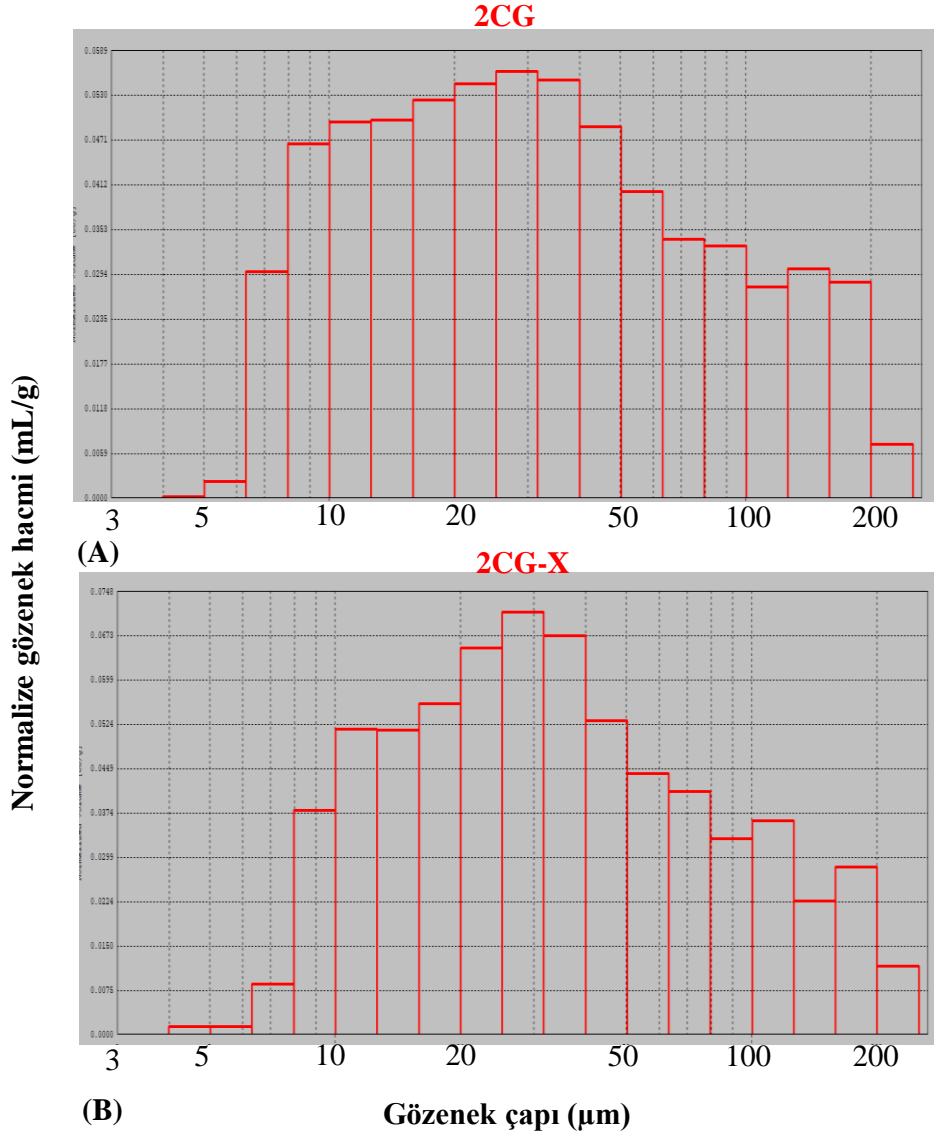
Şekil 6'da gösterildiği gibi iki katmanlı çapraz bağlı kollajen/jelatin köpüklerin (2CG-X kodlu grup) farklı yönlerden çekilen SEM görüntülerine göre fiberli yapıların Şekil 6A'da kısmen korunduğu görülmektedir. Bazı bölgelerde alt kısmın konturlarıyla iyice kaynaşmış ve bazı yerlerde delikli, bazı yerlerde de yoğun membran (film) benzeri katmanlar oluşturmuşlardır. Kesitten alınan görüntülerde köpüksü yapılarıdaki gözeneklerin homojen yapıda ve birbirleriyle bağlantılı olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 6B ve 6C kesit görüntüleri numunelerin köşesinden (köpük ve fiberlerin birbirine iyice kaynaştığı yerler) alındığı için sıkı film katmanlar arasında köpük şeklinde sandviç yapılar görülmektedir.



Şekil 6. İki katmanlı çapraz bağlı kollajen/jelatin köpüklerin (2CG-X kodlu grup) farklı yönlerden çekilen SEM görüntüleri: (A) Tepeden fiberli kaplamanın olduğu bölge, (B) ve (C) numunelerin kesiti (köpük ve fiberlerin birbirine iyice kaynaştığı köşe bölgeler büyütülmüştür).

3.2.3. Gözenek boyut dağılımı analizi

İki katmanlı doku iskelelerinin gözenek boyut dağılımı, civalı porozimere ile düşük basınç analizi yapılarak analiz edilmiştir (Şekil 7). Bütün iskeleler 5–200 µm arasında geniş bir gözenek dağılımına sahiptir. Çapraz bağlanmayan 2CG grubunda 40 µm altındaki gözenek miktarı daha fazladır (Şekil 7A), ancak çapraz bağlama işleminden sonra gözenek boyut dağılımı (30–40 µm civarında yoğunlaşarak) daha homojen bir hale gelmiştir (Şekil 7B). Doku iskelelerindeki gözenek boyutunun ve gözenekliliğin hücre davranışı (proliferasyon ve farklılaşma) ve mekanik özellikler üstünde etkisi olduğu literatürde bildirilmektedir (Loh & Choong, 2013). Deri doku mühendisliği uygulaması için geliştirilen kollajen esaslı köpüklerde 10–200 µm arasındaki gözenek boyutunun fibroblast yapışması ve proliferasyonu için uygun olduğu gösterilmiştir (Akturk vd., 2016). Ayrıca bazı araştırmacılar, ortalama 100–200 µm gözenek boyut aralığını deri doku mühendisliği için önermektedirler (Han vd., 2014; Liu vd., 2007).



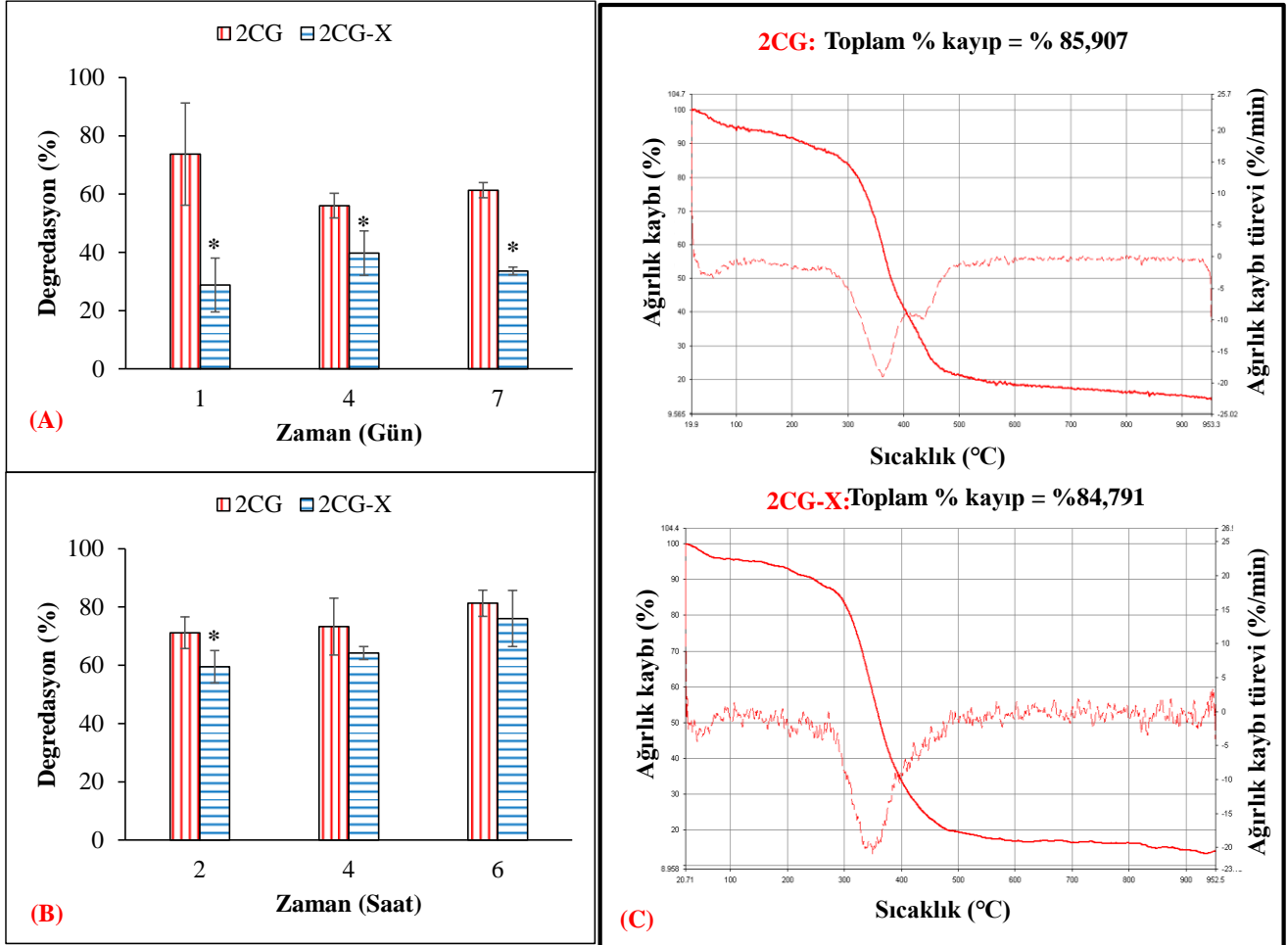
Şekil 7. Farklı iki katmanlı iskele gruplarının Civalı Porozimetre ile gözenek boyut dağılım analizleri: (A) 2CG ve (B) 2CG-X.

3.2.4. Sulu ortamda hidrolitik ve enzimatik degradasyon testleri

Şekil 8A ve 8B’de gösterildiği gibi çapraz bağlama işlemi iskelenin sulu ortam kararlılığını belirgin bir şekilde arttırmıştır. Çözünmeye hassas olan kısım bal içeren fiberli kısımdır. Fiberli üst katmanda bulunan yüksek bal içeriği sebebiyle çapraz bağlanma yapılmış olsa bile fiber çözünmesi hızlıdır. Bal kompozisyonunda hızlı çözülmeye meyilli parçalar (örneğin früktoz ve glikoz gibi şekerler) bulunmaktadır. Ayrıca bal, osmotik bir ajan olduğu için nanofiber içine su geçişi hızlanmakta ve bu da polimer liflerin hidrolizine sebep olmaktadır (Sarkar vd., 2018). Yani, sulu ortamdaki bu kütle kaybı hem hızlı çözünür bileşenlerin salınmasına hem de artan hidrolize bağlanabilir. Literatürde bal içeren farklı iskelelerde de bal sebebiyle su tutulumu artarak degradasyon hızının arttığı kaydedilmiştir (Rajput vd., 2014; Sarhan vd., 2016; Wang vd., 2012). Hidrolitik degradasyon testinde çapraz bağlanan ile çapraz bağlı olmayan tüm gruplar arasındaki istatistiksel açıdan anlamlı fark bulunmuştur. Farklı zaman periyotları arasındaki dalgalanma deneylerin farklı numuneler üstünden yapılmasına bağlanabilir. Gruplar arasındaki fark, enzimatik bozunum testinde ise küçüktür ve her iki grupta da enzimatik degradasyon ikinci saatten itibaren yaklaşık %60 seviyelerine ulaşmıştır, yani hem 2CG hem de 2CG-X grubu enzimatik bozunuma karşı dirençsizdir. Böylece geliştirilen doku iskelelerinin, yoğun enzimatik ortamlarda kullanıma elverişli olmadığı sonucuna varılmıştır. Kollajenaz enzimi, yara tedavisi için geliştirilen yara örtüsü malzemelerinin enzimatik degradasyona karşı direncini değerlendirmek için sıklıkla kullanılmaktadır (Akturk & Keskin, 2016; Akturk vd., 2016; Eskandarinia vd., 2020). Özellikle kronik deri yaralanmalarında enfeksiyon sonucu proteaz enzimlerinin seviyesinde artış olduğu, yani yoğun bir enzimatik etkinlik olduğu için (McCarty & Percival, 2013) bu tarzdaki yara tedavisi uygulamaları için bu çalışmada geliştirilen doku iskelelerinin uygun olmayabileceği düşünülmektedir. Literatürde aynı enzim derişiminin kullanıldığı çalışmalarda da kollajen temelli biyomalzemelerin (kollajen nanofibröz matris ve ticari yara örtüsü Matriderm) 1 gün içinde %80’den daha fazla degrade olduğu görülmüştür (Akturk & Keskin, 2016). Yine aynı enzim derişiminin kullanıldığı başka bir çalışmada (Akturk vd., 2016), gluteraldehitte çapraz bağlanmış kollajen esaslı köpük formundaki iskelelerin enzimatik degradasyona karşı, bu çalışmadaki 2 katmanlı iskelelere kıyasla daha dayanıklı (2 saatte %10, 4 saatte %20 civarında bozunum) olduğu görülmüştür. Bu belirgin fark, iki katmanlı iskelede kullanılan suda kolay çözünür malzemelere (jelatin, PEO ve bal) ve çapraz bağlama prosedürüne bağlanabilir.

3.2.5. Termogravimetrik analiz (TGA)

Şekil 8C’de gösterildiği gibi 2 grubun termogramları birbirine benzerdir. Çapraz bağlı olmayan grubun toplam ağırlık kaybı bir miktar daha yüksektir (%86 civarında). İki grupta da birinci termal dekompozisyon 20–100 °C aralığında gerçekleşmiştir. İlk ağırlık kaybı iskele içinde absorbe edilmiş su (özellikle nanofiberli katmanda bal sebebiyle) ve polimer içinde bulunan moleküler sudur. %5 civarında bir su kaybı gerçekleşmiştir ve maksimum ağırlık kaybı hızı da her iki grup için de 60 °C’de olmuştur. Bu su kaybı 2CG grubu için 250 °C, 2CG-X grubu içinse 275 °C’ye kadar devam etmiş ve toplam su kaybı %12 civarında sonlanmıştır. İkinci termal dekompozisyon aşaması (yani, kollajen ve jelatin polimer zincirlerinin dekompozisyonu ya da en iç kısımda bulunan sıkıca bağlı su molekülleri) 2CG grubunda iki parçalıdır (250–400 °C ve 400–500 °C aralığında), 2CG-X (iki katmanlı çapraz bağlı yapı) için ise 275–550 °C olarak tek parçadır. Bunun sebebi 2CG’de çapraz bağlanmadığı için daha fazla moleküler su tutması, 2CG-X yapıda çapraz bağlama işlemi sırasında fiberli katmanın bir kısmının çözünerek kaybolması olabilir. İskelenin termal dekompozisyonu için elde edilen sıcaklık değer aralıkları literatür bulguları ile uyumludur (Nuvoli vd., 2020; Skopinska-Wisniewska vd., 2021). Çapraz bağlı yapıların daha kapalı olduğu ve daha az su kaybettiği, ayrıca degradasyon sıcaklıklarının sağa doğru kayması diğer çalışmalarda da bildirilmiştir (Skopinska-Wisniewska vd., 2021).



Şekil 8. İskele gruplarının (2CG ve 2CG-X) sulu ortam ve termal degradasyon sonuçları: (A) PBS içinde hidrolitik degradasyon, (B) tip I kollajenaz içinde enzimatik degradasyon testleri ve (C) TGA termogramları (*: Aynı zaman periyodunda ikili gruplar arasındaki $p < 0,05$ değeri için anlamlı fark).

4. Sonuç

Bu projede geliştirilen doku iskelesi, sahip olduğu nanofibröz üst katmanı sayesinde hücrelerin ilk yapışması ve çoğalması için uygun ağısı bir mimari yapı oluşturmuştur. Çapraz bağlama ve yıkama işlemleri sonrasında, fiberler arasında bazı kaynaşmalar meydana gelse de bu nanofibröz yapı büyük oranda korunmuştur. Çapraz bağlama işlemi sonunda, doku iskelesinin sulu ortam dayanıklılığı önemli ölçüde artmış ve gözenekli yapısı da korunmuştur. Geliştirilen 2CG-X iskele, bu özellikleriyle, yara örtüsü, deri ikamesi, *in vitro* test modelleri için tekrardan yapılandırılmış deri ya da kornea epitelyumu vb. gibi farklı doku mühendisliği uygulamaları için uygun adaylar olabilir. 2CG-X iskele grubuna gelecekte insan epidermal keratinosit hücreleri ekilerek deri doku iskelesi olarak *in vitro* koşullardaki uygunluğunun da araştırılması planlanmaktadır.

Teşekkür

Bu proje, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı (Başvuru No: 1919B011901535) kapsamında desteklenmiştir. Projedeki yardımlarından ötürü Raziye Koraş ve Baraa Mehyo'ya teşekkürlerimizi sunarız.

Referanslar

Abdelrazek, E. M., Abdelghany, A. M., Badr, S. I., & Morsi, M. A. (2018). Structural, optical, morphological and thermal properties of PEO/PVP blend containing different concentrations of biosynthesized Au nanoparticles. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(4), 419–431. doi: 10.1016/j.jmrt.2017.06.009

Akturk, O., & Keskin, D. (2016). Collagen/PEO/gold nanofibrous matrices for skin tissue engineering. *Turkish Journal of Biology*, 40, 380–398. doi: 10.3906/biy-1502-49

Akturk, O., Kismet, K., Yasti, A. C., Kuru, S., Duymus, M. E., Kaya, F., Caydere, M., Hucumenoglu, S., & Keskin D. (2016). Collagen/gold nanoparticle nanocomposites: A potential skin wound healing biomaterial. *Journal of Biomaterials Applications*, 31(2), 283–301. doi: 10.1177/0885328216644536

Aliakbarshirazi, S., & Talebian, A. (2017). Electrospun gelatine nanofibrous scaffolds for cartilage tissue engineering. *Materials Today: Proceedings*, 4(7), 70597064. doi: 10.1016/j.matpr.2017.07.038

Arafat, M. T., Tronci, G., Yin, J., Wood, D. J., & Russell, S. J. (2015). Biomimetic wet-stable fibres via wet spinning and diacid-based crosslinking of collagen triple helices. *Polymer*, 77, 102–112. doi: 10.1016/j.polymer.2015.09.037

Campiglio, C. E., Contessi Negrini, N., Farè, S., & Draghi, L. (2019). Cross-linking strategies for electrospun gelatin scaffolds. *Materials (Basel)*, 12(15), 2476. doi: 10.3390/ma12152476

Dias, J. R., Baptista-Silva, S., de Oliveira, C. M. T., Sousa, A., Oliveira, A. L., Bártolo, P. J., & Granja, P. L. (2017). In situ crosslinked electrospun gelatin nanofibers for skin regeneration. *European Polymer Journal*, 95, 161–173. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2017.08.015

Dong, C., & Lv, Y. (2016). Application of collagen scaffold in tissue engineering: Recent advances and new perspectives. *Polymers (Basel)*, 8(2), 42. doi: 10.3390/polym8020042

El-Kased, R. F., Amer, R. I., Attia, D., & Elmazar, M. M. (2017). Honey-based hydrogel: *in vitro* and comparative *in vivo* evaluation for burn wound healing. *Scientific Reports*, 7, 9692. doi: 10.1038/s41598-017-08771-8

Eskandarinia, A., Kefayat, A., Agheb, M., Rafienia, M., Baghbadorani, M. A., Navid, S., Ebrahimpour, K., Khodabakhshi, D., & Ghahremani, F. (2020). A novel bilayer wound dressing composed of a dense polyurethane/propolis membrane and a biodegradable polycaprolactone/gelatin nanofibrous scaffold. *Scientific Reports*, 10, 3063. doi: 10.1038/s41598-020-59931-2

Gautam, S., Chou, C. F., Dinda, A. K., Potdar, P. D., & Mishra, N. C. (2014). Surface modification of nanofibrous polycaprolactone/gelatin composite scaffold by collagen type I grafting for skin tissue engineering. *Materials Science and Engineering: C*, 34, 402-409. doi: 10.1016/j.msec.2013.09.043.

Gok, S., Severcan, M., Goormaghtigh, E., Kandemir, I., & Severcan, F. (2015). Differentiation of Anatolian honey samples from different botanical origins by ATR-FTIR spectroscopy using multivariate analysis. *Food Chemistry*, 170, 234–240. doi: 10.1016/j.foodchem.2014.08.040

Gomes, S., Rodrigues, G., Martins, G., Henriques, C., & Silva, J.C. (2017). Evaluation of nanofibrous scaffolds obtained from blends of chitosan, gelatin and polycaprolactone for skin tissue engineering. *International Journal of Biological Macromolecules*, 102, 1174–1185. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.05.004

Han, F., Dong, Y., Su, Z., Yin, R., Song, A., & Li, S. (2014). Preparation, characteristics and assessment of a novel gelatin-chitosan sponge scaffold as skin tissue engineering material. *International Journal of Pharmaceutics*, 476(1-2), 124–133. doi: 10.1016/j.ijpharm.2014.09.036

Heidari, M., Bahrami, S. H., Ranjbar-Mohammadi, M., & Milan, P. B. (2019). Smart electrospun nanofibers containing PCL/gelatine/graphene oxide for application in nerve tissue engineering. *Materials science and Engineering: C*, 103, 109768. doi: 10.1016/j.msec.2019.109768

Hixon, K. R., Lu, T., McBride-Gagy, S. H., Janowiak, B. E., & Sell, S. A. (2017a). A comparison of tissue engineering scaffolds incorporated with manuka honey of varying UMF. *BioMed Research International*, 2017, 4843065. doi: 10.1155/2017/4843065

- Hixon, K. R., Lu, T., Carletta, M. N., McBride-Gagy, S. H., Janowiak, B. E., & Sell, S. A. (2017b). A preliminary *in vitro* evaluation of the bioactive potential of cryogel scaffolds incorporated with Manuka honey for the treatment of chronic bone infections. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 106(5), 1918–1933. doi: 10.1002/jbm.b.34002
- Hoon Lee, D., Arisaka, Y., Tonegawa, A., Woong Kang, T., Tamura, A., & Yui, N. (2019). Cellular orientation on repeatedly stretching gelatin hydrogels with supramolecular cross-linkers. *Polymers*, 11(12), 2095. doi: 10.3390/polym11122095
- Kozłowicz, K., Różyło, R., Gładyszewska, B., Matwijczuk, A., Gładyszewski, G., Chocyk, D., Samborska, K., Piekut, J., & Smolewska, M. (2020). Identification of sugars and phenolic compounds in honey powders with the use of GC-MS, FTIR spectroscopy, and X-ray diffraction. *Scientific Reports*, 10(1), 16269. doi: 10.1038/s41598-020-73306-7
- Lee, M., Hwang, J. H., & Lim, K. M. (2017). Alternatives to *in vivo* Draize rabbit eye and skin irritation tests with a focus on 3D reconstructed human cornea-like epithelium and epidermis models. *Toxicological research*, 33(3), 191–203. doi: 10.5487/TR.2017.33.3.191
- Liu, H., Fan, H., Cui, Y., Chen, Y., Yao, K., & Goh, J. C. (2007). Effects of the controlled-released basic fibroblast growth factor from chitosan–gelatin microspheres on human fibroblasts cultured on a chitosan–gelatin scaffold. *Biomacromolecules*, 8(5), 1446–1455. doi: 10.1021/bm061025e
- Liu, T., & Wang, Z. (2013). Collagen crosslinking of porcine sclera using genipin. *Acta Ophthalmologica*, 91(4), e253–e257. doi: 10.1111/aos.12172
- Loh, Q. L., & Choong, C. (2013). Three-dimensional scaffolds for tissue engineering applications: role of porosity and pore size. *Tissue Engineering Part B: Reviews*, 19(6), 485–502. doi: 10.1089/ten.TEB.2012.0437
- Maleki, H., Gharehaghaji, A. A., & Dijkstra, P. J. (2013). A novel honey-based nanofibrous scaffold for wound dressing application. *Journal of Applied Polymer Science*, 127(5), 4086–4092. doi: 10.1002/app.37601
- Martinotti, S., & Ranzato, E. (2018). Honey, wound repair and regenerative medicine. *Journal of Functional Biomaterials*, 9(2), 34. doi: 10.3390/jfb9020034
- Martinotti, S., Calabrese, G., & Ranzato, E. (2015). Honey and wound healing: New solutions from an old remedy. In *Wound Healing: Cellular Mechanisms, Alternative Therapies and Clinical Outcomes*, Wade, L. E. (ed). Nova Publishers Inc.: Hauppauge, NY, USA.
- Maslennikova, A., Kochueva, M., Ignatieva, N., Vitkin, A., Zakharkina, O., Kamensky, V., Sergeeva, E., Kiseleva, E., & Bagratashvili, V. (2015). Effects of gamma irradiation on collagen damage and remodeling. *International Journal of Radiation Biology*, 91(3), 240–247. doi: 10.3109/09553002.2014.969848
- McCarty, S. M., & Percival, S. L. (2013). Proteases and delayed wound healing. *Advances in Wound Care*, 2(8), 438–447. doi: 10.1089/wound.2012.0370
- Minden-Birkenmaier, B. A., Neuhalfen, R. M., Janowiak, B. E., & Sell, S. A. (2015). Preliminary investigation and characterization of electrospun polycaprolactone and manuka honey scaffolds for dermal repair. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 10(4), 126–138. doi: 10.1177/155892501501000406
- Nagaoka, H., Nagaoka, H., Walter, R., Boushell, L. W., Miguez, P. A., Burton, A., Ritter, A. V., & Yamauchi, M. (2014). Characterization of genipin-modified dentin collagen. *BioMed Research International*, 2014, 702821. doi: 10.1155/2014/702821
- Nazeri, S., Ardakani, E.M., Babavalian, H., & Latifi, A. M. (2015). Evaluation of effectiveness of honey-based alginate hydrogel on wound healing in rat model. *Journal of Applied Biotechnology Reports*, 2(3), 293–297.
- Nguyen, H. T. L., Katopo, L., Pang, E., Mantri, N., & Kasapis, S. (2019). Structural variation in gelatin networks from low to high solid systems effected by honey addition. *Food Research International*, 121, 319–325. doi: 10.1016/j.foodres.2019.03.048
- Nguyen, T., Ventura, R., Min, Y., & Lee, B. (2016). Genipin cross-linked polyvinyl alcohol-gelatin hydrogel for bone regeneration. *Journal of Biomedical Science and Engineering*, 9, 419–429. doi: 10.4236/jbise.2016.99037
- Nuvoli, L., Conte, P., Fadda, C., Reglero Ruiz, J. A., García Pérez, J. M., Baldino, S., & Mannu, A. (2020). Structural, thermal, and mechanical properties of gelatin-based films integrated with tara gum. *Polymer*, 214, 123244. doi: 10.1016/j.polymer.2020.123244

- Parin, F. N., Terzioğlu, P., Sicak, Y., Yildirim, K., & Öztürk, M. (2021). Pine honey-loaded electrospun poly (vinyl alcohol)/gelatin nanofibers with antioxidant properties, *The Journal of The Textile Institute*, 112(4), 628–635, doi: 10.1080/00405000.2020.1773199
- Pataca, L. C. M., Neto, W. B., Marcucci, M. C., & Poppi, R. J. (2007). Determination of apparent reducing sugars, moisture and acidity in honey by attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectrometry. *Talanta*, 71(5), 1926–1931. doi: 10.1016/j.talanta.2006.08.028
- Rajput, M., Bhandaru, N., Barui, A., Chaudhary, A., Paul, R.R., Mukherjee, R., & Chatterjee, J. (2014). Nano-patterned honey incorporated silk fibroin membranes for improving cellular compatibility. *RSC Advances*, 4, 44674–44688. doi: 10.1039/C4RA05799F
- Ranzato, E., & Martinotti, S. (2016). The secrets of honey: Why this old remedy is still useful. In *Honey: Geographical Origins, Bioactive Properties and Health Benefits*, Ramirez, R. (ed.). Nova Publishers Inc.: Hauppauge, NY, USA.
- Rose, J. B., Sidney, L. E., Patient, J., White, L. J., Dua, H. S., El Haj, A. J., Hopkinson, A., & Rose, F. R. A. J. (2019). *In vitro* evaluation of electrospun blends of gelatin and PCL for application as a partial thickness corneal graft. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 107(4), 828–838. doi: 10.1002/jbm.a.36598
- Sarhan, W.A., Azzazy, H. M. E., & El-Sherbiny, I. M. (2016). The effect of increasing honey concentration on the properties of the honey/polyvinyl alcohol/chitosan nanofibers. *Materials Science and Engineering: C*, 67, 276–284. doi: 10.1016/j.msec.2016.05.006
- Sarkar, R., Ghosh, A., Barui, A., & Datta, P. (2018). Repositing honey incorporated electrospun nanofiber membranes to provide anti-oxidant, anti-bacterial and anti-inflammatory microenvironment for wound regeneration. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 29(3), 31. doi: 10.1007/s10856-018-6038-4
- Skopinska-Wisniewska, J., Tuszynska, M., & Olewnik-Kruszkowska, E. (2021). Comparative study of gelatin hydrogels modified by various cross-linking agents. *Materials (Basel)*, 14(2), 396. doi: 10.3390/ma14020396
- Takitoh, T., Bessho, M., Hirose, M., Ohgushi, H., Mori, H., & Hara, M. (2015). Gamma-cross-linked nonfibrillar collagen gel as a scaffold for osteogenic differentiation of mesenchymal stem cells. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 119(2), 217–225. doi: 10.1016/j.jbiosc.2014.07.008
- Tang, Y., Lan, X., Liang, C., Zhong, Z., Xie, R., Zhou, Y., Miao, X., Wang, H., & Wang, W. (2019). Honey loaded alginate/PVA nanofibrous membrane as potential bioactive wound dressing. *Carbohydrate Polymers*, 219, 113–120. doi: 10.1016/j.carbpol.2019.05.004
- Topuz, F., & Uyar, T. (2017). Electrospinning of gelatin with tunable fiber morphology from round to flat/ribbon. *Materials Science and Engineering C*, 80, 371–378. doi: 10.1016/j.msec.2017.06.001
- Torras, N., García-Díaz, M., Fernández-Majada, V., & Martínez, E. (2018). Mimicking epithelial tissues in three-dimensional cell culture models. *Frontiers in Bioengineering and bBiotechnology*, 6, 197. doi: 10.3389/fbioe.2018.00197
- Vrana, N. E., Builles, N., Kocak, H., Gulay, P., Justin, V., Malbouyres, M., Ruggiero, F., Damour, O., Hasirci, V. (2007). EDC/NHS cross-linked collagen foams as scaffolds for artificial corneal stroma. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 2007, 18(12), 1527–1545. doi: 10.1163/156856207794761961
- Wang, T., Zhu, X. K., Xue, X. T., & Wu, D. Y. (2012). Hydrogel sheets of chitosan, honey and gelatin as burn wound dressings. *Carbohydrate Polymers*, 88(1), 75–83. doi: 10.1016/j.carbpol.2011.11.069
- Wang, W., Zhang, Y., Ye, R., & Ni, Y. (2015). Physical crosslinkings of edible collagen casing. *International Journal of Biological Macromolecules*, 81, 920–925. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2015.09.032
- Yoshioka, S. A., & Goissis, G. (2008). Thermal and spectrophotometric studies of new crosslinking method for collagen matrix with glutaraldehyde acetals. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 19(3), 1215–1223. doi: 10.1007/s10856-007-0151-0



Klozet Kapakları Üretiminde Yeni Nesil Kapak Teknolojilerinin Geliştirilmesi

Development of New Generation Cover Technologies in The Production of Toilet Seats

Elif Gürel Özyurt^{1*}, Erden Soner Erkilic¹, Özgül Kocabaş¹, Can Alp Terzioğlu¹
Abdullah Tuğrul Seyhan², Arif Kayapınar³

¹Matel Hammadde San. Ve Tic. A.Ş, Serel Seramik, 45125 Manisa, TÜRKİYE

²Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, 26000 Eskişehir, TÜRKİYE

³Tarel Teknolojik Araştırma Sanayi Ticaret A.Ş, 45125 Manisa, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 28/02/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Seramik sağlık gereçlerinde kullanılan klozet kapakları büyük çoğunlukta ürefoormaldehit bazlı hammaddelerden üretilmektedir. Yenilikçi tasarımlar daha fonksiyonel, daha ince kapaklara doğru gitmektedir. Ancak ürefoormaldehit gerek işlenebilme zorluğu gerekse mukavemetin yeterli olmamasından dolayı günümüz ihtiyaçlarını karşılayacak özelliklerdeki kapak modellerinin tasarım ve üretimine olanak sağlayamaması, farklı özellikleri bir arada barındıran kompozit malzemelere olan talebi günden güne arttırmaktadır. Bu çalışmada ürefoormaldehit yerine uzun yıllardır otomotiv başta olmak üzere elektrik, inşaat, ev cihazları gibi sektörlerde yaygın kullanılan SMC (Sheet Moulding Compound) yöntemi ile üretilmiş kompozit malzemeler değerlendirilmiştir. İstenen ürün özelliklerini sağlayan uygun SMC kompozisyonlarının belirlenmesi konusunda çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca Ansys yazılım programı kullanılarak klozet kapakları için maksimum deformasyon ve gerilme değerleri bulunmuştur. Bu sayede ürefoormaldehit ile yapılan klozet kapakları ile kıyaslandığında, daha yüksek darbe dayanımı (145 MPa), daha ince ürün kesiti (4 mm) elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Sheet Moulding Compound (SMC), Kompozit Malzemeler, Ansys Sonlu Elemanlar Analizi, Sayısal Simülasyon”

Abstract

Toilet seat covers used in ceramic sanitary ware is currently produced from urea formaldehyde-based raw materials. Innovative designs are moving towards more functional; tinner covers. However, the demand for composite materials with different properties is increasing day by day, as urea formaldehyde cannot allow the design and production of cover models that meet today's needs due to both the difficulty in processing and its insufficient strength. In this study, instead of urea-formaldehyde, composite materials were produced with SMC (Sheet Moulding Compound) method, which has been widely used in sectors such as electricity, construction, and household appliances and especially in automotive many years, were evaluated. Studies have been carried out to determine suitable SMC compositions that provide the desired product properties. In addition, maximum deformation and stress values of toilet seat covers were found in the Ansys software program. In this way, higher impact strength (145 MPa) and thinner product cross-section (4 mm) were obtained when compared to toilet seat covers made with urea-formaldehyde.

Key Words

“Sheet Moulding Compound (SMC), Composite Materials, Ansys Finite Elements Analysis, Numerical Simulation”

1. Giriş

Son zamanlarda seramik sağlık gereçlerinde kullanılan klozet kapaklarında yenilikçi tasarımlara olan ilgi giderek artmıştır. Artan talebi karşılamak adına teknoloji de sürekli gelişim halindedir. Yeni nesil tasarımlarda, geleneksel malzemelerin mekanik ve termal özelliklerinin yetersiz kalması ve tasarımı zorlaştırdığı için kompozit malzemelere olan talep artmıştır. Kompozit malzemeler ile üretim maliyetlerinin, buna bağlı olarak satış fiyatlarının düşmesi sağlanabilmektedir. Kompozitlerin işlenmesinde geleneksel yöntemlere kıyasla daha az enerji kullanımı enerji tasarrufu açısından son derece önemlidir. SMC yöntemi 1960'lı yıllara dayanmaktadır. Termoset polimer içeren süreksiz fiber takviyeli kompozit malzemeler SMC yönteminin temelini oluşturur. Düşük maliyetli üretim süreci, üretim sırasında şekillendirmenin kolay olması ve yüksek sertlik ve mukavemet sağlaması SMC yöntemini birçok endüstri alanında popüler hale getirmiştir (Trauth, vd., 2018). SMC iki basamakta gerçekleştirilir. İlk basamakta özel olarak hazırlanan cam fiber, doymamış polyeester, dolgu ve katkı malzemeleri bir araya getirilip karıştırılarak pestil (prepreg) haline getirilir (Voorn, vd., 2001). İkinci basamakta, hazırlanan pestil bir süre olgunlaşması için bekletilir. Daha sonra pestiller yüksek basınçlı homojen ısıtmalı kalıplarda istenilen şekle getirilir (Tröster, vd., 2002). SMC üretim aşamalarını başarılı bir şekilde tamamlamak için prosesin hem kimyasal hem de mekanik kontrolünün sağlanması gerekir (Watanabe, vd., 1982). Üretim sürecindeki hatalardan dolayı malzeme yüzeyinde ya da içerisinde boşluk olursa yüzey kalitesi düşecek, mekanik özellikleri ise olumsuz etkilenecektir (Marissen, vd., 1999). Yine matris ve fiber arasındaki etkileşimler ile fiber oranı homojen dağılımı düzgün sağlanmazsa mekanik özellikler ile yüzey kalitesi olumsuz etkilenecektir (Feuillade, vd., 2006). Bunun yanı sıra, SMC yönteminin malzeme özelliklerini geliştirmek için son zamanlarda reçine formülasyonuna odaklanan çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda dolgu malzemesi miktarını azaltıp fiber hacmi arttırıldığı mukavemetin de arttırdığı gözlemlenmiştir (Oldenbo, vd., 2003).

SMC yönteminde kullanılan pestil şeklinde üretilen levhaların içinde matris malzemesi olarak polyeester reçine (%28), takviye malzemesi olarak cam fiber (%30), inorganik dolgu malzemeleri (%37) ve katkı malzemeler (%5) olarak katalizörler, kalıp ayırıcılar ve kalınlaştırıcılar bulunur (Pickering, vd., 2006). SMC yönteminde, ilk aşamada bileşenler mikserde karıştırılarak hamur şekline getirilir. Macun şeklini alan karışım konveyör bant hattında ilerlerken cam fiberler kırılarak pestile yerleştirilir ve üzerine tekrar hamur haline getirilmiş macun eklenir. Bu pestil biçimindeki malzeme yığımlı naylon veya polietilen taşıyıcı rulolar vasıtasıyla sıkıştırılır. Bu sayede reçinenin uçuculuğu önlenmiş olur. Kalıplara aktarılmadan önce pestilin uygun viskoziteye ulaşması için sıcaklık kontrolü olan bir ortamda bekletilmesi gerekir (Bruderick, 2002).

Literatürde SMC metodunun klozet kapaklarının üretiminde kullanılması ile ilgili çalışmaya rastlanmamıştır. Literatürde patent çalışmalarına bakılmıştır. Bir patentte içi boş bir dolgu malzemesi içeren bir termoset reçine ile oluşturulan katman, bu katmanın bez tabakalar vasıtasıyla yapıştırıldığı güçlendirilmiş fiberli bir termoset reçine ile hazırlanmış dış katmandan oluşan hafif bir kalıplama bileşiği üretilmiştir. Elde edilen bu bileşik boyama için uygun bir yüzeye sahip olduğu görülmüştür (Narita, 1995). Diğer bir patent çalışmasında SMC pestilinde kullanılan reçinelerin en az iki tabaka halinde dokuma takviyeli kumaş ile güçlendirilerek hazırlanması ile daha düzgün yüzeyli ürün elde edilmesinin mümkün olduğu görülmüştür (Green, 2001.)

2. Materyal ve Yöntemler

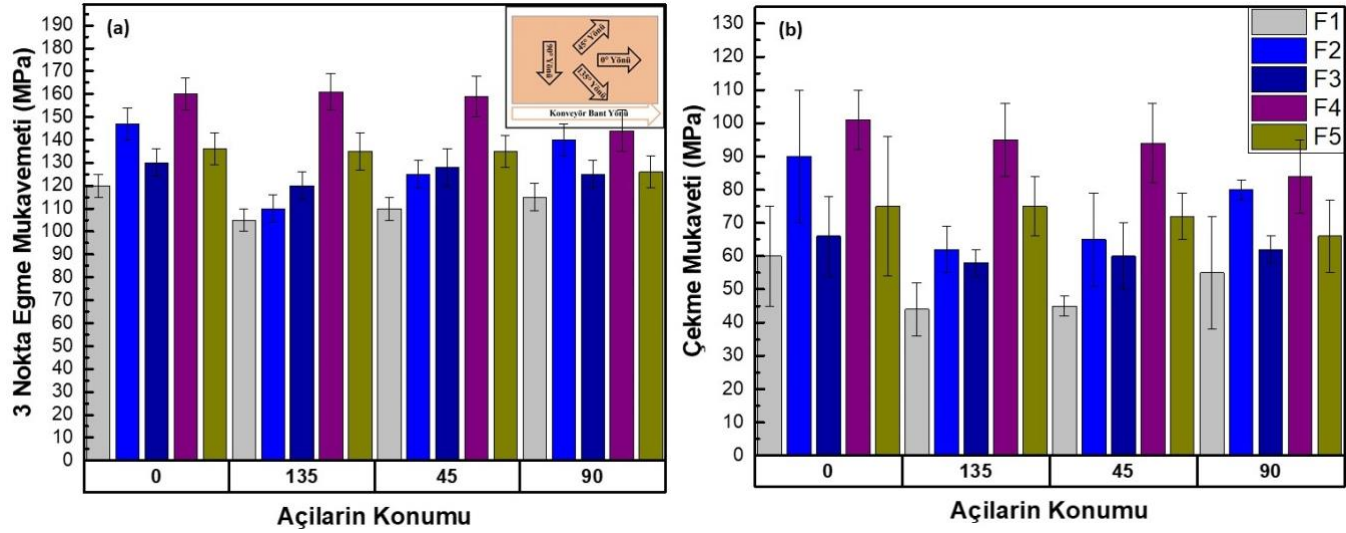
İlk olarak reçete çalışmaları yapılmıştır. Seçilen doymamış polyeester reçine içerisine dolgu maddesi ile destek sağlanmıştır. Cam fiber uzunlukları istenilen mukavemete göre belirlenmiştir. Hızlı kürlenme ve kimyasal bağların oluşması için radikal polimerizasyonu sağlayan katalizörler kullanılmıştır. Mukavemeti yüksek ve yüzey görüntüsü en iyi formülasyonu bulmak için reçeteler ile hazırlanan numunelerin gerilme ve 3 nokta eğilme mekanik testleri DIN ISO 527-4 ve 14125 standardına göre Instron marka test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. SMC yöntemine uygun kalıp hazırlanması, kalıp içi rezistanların yerinin belirlenmesi ve buna bağlı olarak kalıp içindeki sıcaklık dağılımını öngörmek adına ANSYS sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılmıştır. Klozet kapağı ve oturak kısmında oluşacak maksimum deformasyon ve gerilme değerleri ANSYS sayesinde bulunmuş, kalıp bu değerler baz alınarak optimize edilmiştir.

3. Tartışma ve Sonuçlar

3.1 SMC Hamurlarının Formülasyon Çalışması

Çalışmaya ilk olarak SMC de kullanılacak olan hamur kompozisyonunu oluşturmakla başlanmıştır. SMC kompozit reçetesini oluşturmak için reçine, cam fiber ve katkı maddeleri incelenmiştir. Bu çalışmada, fiberlerin uzunlukları ve ağırlıkça hacimleri değiştirilerek 5 farklı formülasyon denenmiştir. İlk olarak laboratuvar tipi bir mikserin içerisinde belirlenen reçine konulmuştur. Dolgu malzemesi de reçinenin içine eklenerek karıştırılmıştır. Katalizör dışındaki maddeler eklenerek karıştırılmaya devam edilmiştir. En son katalizörün eklenmesiyle hamur belli bir kıvama getirilmiştir. Mikserden alınan hamur yatay konveyör bant hattında ilerlerken üzerine 25 mm boyunda cam fiberler yerleştirilmiştir. Elde edilen pestil 30°C'de birkaç gün bekletilerek viskozitesi sabit tutulup olgunlaştırılmıştır. Olgunlaştırılan pestiller 1500 kN basınç uygulanarak sıkıştırılıp yarı mamül haline getirilmiştir. Konveyör akış yönüne dik olarak konulan fiberler, bantın hareket yönüne doğru bir yönelme göstermektedir. Bu nedenle oluşan bu anizotropik yapının araştırılması önemlidir. Çalışılan reçete formülasyonlarında kırılmış fiber uzunlukları ve hacimce oranları değiştirilerek son numunelerin mekanik testleri yapılmıştır. Formülasyonda iki farklı uzunluğa sahip kırılmış fiber (25.0 mm ve 50.0 mm) ve onların ağırlıkça oranlarını değiştirerek nihai ürünler elde edilmiştir. Çekme ve 3 nokta eğme mukavemeti testleri DIN ISO 527-4 ve 14125 standartlarına göre farklı açılarda test edilmiştir. 5 farklı reçete kombinasyonu ile hazırlanan reçeteler konveyör akış yönüne göre

belirlenmiş 4 farklı yönde (0, 45, 90 ve 135 derecelik açılarla) test edilmiştir. Parçalar 3 eksen CNC makinesi ile işlenmiştir. 5 farklı reçete için elde edilen 3 nokta eğme mukavemeti sonuçları ve çekme mukavemeti sonuçları Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. a) 3 nokta eğme mukavemeti sonuçları; b) çekme mukavemeti sonuçları.

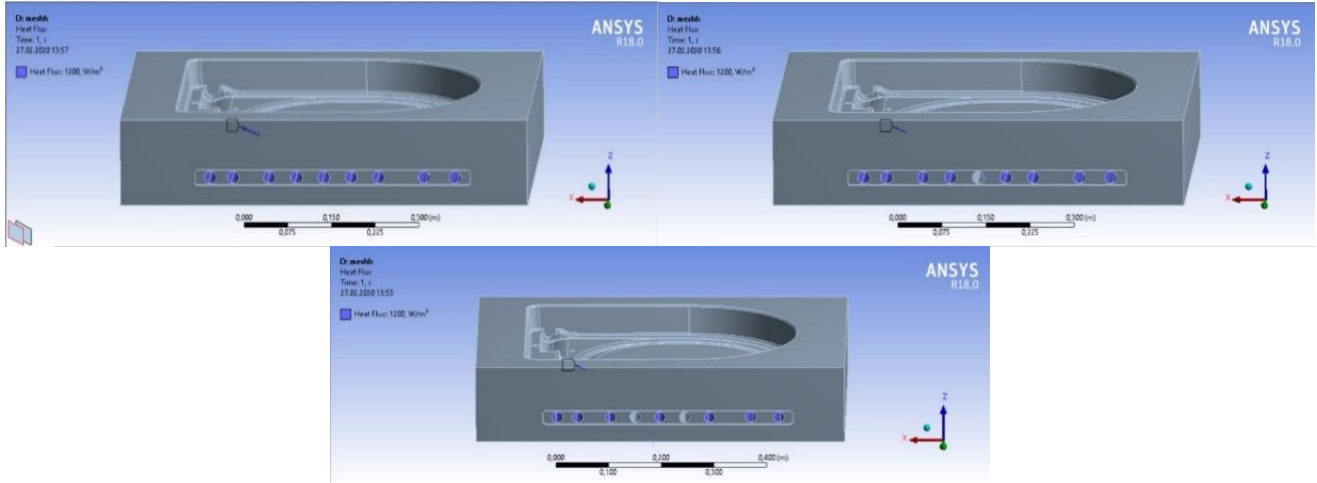
3 nokta eğme ve çekme mukavemeti için uygulanan açılar grafik üzerinde gösterilmiştir. F3, F4 ve F5 formülasyonlarında cam fiber miktarı hacimce iki katına çıkartılmıştır. Grafikler göz önüne alındığında F4 mukavemet olarak en yüksek değere sahiptir. 50.0 mm cam fiber boyutuyla birlikte hacimce fiber oranı da 2 kat arttırılmıştır. Hacimsel oran ve fiber boyutu arttırıldığında mukavemet değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Fakat uzun fiberlerin mukavemeti arttırmasına rağmen son ürün için gerekli olan yüzey kalitesi konusunda problemler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Hacimsel fiber oranının %30, fiber boyutunun ise 25.0 mm olduğu F5 reçetesi çalışmaların geri kalan kısmı için seçilmiştir. Ayrıca her formülasyon için anizotropik davranış gözlemlenmiştir. F5 reçetesinde anizotropik davranışı azaltmak için akışkanlık artırıcı kimyasal ilavesi yapılmıştır. Kullanılan reçete formülasyonu Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. SMC reçetesinin içeriğini oluşturan hammaddeler ve kullanım oranları

İçerik	Oran (%)
Doymamış polyester	15
Düşük profil katkı	7
İnhibitör	0.05
Katalizör	0.7
Kalıp ayırıcı ajan	0.8
Pigment	0.05
Cam fiber	30
Kıvam artırıcı	0.2
Dolgu maddesi	47

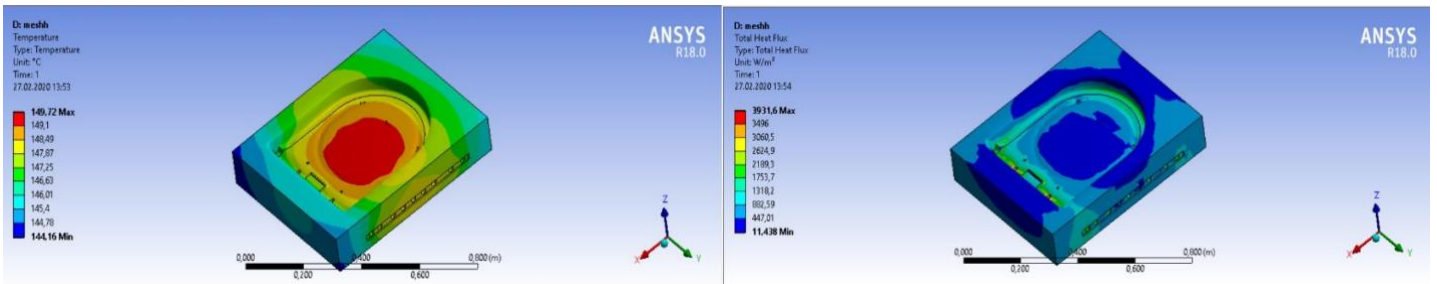
3.2. SMC Kalıplarının Hazırlanması

Projenin önemli hedeflerinden biri olan ürün kesitinin mevcut ürünlere göre daha ince (min 4 mm) olmasıdır. Bu amaçla, SMC prosesinde kullanılacak kapak modeli belirlenip, kapak tasarımı doğrultusunda mevcut presler için yeni iş kalıbı yaptırılmıştır. İlk olarak kalıp içerisinde sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Sonlu eleman metodu ile termal analizler gerçekleştirilmiştir. ANSYS Workbench Steady State termal analiz modülü kullanılmıştır. Rezistans yerleşiminde 3 adet alternatif analiz yapılmıştır. Kalıbı ısıtılmak adına tüp rezistanslar kullanılması düşünülmüştür. Tüp rezistansların kalıp içerisindeki yerleşimi ve ısıyı en homojen şekilde dağıtması için ANSYS sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılarak tüp rezistansların dağılımına karar verilmiştir. Yapılan 3 çalışma Şekil 2’de gösterilmiştir. ANSYS termal analizinde mavi renk ile belirtilen rezistanslar aktif, gri renk ile belirtilen rezistanslar ise pasif şekildedir.



Şekil 2. ANSYS termal analiz ile incelenen rezistans dağılımları.

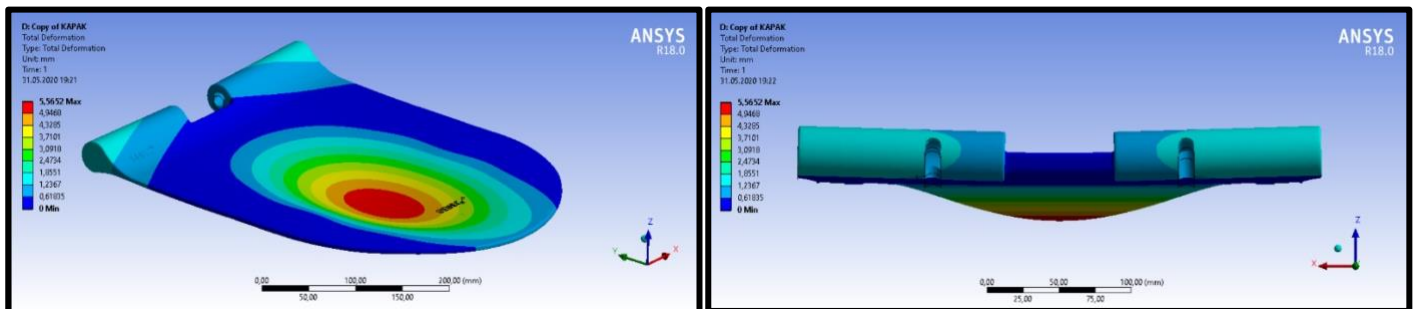
ANSYS heat flux analiz sonuçlarına göre 9 rezistansın aktif olarak çalıştığı modelde en yüksek sıcaklık değerine ulaşılrken, kalıbın içerisinde homojen sıcaklık dağılımı 2 tüp rezistansın kapalı konumda olduğu modelde elde edilmiştir. SMC kalıplama sürecinde ısınım son ürünün belirli noktalarındaki kalınlık değerlerine bağlı olarak genel anlamda homojen olması tercih edilmektedir. Bu nedenle yapılan prototip kalıp çalışmalarında 2 rezistansın kapalı olduğu model tercih edilmiştir. Seçilen modelin kalıp içi sıcaklık dağılımı ve toplam heat flux dağılımı Şekil 3'te verilmiştir.



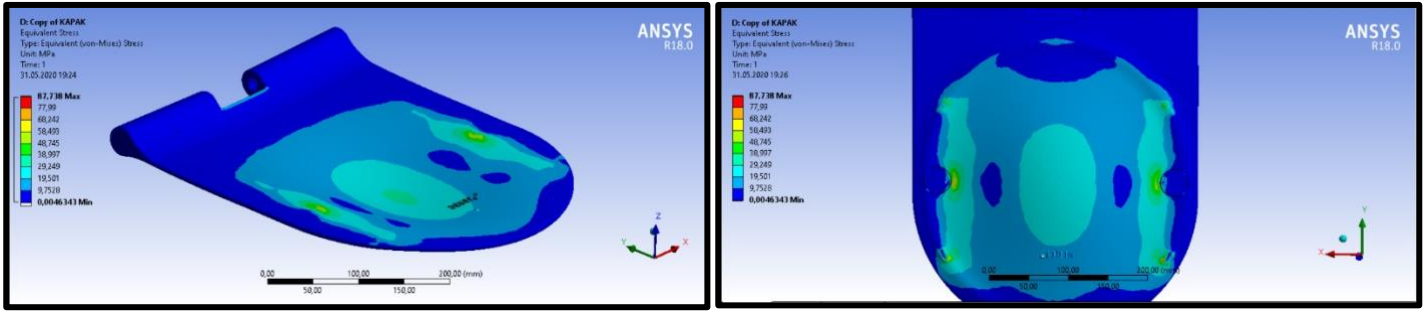
Şekil 3. 2 rezistansı kapalı konumda olan modelin kalıp içi sıcaklık ve heat flux dağılımı.

3.3. Son Ürün Mukavemet Analizleri

Kalıplama işleminin ardından ortaya çıkan son ürüne bazı standartlar kapsamında mukavemet testleri uygulanmaktadır. Mukavemet testlerine öngörü oluşturması ve SMC yöntemi ile slim klozet kapağının minimum incelik değerini belirleyebilmek açısından sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Mukavemet testleri klozet kapağı ve oturak kısmı olarak iki şekilde yapılmıştır. Her iki kısım için de ağ örgüsü (mesh) işlemi üzerine çalışılarak optimum eleman sayısı ile çözümü yakınsayacak modeller oluşturulmuştur. Analiz tanımlaması yapılırken Türk Standartları Enstitüsü TS 13694 nolu 'Klozet oturakları-Plastik' standardı baz alınmıştır. Bu standarda göre test edilmesi gereken kuvvet uygulanmış ve standardda belirlenen noktalardan ürün mesnetlenmiştir. Standard doğrultusunda kapağın geometrik orta noktasına 175 kg ağırlığında bir yük uygulanmış, kapağın altındaki noktalardan ve destek takozlarından sabitlenmiştir. Kuvvetin uygulandığı noktada maksimum 5,56 mm deformasyon oluşmuştur. Kuvvetin uygulanmasıyla sabit mesnetlenen noktalarda maksimum gerilme 87,73 MPa değerine ulaşmıştır. Klozet kapağının toplam deformasyon dağılımı Şekil 4, toplam gerilme dağılımı Şekil 5'te verilmiştir.

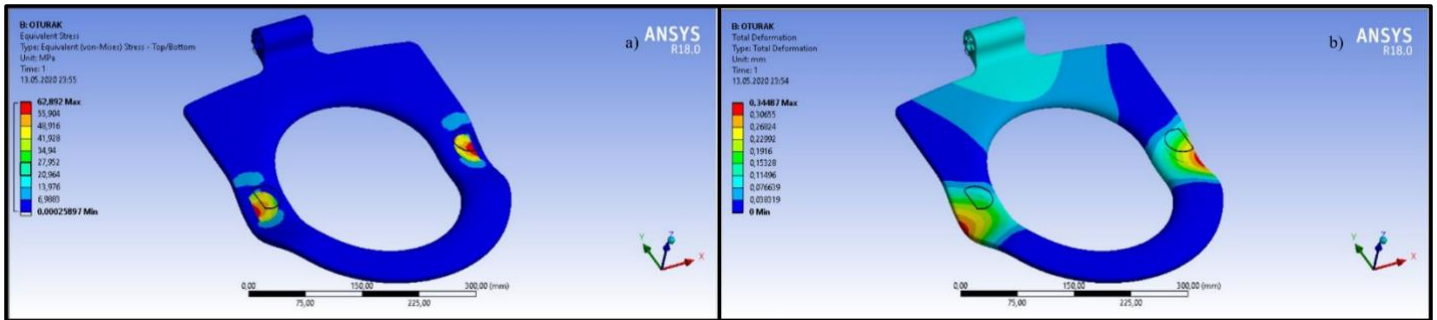


Şekil 4. Klozet kapağı toplam deformasyon dağılımı.



Şekil 5. Klozet kapağı toplam gerilme dağılımı.

Standard gereği oturağın belirtilen noktasına 150 kg ağırlığında bir yük uygulanmış ve oturağın altındaki noktalardan sabitlenmiştir. Kuvvetin uygulandığı noktada maksimum 0,34 mm deformasyon oluşmuştur. Sabit mesnetlenen noktalarda ise maksimum gerilme 62,89 Mpa değerine ulaşmıştır. Oturak kısmına uygulanan toplam deformasyon ve gerilme dağılımı Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Klozet oturağı için a) toplam gerilme; b) toplam deformasyon değerleri.

Standardın koşullarında yapılan analizler sonucunda kapak ve oturak ayrı ayrı incelenmiştir. Bunun sonucunda kapak üzerinde 87,73 Mpa olan maksimum gerilme ve 5,56 mm deformasyona neden olmuştur. Oturak üzerinde ise 62,8 Mpa olan maksimum gerilme 0,34 mm deformasyona yol açmıştır.

Yapılan ANSYS sonlu elemanlar analizlerinden sonra, toplam deformasyon ve toplam gerilme değerlerine karar verilmiştir. Bu değerler baz alınarak SMC presleme cihazının hidrolik ayarları optimize edilmiştir. Bu doğrultuda, pestil miktarı, pestile uygulanan basınç (bar), basınç uygulama süresi (sn) ve kalıbın alt üst termostat sıcaklığı değiştirilerek denemeler yapılmıştır. Yapılan optimizasyon çalışmaları Tablo 2'de gösterilmiştir. Yapılan denemeler neticesinde yüzeyi düzgün kapak; 240 sn boyunca 230 bar basınç altında; termostat üst sıcaklığı 145°C, alt termostat sıcaklığı 140 °C ayarlanarak elde edilmiştir. Tablo 2' de görüldüğü üzere, kalıba konulan pestilin en az 2 tabaka halinde konulması yüzey pürüzlülüğü açısından oldukça önemlidir.

Tablo 2. SMC presleme deneyleri.

Pestil miktarı (gr)	Toplam süre (sn)	Basınç (Bar)	Üst sıcaklık (°C)	Alt sıcaklık (°C)	Sonuç
2000	300	190	150	145	Yüzeyde yanma ve boşluk oluştu. Menteşe kısımlarında kopmalar oldu.
2000	300	190	145	150	Yüzeyde yanık yok fakat boşluklu görüntü devam ediyor.
2100	300	190	145	140	Pestil 2 kat olacak şekilde yerleştirildi, yüzeyde boşluk miktarı az.
2200	300	190	145	140	Pestil 3 kat yerleştirildi. Menteşe bölümünde kopma az fakat devam ediyor.
2200	300	220	145	140	Menteşe bölgesine 4, kapağın kalan kısmına 3 kat konuldu. Yüzeyler düzgün.
2200	240	230	145	140	Süre 1 dakika uzatıldı. Yüzey ve menteşe bölgesi düzgün.

4. Sonuç

Bu çalışma sırasında belirlenen hedefler, SMC kullanımı ile klozet kapaklarında yüksek mukavemet elde edilmesi ve ürün kesitinin mevcut ürünlere göre daha ince olmasıdır. Üretilen kapaklarda ürün kesiti 6 mm'nin altına indirilemezken SMC yöntemi ile 4 mm incelikte ürün elde edilmiştir. Üretilen klozet kapaklarının mukavemet değeri 93 Mpa iken SMC

yöntemiyle yapılan kompozit klozet kapağının mukavemeti 145 MPa olarak ölçülmüştür. Ayrıca üretim süresinin %31,25 oranında azaldığı da görülmektedir. Mevcut üreormaldehit esaslı kapak üretimi esnasında ortalama 3,8 kg hammadde de kullanılırken SMC esaslı kapak üretiminde hammadde miktarı 2.2 kg'dır. SMC yöntemiyle üretilen kapak için gerekli hammadde miktarı %42 oranında azalmıştır.

Referanslar

Bruderick M, Denton D, Shinedling M, Kiesel M. Applications of carbon fiber SMC for the dodge viper. Proc. Second S.P.E. Automot. Compos. Conf. Exhib. 2002; 1:1–10.

Feuillade V., Bergeret, A., Quantin, A., Crespy, J., C., Relationships Between the lass Fibre Sizing Composition and the Surface Quality of Shett Moulding Compounds (SMC) Body Panels: Composites Science and Tecnology, 66 115-127, (2006).

Green E. G. (2001). Fibre Reinforced Resin Composite Products. US Patent No. 6,242,090 B1.

Marissen, R., Linsen, J., Variability of thr Flexural Strenght of Sheet Moulding Componds: Composites Science and Technology, 59 2093-2100, (1999).

Narita M. (1995). Sheet molding compound. US patent No. 5,431,995.

Oldenbo M., Fernberg S. P., Berglund L. A., Mechanical Behaviour of SMC Composites with Toughening and Low Density Additives: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 875-885, (2003).

Pickering, S.J., Recycling Technologies for Thermoset Composite Materials-Currentb Status: Composites, Part A 37 1206-1215, (2006).

Trauth, A., Weidenmann, K., Continuous- Discontinuous Sheet Moulding Compounds-Effect of Hybridisation on Mechanical Material Properties: Composite Structures, 1087-1098 (2018).

Tröster, S., Henning, F., Eyerer, P., A New Process Tecnology for Cost Reduction of Large Scale Production of Fiber Reinforced Thermoplastic Components: 15th Annual Technical Conference of the American Society of Composires Collage Station, Texas, USA, 689-698.

Voorn, B.V., Smith, H.H.G., Sinke, R.J., Klerk B D., Natural Fibre Reinforced Sheet Moulding Compound, Composites, Part A 32 1271-1279, (2001).

Watanabe T., Yasuda M., Fracture Behaviour of Sheet Moulding compounds Part 1. Under Tensile Load: Composites, 13:54 (1982).



Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen Tasarımı, İncelenmesi ve Prototip Üretimi

Atabey Multifunctional Flash Hider Design, Investigation and Prototype Production

Halil Özasan¹ , Mustafa Bozdemir² 

¹ Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı, 71100, Kırıkkale, TÜRKİYE

² Kırıkkale Üniversitesi, KMYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 71100, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 10/03/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Ateşli silahların bir kullanıcı tarafından ateşlenmesiyle namlu ucunda yüksek görünümü alevler oluşur. Ateşli silahların özellikle gece kullanımlarında yüksek alev görünümünün ciddi zararları vardır. Oluşan alevler, kullanıcın gözlerini kör edebilir ve düşman kuvvetler tarafından kullanıcının konumunun açık edilmesine neden olurlar. Başlıca bu ve diğer nedenlerden dolayı ateşli silahların namlu ucuna takılan cihazlar geliştirilmiştir. Namlu ucu cihazlarından en yaygın olarak kullanılanları ise namlu frenleri, susturucular ve alev gizleyenlerdir. Yapılan çalışma da özellikle gece kullanımlarında kullanıcının gece görüşünü artırıp, konumunu gizlemek için ve içerisinde özel fonksiyonlarda bulunan Atabey Alev Gizleyen modeli tasarlanıp detaylı incelemesi ile iç akış analizleri yapılarak prototipi üretilmiştir. Sonrasında model prototipi 3d yazıcıda imal edilmiştir. Geleneksel tasarım yöntemi kullanılarak 7.62 mm kalibrelerde kullanılmak üzere özel yapı ve fonksiyonları bulunan Atabey Alev Gizleyen modeli SolidWorks ile tasarlanarak SolidFlow ile iç hava akış analizleri yapılmıştır. Tasarlanan modelin detaylı incelemesi yapılarak üç boyutlu yazıcı ile prototipi imal edilmiştir. Yapılan analizler neticesinde Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen ile namlu patlaması sonrasında oluşan alev görünümü en fazla minimize edilerek kullanıcının, gece görüşü artırılır ve konumu gizlenir. Özel tasarımı ile telleri kesebilir, kesici ve delici yapısı ile düşman kuvvetlere karşı birebir müdafaa da kullanılabilir. Eklenen özel fonksiyonlar ile alanında eşsiz bir alev gizleyen olmuştur.

Anahtar Kelimeler

“Namlu Cihazları, Alev Gizleyen, Susturucu, Namlu Freni”

Abstract

When firearms are fired by a user, high-looking flames are formed at the muzzle end. High flame appearances have serious harms, especially in night use of firearms. The resulting flames can blind the user and cause enemy forces to reveal the user's position. For these and other reasons, devices attached to the muzzle of firearms have been developed. The most commonly used muzzle devices are muzzle brakes, silencers, and flame suppressors. In the study, the Atabey Flash Hider model, which has special functions in order to increase the night vision of the user and hide his position, especially during night use, was designed and a prototype was produced by making detailed examination and internal flow analysis. Afterwards, the model prototype was manufactured in a 3d printer. Using the traditional design method, the Atabey Flash Hider model, which has a special structure and functions to be used in 7.62 mm calibers, was designed with SolidWorks and internal air flow analyzes were made with SolidFlow. A detailed examination of the designed model was made and a prototype was produced with a three-dimensional printer. As a result of the analyzes made, Atabey Multi-Function Flash Hider minimizes the flame appearance after the barrel explosion, increasing the night vision of the user and hiding his position. It can cut wires with its special design, and it can also be used for one-on-one defense against enemy forces with its cutting and piercing structure. With the added special functions, it has been hiding a unique flame in its field.

Key Words

“Muzzle Devices, Flash Hider, Silencer, Muzzle Brake”

1.Giriş

Devletimizin farklı devletlere özellikle savunma sanayisinde olan bağımlılığı büyük oranda azalmıştır. Elektrik, su ve buhar gibi kuvvetlerin değerlendirilmesi ile beraber başlayan teknolojik gelişmeler, son zamanlarda önemli ölçülerde üretimler ve imalatlar yapılmasına olanak sağlamıştır. Ulaşım, sağlık ve makine gibi sektörlerine ek olarak savunma sanayi sektörü de bu teknolojik gelişmelerden önemli ölçüde üzerine düşeni almıştır. Mühimmat, robot, silah, ve insansız araçlar savunma sanayinin başlıca konuları olarak adlandırılmaktadır. Devletlerin savunma alanında yaptığı çalışmalar, günümüz koşullarında ülkelerin ana fonksiyonu olarak kabul edilmesi öngörülmektedir. Devletlerin savunma sanayi konularında yapmış oldukları projeler, devletlerin kalkınmalarının devamlılığı ve devletlerin kaynaklarının gerçek alanında değerlendirilmesinin devlet güvenliğine olan önemli etkileri ile başı çekmektedirler. Gelişen insanlı ve insansız teknoloji ile birlikte silah sistemlerinde de olumlu yönde ciddi gelişmeler olmaktadır (Savunma Sanayii Müsteşarlığı, 2011).

Devletlerin kendi olanakları ile üretmedikleri savunma sanayi malzemelerini ve ürünlerini farklı devletlerden temin etmek istemektedirler. Bu durumlar ile talepte bulunan devletler hem kendi ülke ekonomilerine ciddi derece de büyük para kayıplarına neden olurlar hem de bu talep ile talep edilen devlete mecbur olarak bağımlı hale gelirler. Böylesi durumlarsa ister istemez diğer devletin olası yaptırımları ve anormal istekleri kaçınılmaz olmaktadır. Devletlerini, diğer ülkelere bağımlı hale getirip onların hem ekonomik olarak hem de siyasal olarak daha güçlü olmasını isteyen araştırmacılara önemli ölçüde görevler düşmektedir (Deng ve ark., 2012).

Özellikle son zamanlarda tasarımları orijinal olan ve mühendislik çalışmalarına sahip olunan malzeme ve parçaları artırma aşamasına geçilmiş, milli ve yerli projeler sistemin içine dahil edilmiştir. Bilahare son zamanlarda imalat doneleri, analiz ve tasarım bilgileri ile gerekli donelere sahip olunmasıyla birlikte kendimize özel ürünler ortaya çıkacak, mühendislik çalışmalarına ve savunma sanayine gerçek destekler işte o zaman yapılabilir (Gündüzer, 2011).

Devletimizin savunma politikası olarak özellikle son yıllarda Türk Silahlı Kuvvetleri'nin gerekli ihtiyacı olan araç, gereci mühimmat ve silahların projelerini yerli ve milli projelerde geliştirerek hazırlayan ve sonrasında da imal etme çabası üzerinde bilahare önemle durulan ana konuların başında gelmektedir (Ozturk, 1984).

Çinliler tarafından icat edilen barutun kullanılmaya başlanmasıyla birlikte gerçekleşen namlu patlamasıyla oluşan alev görünümü ve duman problemi kullanıcılarda sıkıntılara yol açmıştır. Kullanıcı tarafından ateşli silahın ateşlenmesi kara barutun yanmasına neden olur. Sonrasında ise bu yanmaya alev parlamaları, kıvılcıklar ve hem kullanıcıyı hem de hedefi esir alan beyaz dumanlar eşlik eder. Bu problemler kişileri ve devletleri bir çözüm aramaya itmiştir. İlk zamanlar da Almanya bu konunun üzerine gidip bir alev gizleyen tasarlayıp otomatik silahlarda kullanan ilk devletlerden olmuştur (Brown, 2013).

Farklı ve daha kısa namlulu silahların sisteme dahil edilmesiyle namlu patlaması sonrasında oluşan yüksek alev görünümü özellikle gece kullanımlarında kullanıcıya ciddi sorunlar yaratmıştır. Bu sorunların başlıcalarını ateşli silahın ateşlenmesiyle namluda oluşan yüksek alev görünümünün kullanıcıyı özellikle gece rahatsız ederek kör olmasına ve düşman kuvvetler tarafından konumunun açık hale gelmesi çeker (Perkins, 1958).

Namlu ucu cihazı olan alev gizleyenler, özellikle II. Dünya Savaşı'nın sonlarında ve daha sonrasında saldırı tüfeği tasarımlarında yaygınlaşmıştır ve bugün tabiri caizse tüm saldırı tüfeklerinde kullanılan evrensel bir duruma gelmiştir (Rottman, 2011).

Alev gizleyenler farklı isimler ile de adlandırılmaktadır. Bunların başlıcaları, alev konisi, alev koruması ve alev eliminatördür. Bu namlu ucu cihazları ateşli silahın ateşlenmesi ile oluşan alev topunu minimize etmek için özel olarak tasarlanmışlardır (Di Maio, 1999).

Namlu ucuna takılan alev gizleyenler kullanıcılar için ciddi avantajlar sağlamaktadır. Namlu patlamasıyla oluşan yüksek görünümü alevin absorbe edilerek kullanıcının özellikle gece operasyonlarında kullanıcıya üstün gece görüşü sağlamanın yanında düşman kuvvetlere konumunu açık etmeyerek bir üstünlük daha sağlar. Eklenen özel fonksiyonlar ile tel kesme, kapı kırma, namlu frenlemesi gibi üstünlüklerde sağlar. Ekstra sağlamış olduğu ağırlık ve düşme, çarpma gibi etkilerle zarar görmesi ise dezavantajlarından (Army Material Command, 1968).

Namlu frenleri ile alev gizleyenler genellikle karıştırılmaktadırlar. Her ikisi de aynı yere monte edilirler. Fakat zaman zaman her ikisi de birbirinden çok farklıdır. Alev gizleyenler namlu patlamasıyla oluşan alev görünümünü absorbe ederken, namlu freni ise namlu patlaması sonrasında oluşan yüksek geri tepmeyi azaltmaktadır. Alev gizleyenler gibi alevleri absorbe etmek yerine daha fazla alev neden olurlar (Petzl, 1994).

Yapılan araştırmalar ve incelenen çalışmalar neticesinde, İkinci Dünya Savaşı'ndan bu yana alev gizleyenler üzerinde çok ilerleme kaydedilmiştir. Bastırıcı olarak katkı maddelerinin yanı sıra, namlu ağız frenleri ve patlama reflektörlerinin alev üzerinde bir miktar etkisi olduğu ortaya çıkmıştır. Bu gözlem, namlu ağızının patlaması ve parlamasının mekanizmasını öğrenmeye yönelik organize girişimlere yol açmıştır. Bugüne kadar önemli miktarda veri toplanıp, çeşitli derecelerde başarı ile çeşitli tasarımlarda mekanik alev gizleyiciler ve alev baskılayıcılar geliştirilmiştir. Bununla birlikte, mekanik veya kimyasal olarak verimli, pratik bir alev gizleyen elde etmek için hala çok fazla ilerlemeye ihtiyaç vardır (Nixon, 2009), (Mark ve ark., 1990).

Bu çalışmalar kapsamında yerli ve milli piyade tüfeği MPT-76' ya göre namlu patlaması sonrasında ortaya çıkan alev görüntüsünü minimize eden, çok fonksiyonlu ve geliştirilmiş Atabey Alev Gizleyen modeli tasarımı bilgisayar destekli tasarım programlarından

SolidWorks kullanılarak tasarlanmış, detaylı inceleme yapılmış, iç akış analizi SolidFlow ile yapılarak hazırlanan optimum modelin, üç boyutlu yazıcı Zortrax firmasının ürettiği M200 modeli ile prototipi imal edilmiştir.

2. Materyal ve Metol

Yapılan çalışmada yerli ve milli piyade tüfeği MPT-76'ya göre namlu patlaması sonrasında ortaya çıkan alev görüntüsünü minimize eden, çok fonksiyonlu ve geliştirilmiş alev gizleyen tasarımı yapılmıştır. Alev gizleyen malzemesi, dayanıklı olması için gerçekte üretileceği zaman titanyumdan olması ve malzemesinin üzerine bir kaplama yapılarak alev gizleyeni korozyona, aşınmaya ve ısıya karşı çok daha iyi korunur hale getirileceği öngörülmüştür. MPT-76 namlusuna uyacak şekilde tasarlanan alev gizleyen, namlu patlaması sonucu oluşan alev görünümünü minimize eden içerisinde yeterli odacıkları barındıran ölçülerde tasarlanmıştır. Modellenen alev gizleyen tasarımı ile ateşli silah kullanıcısının, ateşli silahını ateşlemesi neticesinde oluşan namlu patlamasıyla özellikle gece kullanımlarında kullanıcının gözlerinin kör olmasını engelleyerek, gece görüşünü artırması ve özellikle gece kullanımlarında ateşli silah kullanıcısının konumunu gizleyerek düşman kuvvetler tarafından bulunmasını zorlaştırmıştır. MPT-76'ya göre özel olarak tasarlanan Atabey Alev Gizleyen modelinin iki temel özelliğinin yanında fonksiyonel özellikleri de bulunmaktadır. Yapılan özel tasarımlar ile alev gizleyen aynı zamanda namlu freni özelliği de taşımaktadır. Alev gizleyene eklenen namlu freni özelliği ile ateşli silah kullanıcısının ateşli silahı ateşlemesiyle oluşan namlu patlaması sonucu alev görüntüsünü absorbe etmesinin yanında sarsılmayı ve geri tepmeyi azaltarak atıcının hem silaha daha kolay ve rahat hâkim olmasını sağlamıştır hem de sarsılmayı azaltması sonucu hedef doğruluğunu artırarak, vurulmak istenen hedefin doğruluğunu artırmıştır. Tasarlanan alev gizleyen modellerinin bir diğerine temel iki özelliğinin yanına eklenen diğer özel fonksiyon ise tel kesme aparatıdır. Alev gizleyen ucuna eklenen dört adet tırnağın hizalanması neticesinde ateş yapılarak teller kesilir. Eklenen tırnaklar tel kesmenin yanında alev görünümünü minimize etmeye de yardımcı olmaktadır. Tasarlanan alev gizleyen modelinin bir diğer fonksiyonel özelliği ise üzerinde bulunan kesici ve delici dikenli yapılarıdır. Yapılan özel tasarım ile olası birebir müdafaa ve saldırı gerektiren anlarda atıcının hiç vakit kaybetmeden düşman kuvvetlere bu kesici ve delici yapı ile saldırıp yok etmesi tasarlanmıştır. MPT-76'ya göre özel olarak tasarlanan alev gizleyeni silahın namlu ucuna takmak için en etkili, sağlam ve kolay olan ezme rondelâları kullanılmıştır. Böylece alev gizleyen çok daha kolay ve sağlam bir şekilde ateşli silah namlusuna takılır (Army Material Command, 1968), (Ali H., Tuncer D., 2010).



Şekil 2.1. MPT-76 da Kullanılan Alev Gizleyen (Anonim, 2022)

Yapılan tasarımda, geleneksel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Bilgisayar Destekli Tasarım programlarından Solidworks ile alev gizleyen modellemesi yapılmış ve SolidFlow ile de akış hesaplamaları yapılmıştır. Solidworks de yapılan katı model, akış hesaplamaları ve fonksiyonel özelliklerin değerlendirilmesi sonucu hazırlanan optimum modelin imalatı için üç boyutlu yazıcı Zortrax firmasının ürettiği M200 modeli kullanılmıştır. Üç boyutlu yazıcı malzemesi olarak da Z-Ultrat kullanılmıştır (Ay, 2018), (Ay ve Bozdemir, 2018).

Üç boyutlu yazıcılar, üç eksenli bir alanda seçilen parça malzemesi ile katmanlar olarak üst üste yerleştirilerek birçok parçalar üretirler. Üç boyutlu yazıcılar ile mühendislikten eğitime, sanattan tıp alanı gibi birçok farklı dalda kullanılan yeni bir teknolojidir. Bilahere üç boyutlu yazıcılar son zamanlarda çok popüler hale gelmiştir. Dünyayı değiştirecek teknoloji olarak adlandırılmaktadırlar ve çok büyük beklentileri beraberinde getirmektedir. Üç boyutlu yazıcılar ile istenilen parçalar çok ucuz ve çok hızlı bir şekilde imal edilmesi bir çok kişinin işine gelmektedir (Barnatt, 2016), (Micallef, 2015), (Evans, 2012), (Noorani, 2017).

2.1. Alev Gizleyenin SolidWorks ile Katı Modellemesi

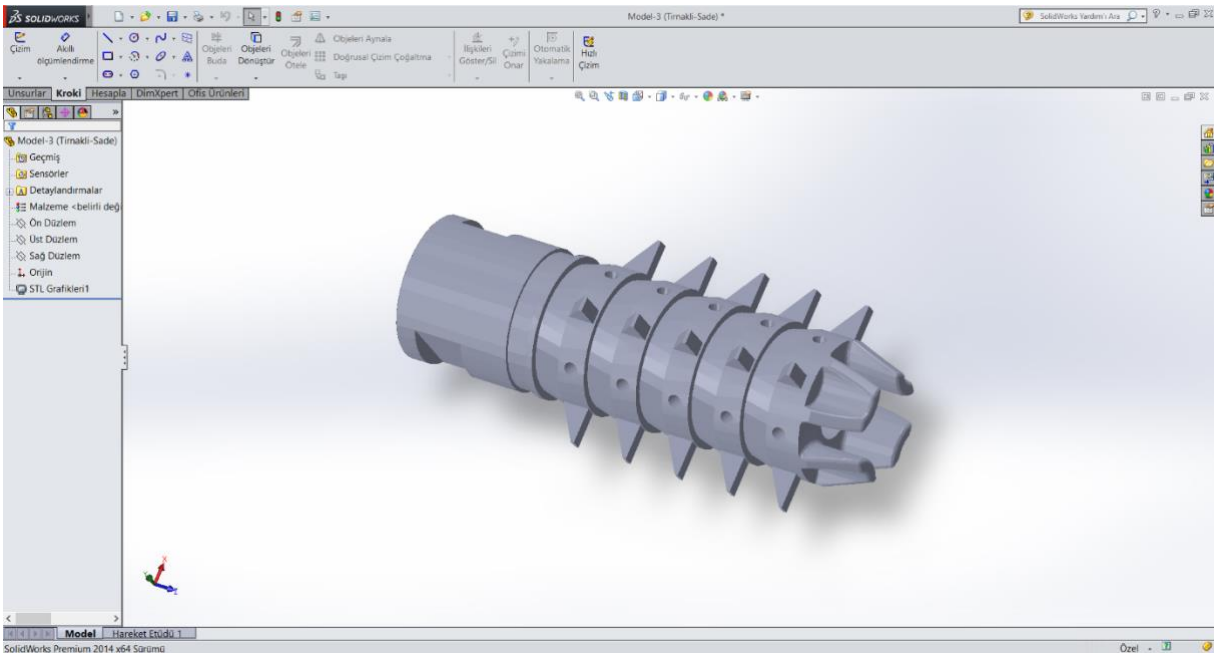
Kendine has yapı, fonksiyon ve tasarım özellikleri taşıyan Atabey Alev Gizleyen modeli tasarlanmıştır. Atabey Alev Gizleyen modelinin malzemesinde titanyum kullanılması öngörülmüştür. Kendine has tasarımı ve çok fonksiyonlu olması planlanmıştır. Tasarlanan alev gizleyen modeli gerçeği ile birebir aynı ölçüleri taşımaktadır. Alev gizlenin namluya takılan dış geçiş bölümü ve alevi absorbe eden bölümü vardır. Tasarlanan alev gizleyeninin içerisinden geçen akışın hesaplanması yapılarak detaylı incelenmesi yapılmıştır. Bu işlem için SolidFlow programı kullanılmıştır. Tasarlanan alev gizleyeninin çizimi, katı modellemesi ve akış testi

SolidWorks programında yapılmıştır. Tasarlanıp, katı modellemesi yapılan alev gizleyen tek parçadır. Tasarlanan alev gizleyen modeli 7,62 kalibre de MPT-76 piyade tüfeğine kolaylıkla monte ve demonte edilebilmektedir.

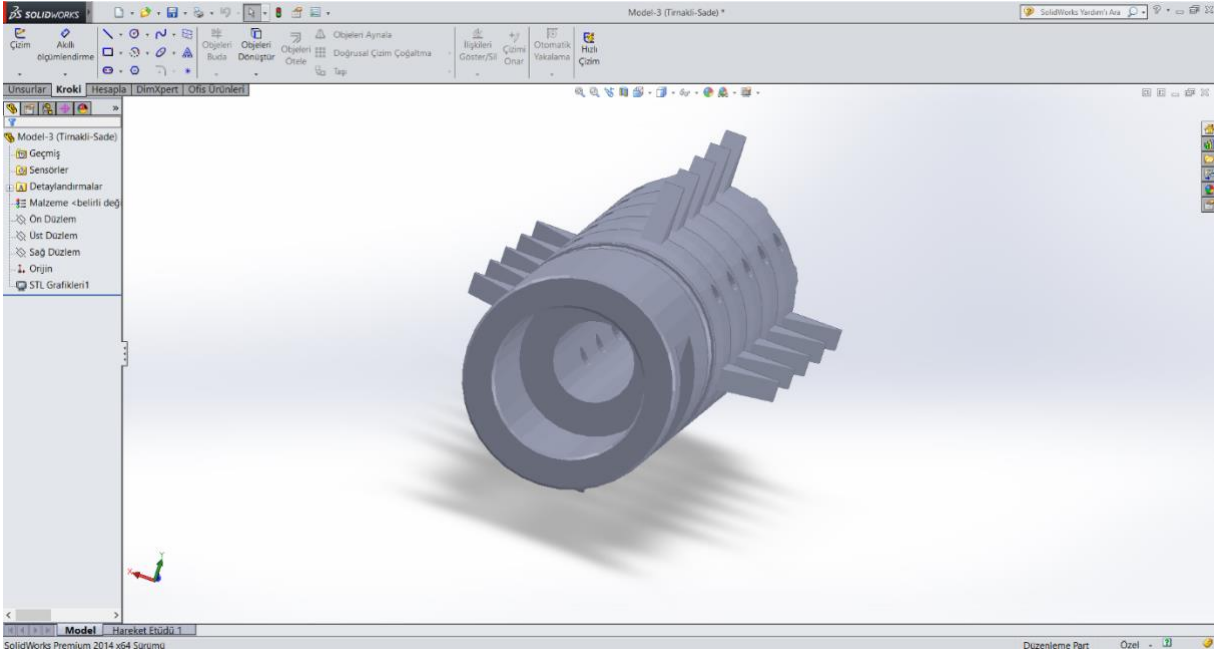
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen Katı Modeli

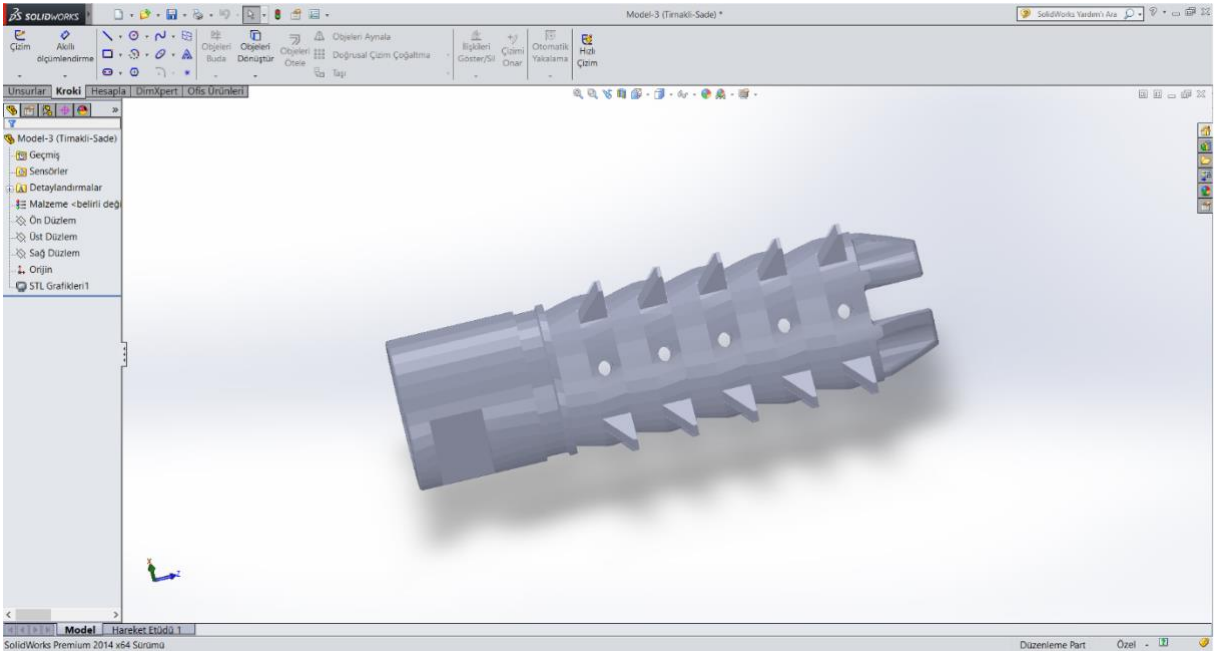
Şekil 3.1. de gösterilen SolidWorks programında tasarlanıp katı modellemesi yapılan Atabey Alev Gizleyen modeli, gerçekte titanyum malzemeden yapılması öngörülmüştür. 7.62 Nato mermisinin kullanılabileceği bir tasarım modellemesi yapılmıştır. Milli piyade tüfeği MPT-76'nın kullanıcı tarafından ateşlenmesiyle oluşan namlu patlamasıyla meydana gelen yüksek alev görünümü, Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modelinin üzerinde bulunan dairesel deliklerden ve dört tırnağın absorbe etmesiyle minimize olarak çıkar. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen üzerinde bulunan delikler ve ucundaki tırnaklar ile yüksek basınç düşürülür ve yüksek sıcaklıktaki alevler ise çok hızlı bir şekilde soğutulur. Yapılan özel tasarım modellemesi ile namlu patlamasıyla oluşan geri tepme kuvveti azalır. Böylece MPT-76 kullanıcısı özellikle gece kullanımlarında namlu patlaması sonrasında oluşan yüksek görünümlü alevlerden kurtularak kör olma riskinden kurtulmuştur ve gece görüşü artmıştır. Ayrıca gece operasyonlarında kullanıldığı takdirde düşman kuvvetler tarafından Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen sayesinde konumunun belirlenmesi daha zor hale gelmiştir. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modelinin sunmuş olduğu bir diğer fonksiyon da ise namlu ucunda bulunan dört adet tırnağın telleri hizalayıp, piyade tüfeğinin ateşlenmesi ile çok kolay bir şekilde teller kesilir. Bu özellik ile çok kolay ve hızlı bir şekilde tel kesme işlemleri de tamamlanmış olur. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modeli üzerinde bulunan kesici ve delici dikenli yapılar ile olası mühimmat bitmesi veya ani bir düşman kuvvet ile birebir de müdafaa veya saldırı durumunda kullanıcının kendini kollayıp düşman kuvvete zarar vermesini sağlar. Bu şekilde kullanıcı çok hızlı bir şekilde reaksiyon vererek kendisini korumaya ve saldırıya hazır halde bulur. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modeli gerçekte titanyum malzemeden yapılması öngörülmüştür. Yüksek sıcaklık ve basınçlara karşı çok dayanıklıdır. Kaplama gerektirmez. MPT-76'ya ezme rondelâları ile takılmak üzere dişi namlu bağlantı noktasına sahiptir. Hizalama gerektirmez. Ezme rondelâları ile kolay monte ve demonte edilebilir.



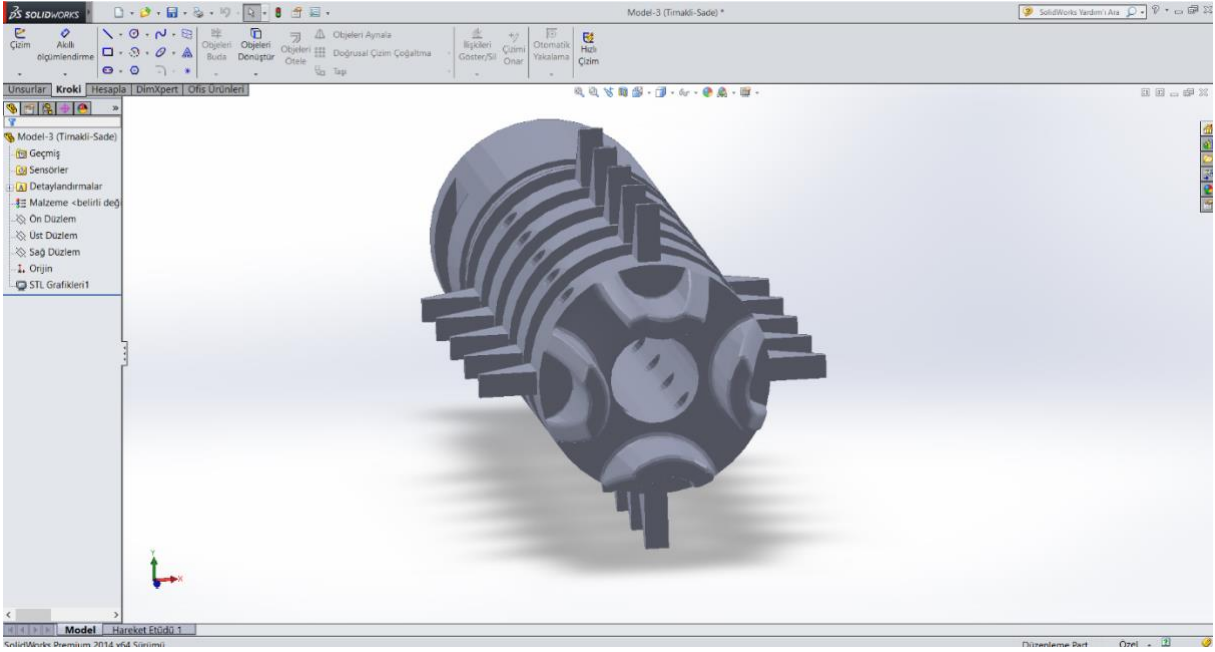
Şekil 3.1. Atabey çok fonksiyonlu alev gizleyen katı modeli



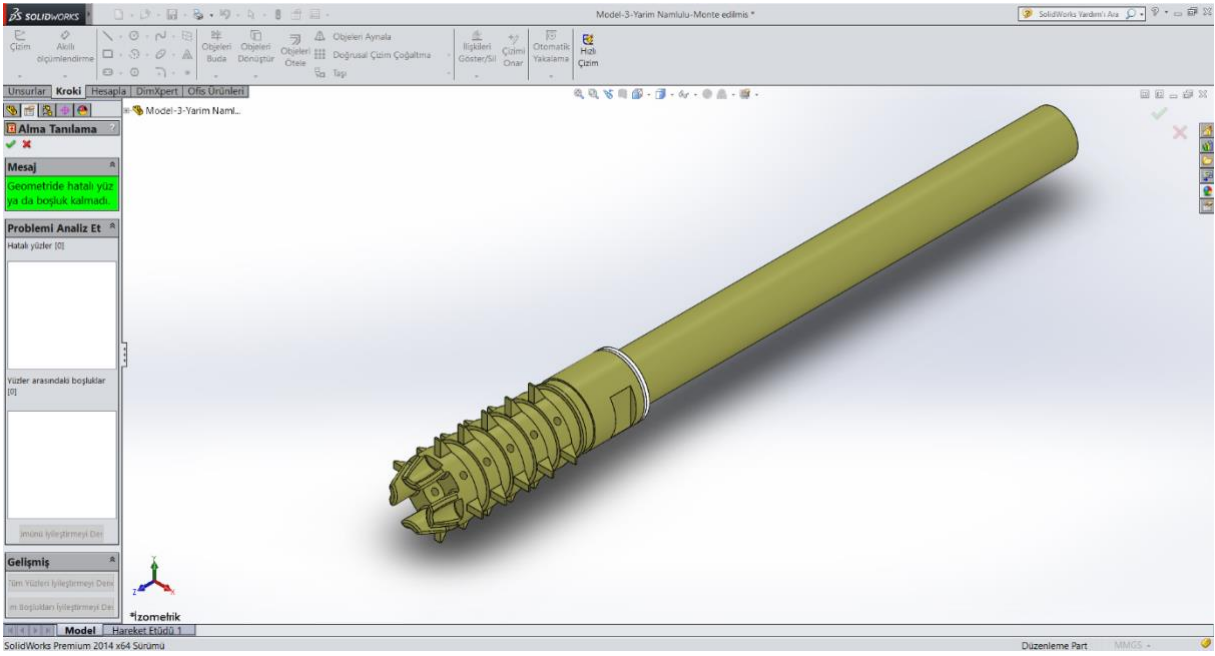
Şekil 3.2. Atabey çok fonksiyonlu alev gizleyen katı modeli



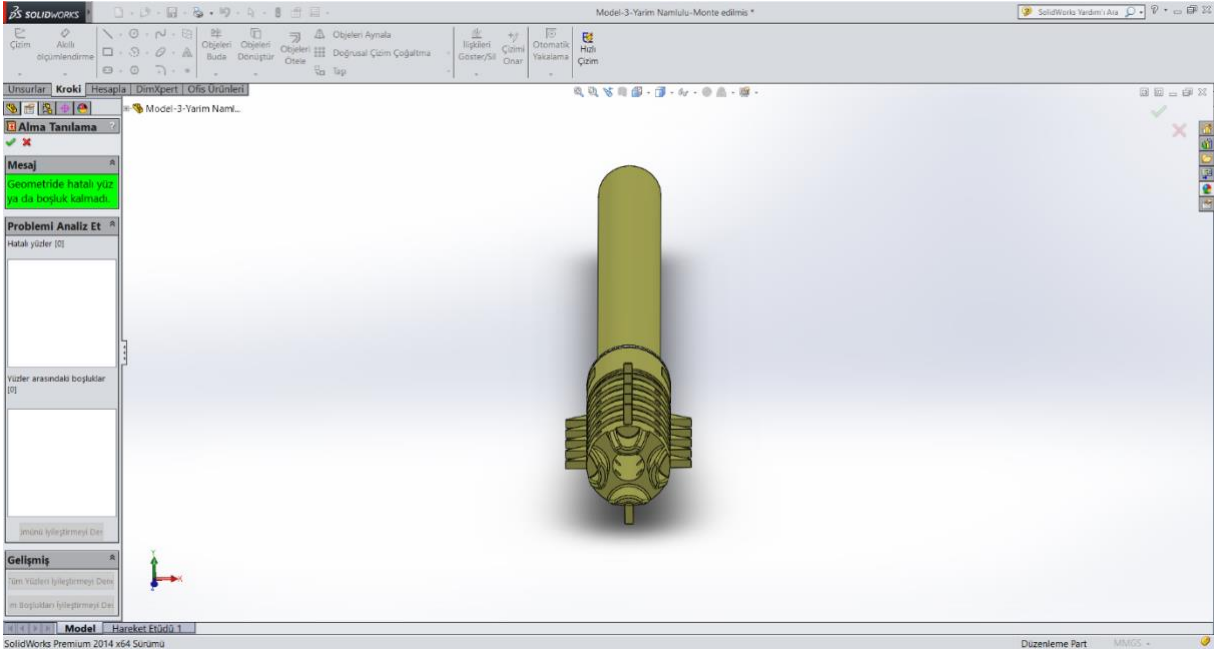
Şekil 3.3. Atabey çok fonksiyonlu alev gizleyen katı modeli



Şekil 3.4. Atabey çok fonksiyonlu alev gizleyen katı modeli



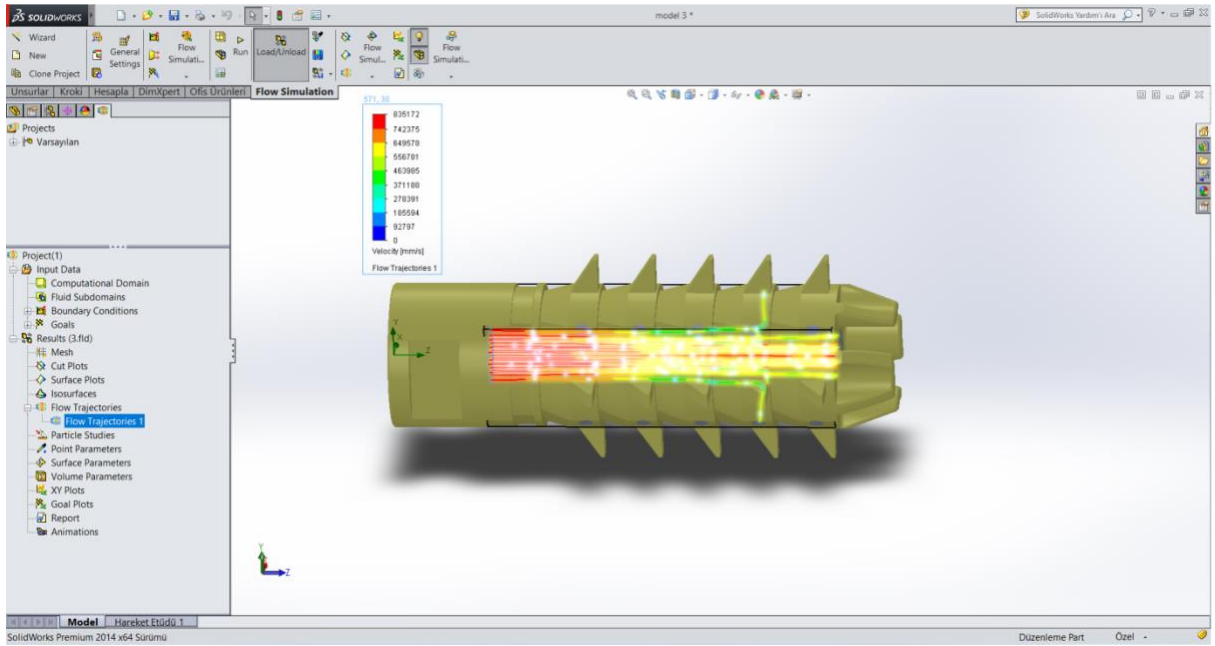
Şekil 3.5. Atabey çok fonksiyonlu alev gizleyen katı modelinin namluya ezme rondelası ile montajlanmış hali



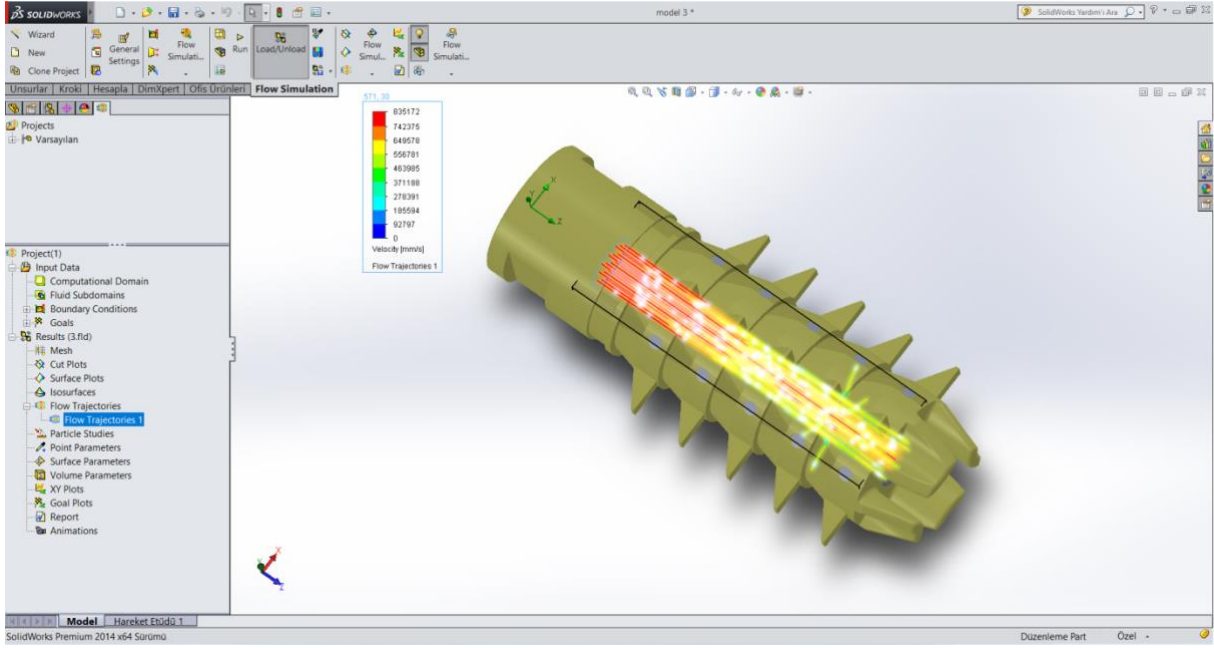
Şekil 3.6 Atabey çok fonksiyonlu alev gizleyen katı modelinin namluya ezme rondelası ile montajlanmış hali

3.2. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyenin SolidFlow ile Akış Analizi

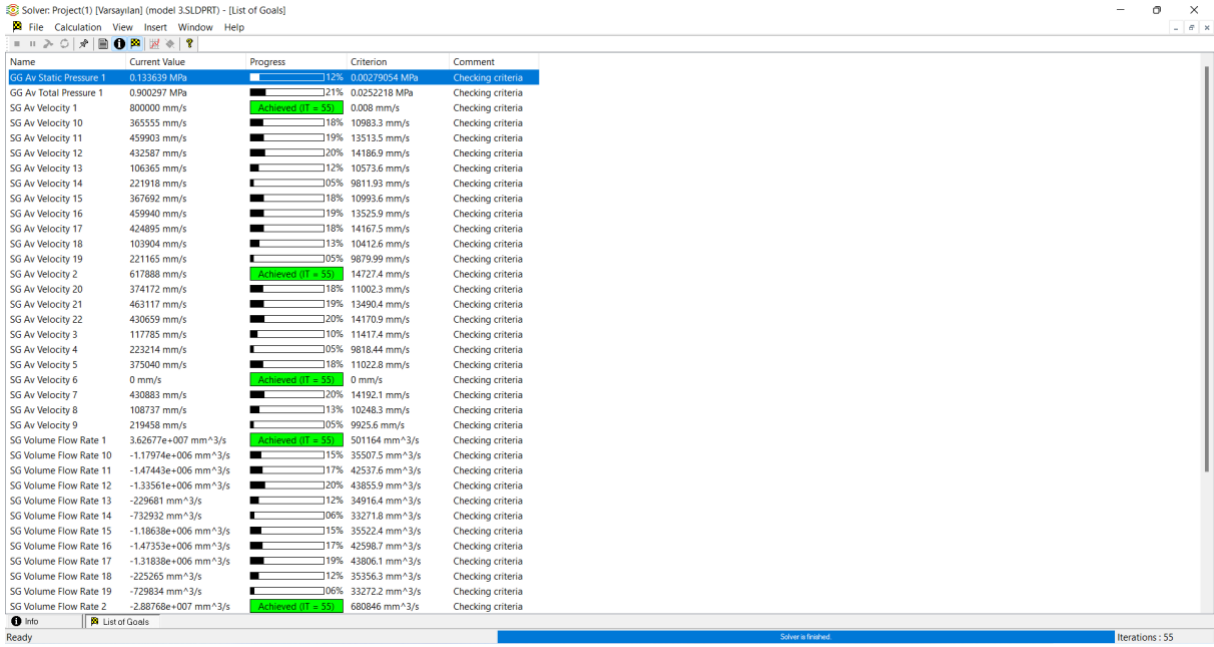
Tasarlanan üç modelin SolidFlow programı ile iç akış analizleri hesaplanmıştır. Aşağıdaki resimlerde ifade edilmektedir;



Şekil 3.7. Atabey Alev Gizleyen Modelinin Akış Analizi



Şekil 3.8. Atabey Alev Gizleyen Modelinin Akış Analizi



Şekil 3.9. Atabey Alev Gizleyen Modelinin Akış Analizi

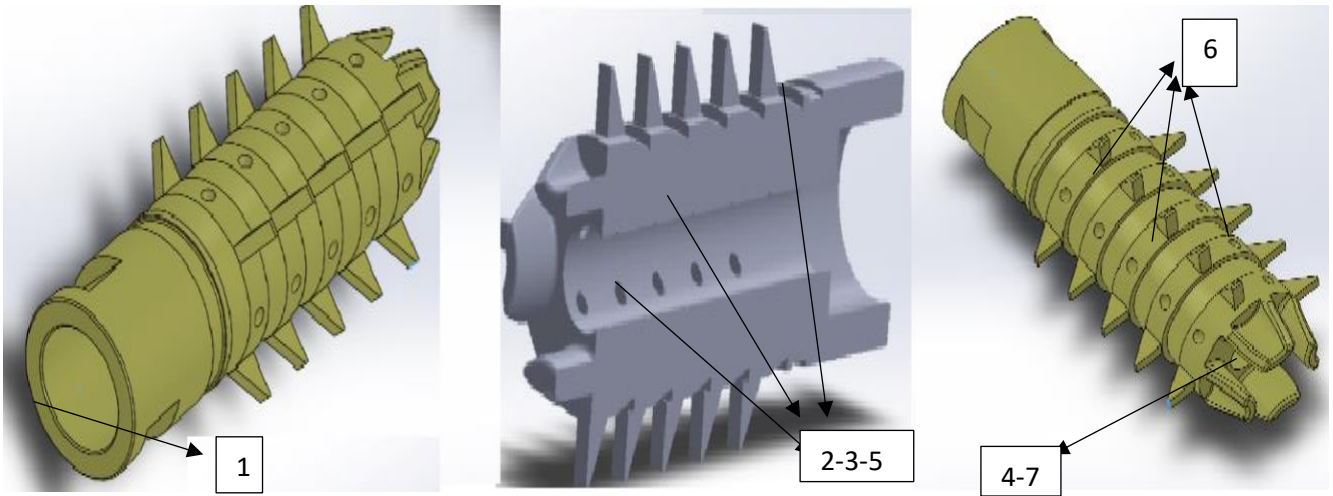
Name	Current Value	Progress	Criterion	Comment
SG Av Velocity 18	103904 mm/s	13%	10412.6 mm/s	Checking criteria
SG Av Velocity 19	221165 mm/s	05%	9879.99 mm/s	Checking criteria
SG Av Velocity 2	617888 mm/s	Achieved (100%)	14727.4 mm/s	Checking criteria
SG Av Velocity 20	374172 mm/s	16%	11002.3 mm/s	Checking criteria
SG Av Velocity 21	463117 mm/s	19%	13490.4 mm/s	Checking criteria
SG Av Velocity 22	430659 mm/s	20%	14170.9 mm/s	Checking criteria
SG Av Velocity 3	117785 mm/s	10%	11417.4 mm/s	Checking criteria
SG Av Velocity 4	223214 mm/s	05%	9818.44 mm/s	Checking criteria
SG Av Velocity 5	375040 mm/s	18%	11022.8 mm/s	Checking criteria
SG Av Velocity 6	0 mm/s	Achieved (100%)	0 mm/s	Checking criteria
SG Av Velocity 7	430883 mm/s	20%	14192.1 mm/s	Checking criteria
SG Av Velocity 8	108737 mm/s	13%	10248.3 mm/s	Checking criteria
SG Av Velocity 9	219458 mm/s	05%	9925.6 mm/s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 1	3.62677e+007 mm ³ /s	Achieved (100%)	501164 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 10	-1.17974e+006 mm ³ /s	15%	35507.5 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 11	-1.47443e+006 mm ³ /s	17%	42537.6 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 12	-1.33561e+006 mm ³ /s	20%	43855.9 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 13	-229681 mm ³ /s	12%	34916.4 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 14	-732932 mm ³ /s	06%	33271.8 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 15	-1.18638e+006 mm ³ /s	15%	35522.4 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 16	-1.47353e+006 mm ³ /s	17%	42598.7 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 17	-1.31838e+006 mm ³ /s	19%	43806.1 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 18	-225265 mm ³ /s	12%	35356.3 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 19	-729834 mm ³ /s	06%	33272.2 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 2	-2.88768e+007 mm ³ /s	Achieved (100%)	680846 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 20	-1.20911e+006 mm ³ /s	15%	35496.9 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 21	-1.482e+006 mm ³ /s	17%	42551.9 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 22	-1.33164e+006 mm ³ /s	20%	43801.9 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 3	-219568 mm ³ /s	11%	37594.1 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 4	-733881 mm ³ /s	06%	33272.6 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 5	-1.22104e+006 mm ³ /s	15%	35557 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 6	0 mm ³ /s	Invalid	10 mm ³ /s	
SG Volume Flow Rate 7	-1.332e+006 mm ³ /s	20%	43884.3 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 8	-231090 mm ³ /s	12%	35442.7 mm ³ /s	Checking criteria
SG Volume Flow Rate 9	-725344 mm ³ /s	06%	33272.2 mm ³ /s	Checking criteria

Şekil 3.10. Atabey Alev Gizleyen Modelinin Akış Analizi

Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modelinin akış analizi SolidFlow programında yapılmıştır. Atabey Alev Gizleyen modelinin malzemesi titanyum seçilmiştir. 1 atm basınç, 20,05 derece santigrat hava koşulları kullanılarak ve namludan 800 m/sn mermi çıkış hızı verilerek analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. 800 m/sn hız ile giren hava yan kanallardan ve mermi çıkış noktasından çeşitli hız ve debilerde tahliye edilmektedir. Detaylı veriler Şekil 3.7., Şekil 3.8., Şekil 3.9. ve Şekil 3.10. da gösterilmektedir.

3.3. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen Modelinin İncelenmesi

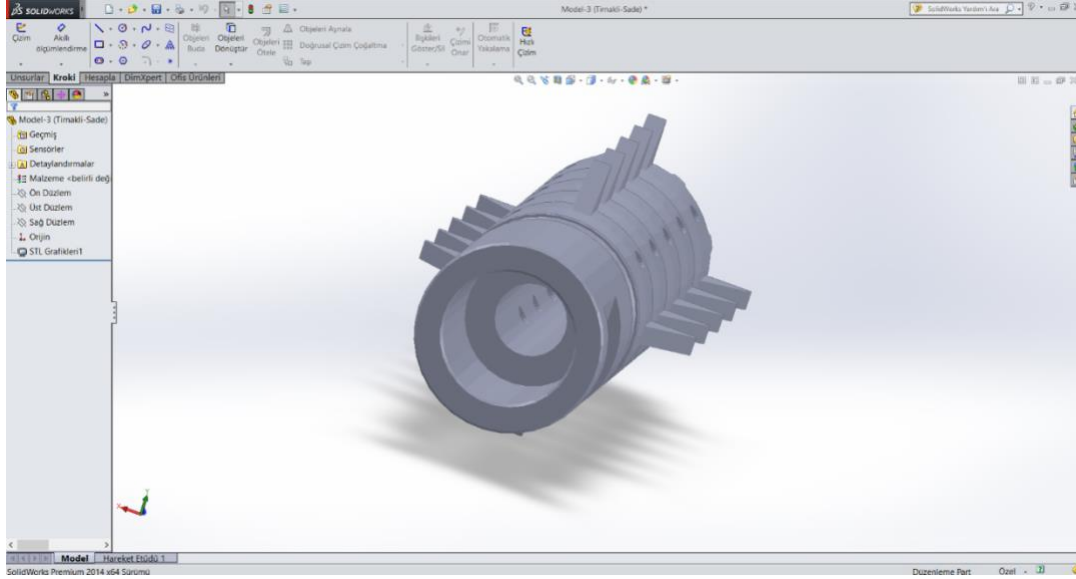
Milli ve yerli piyade tüföğü MPT-76' ya göre tasarlanarak katı modellemesi yapılan Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen tasarlanmıştır. Yapılan modellemenin malzeme cinsine, fonksiyonlarına, tasarımlarına ve akış hesaplarına bakılarak optimum model elde edilmiştir. Bu tercih sonunda gerçekte malzeme bakımından uygulanması öngörülen, en dayanıklı olan ve kaplama gerektirmeyen titanyum malzemesinin seçilmesi öngörülmüştür. MPT-76' nın kullanıcı tarafından ateşlenmesiyle oluşan alev görüntüsünü özel tasarımı ile en iyi absorbe ederek dışarı çıkan ışığı minimize ederek kullanıcının konumunu gizleyen ve gece kullanımlarında kullanıcının gözlerini kör etmesini engellerek, gece görüşünü artıran, bu ana özelliklerinin yanında tel kesme ile kesici ve delici yapı özelliklerini barındıran Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modellemesi uygun görülmüştür.



Şekil 3.11. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen Katı Modelinin Yapısı

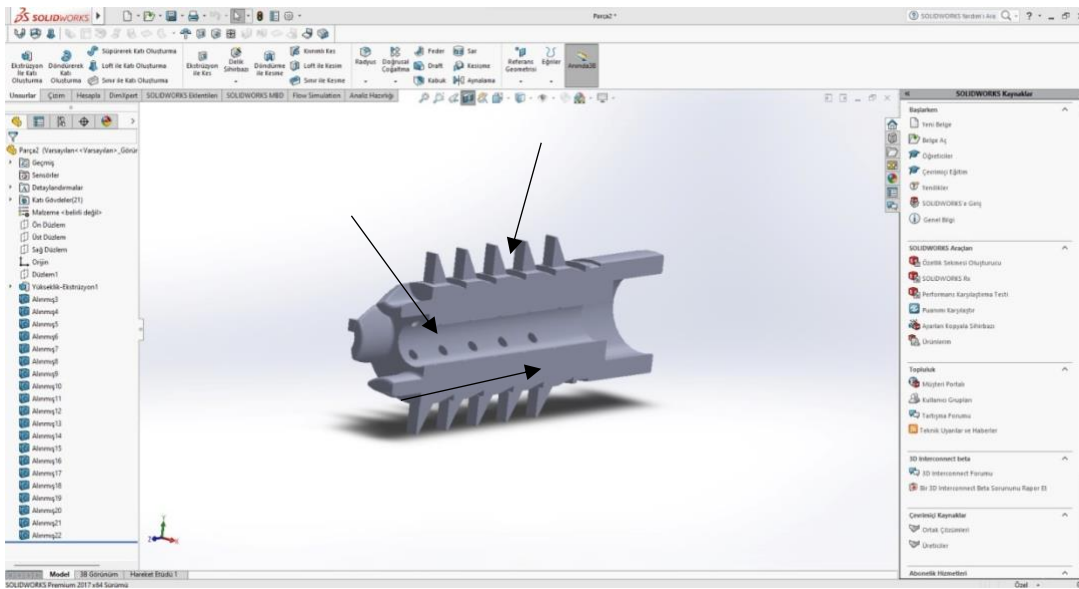
Şekil 3.11. de Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen' inin iç yapısı ve kısımları gösterilerek numaralandırılmıştır;

- 1- MPT- 76 Namlusuna takılan bölüm
- 2- Alevlerin ve yüksek basıncın sönümlenip minimize edildiği bölüm
- 3- Namlu patlamasıyla oluşan geri tepmeyi sönümleyen bölüm
- 4- Tırnakların hizalanması ile tellerin kesilmesini sağlayan bölüm
- 5- Alevlerin ve yüksek basıncın sönümlenip soğutulduğu edildiği bölüm
- 6- Kullanıcının gerektiğinde müdafaa, saldırı ve kırma işlemlerinde kullanabileceği delici ve kesici yapılar bölümü
- 7- Tırnaklar ile alev gizleme işlevi daha da çok minimize edildiği bölüm



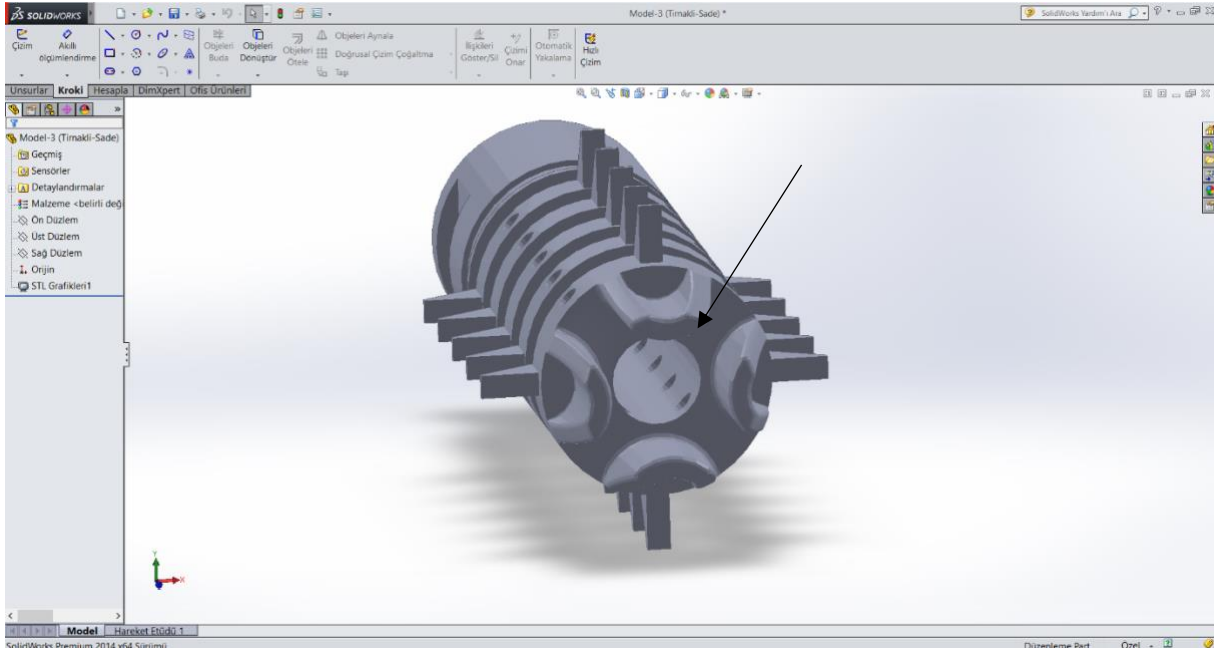
Şekil 3.12. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modelinin namlu bağlantı bölümü

Şekil 3.12. de gösterilen bölüm namlu bağlantı bölümüdür. Milli piyade tüfeği MPT-76'nın namlu ucuna takılmasını sağlar. Namlu ile arasına ezme rondelası konulup hizalama gerektirmeden sıkma işlemi yapılarak, Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modeli çok kolay, hızlı ve sağlam olarak MPT-76 ya monte edilmesini sağlar bölümüdür. İçinde dışı dişler bulunur.



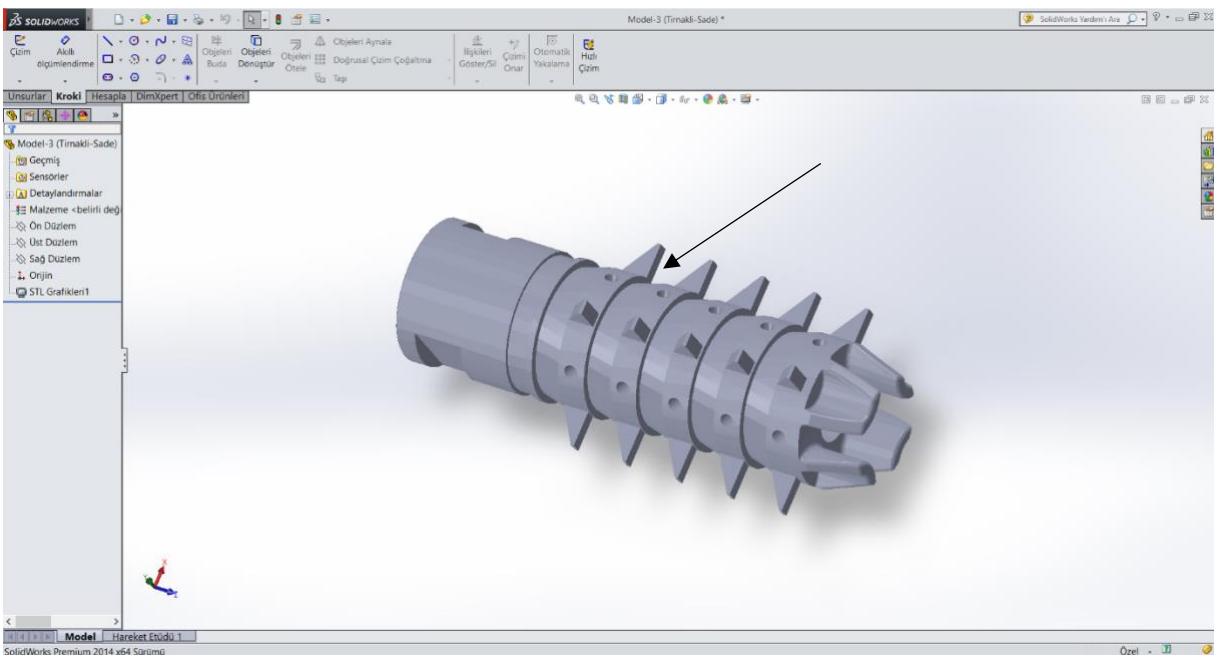
Şekil 3.13. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modelinin namlu patlaması sonucu oluşan alevlerin sönümlendiği bölüm

Şekil 3.13. de gösterilen bölüm, milli piyade tüfeği MPT-76' nın kullanıcı tarafından ateşlenmesi sonrasında meydana gelen namlu patlamasıyla oluşacak yüksek alev görünümünü absorbe ederek minimum alev çıkışını sağlayan bölümdür. İçerisinde bulunan birçok delik kanal ile yüksek basınç ve sıcaklıkla çıkan gazlar sönümlenir. Ayrıca bu yapı ile oluşan yüksek geri tepme de minimize edilerek kullanıcının hedef doğruluğu artırılır. MPT-76' nın kullanıcı tarafından ateşlenmesiyle oluşan alev görünümü buradaki kısımda absorbe edilerek özellikle gece kullanımlarında kullanıcının gözlerinin kör olmasının önüne geçilir ve kullanıcının gece görüşü artırılır. Ayrıca gece kullanımlarında kullanıcının konumunun gizlenmesini sağlayan bölümdür. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modelinin özel tasarımı ile her türlü arazi şartlarında kullanılacak bir yapıya kavuşmuştur. Toz, çamur, çalı, toprak gibi yapıların alev gizlenin içine girmesi yapılan özel tasarım ile en aza indirilmiştir.



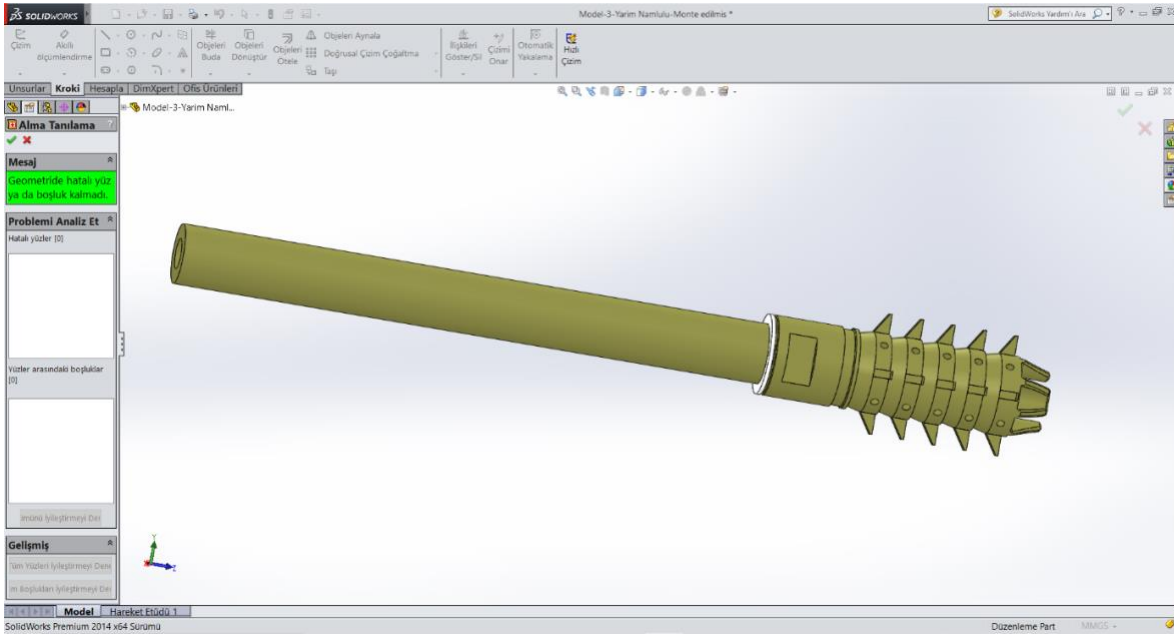
Şekil 3.14. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modelinin alevlerin sönümlenmesine ve tellerin kesilmesini sağlayan bölüm

Şekil 3.14. de gösterilen bölüm, milli piyade tüfeği MPT-76' nın kullanıcı tarafından ateşlenmesi sonrasında meydana gelen namlu patlamasıyla oluşacak yüksek alev görünümünü absorbe ederek minimum alev çıkışını sağlayan dört uçlu bir diğer bölümdür. Namlu uçlarının tellere hizalanıp kullanıcı tarafından ateş edilmesiyle teller çok kolay bir şekilde kesilir. Dört kısa tırnaklı bu özel tasarım ile kullanıcıya özel bir fonksiyon sağlanmış olur.



Şekil 3.15. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modelinin delici ve kesici yapıları

Şekil 3.15. de gösterilen bölüm, milli piyade tüfeği MPT-76' nın kullanıcı tarafından ateşlenmesi sonrasında meydana gelen namlu patlamasıyla oluşacak yüksek alev görünümünü absorbe ederek minimum alev çıkışını sağlamasıyla kullanıcının gece kullanımlarında gözünün kör olmasını engelleyerek ve gece görüşünü artırmasının yanında, kullanıcının konumunun gizlenmesini sağlayan temel görevlerinin yanın da üzerinde bulunan delici ve kesici yapılar ile kullanıcı gerektiğinde saldırı ve müdafaa da kullanmasının yanı sıra gerektiğinde cam ve kapı kırma işlemlerinde de kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu özel fonksiyon ile kullanıcıya gerektiğinde hızlı refleks göstererek düşman kuvvetlere karşı harekete geçme olanağı sağlar.



Şekil 3.16. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modelinin ezme rondelâsı ile namluya montajlanmış hali

Şekil 3.16. da yerli milli piyade tüfeği MPT-76' ya göre tasarlanan Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen Modeli' nin namluya ezme rondelâsı ile montajının yapıldığını göstermektedir. Namluya önce ezme rondelâsı takılır sonra Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen çevrilme yöntemi ile erkek ve dişi dişlerin birbiri içerisine girmesi sağlanarak montaj işlemi tamamlanır. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen, namluya ezme rondelâsı ile hizalama gerektirmeden hem çok daha hızlı montajı sağlar hem daha sağlam bir şekilde monte edilmiş olur. Bu yöntem ile demonte işlemi de bir o kadar kolay ve hızlı yapılmış olur.

3.4. Parçanın Prototip Üretimi

Milli ve yerli piyade tüfeği MPT-76' ya göre tasarlanan Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen katı modelimiz SolidWorks ile modellenerek üretim aşamasına geçilmiştir. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen katı modelini prototipini üretmek için günümüzde birçok yerde kullanılan üç boyutlu yazıcı teknolojileri kullanılmıştır. Atabey Alev Gizleyen katı modelini üç boyutlu yazıcı modellerinden Zortrax firmasının ürettiği M200 modeli kullanılarak prototipi üretilmiştir.

Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen katı modelinin prototipinin üretilmesinde kullanılan Zortrax M200 model yazıcı ile çok hassas ve yüksek verimlilikte parçalar prototip olarak çıkartılır. Üç boyutlu yazıcıda baskı kullanılan filamentler çok farklı renk seçeneklerine ve üst düzey özelliklere sahiptir. Çok hassas ve ayrıntılı parçalar üretilebilir ve özel tasarlanan yapılar orijinal halini hiç kaybetmeden olduğu gibi bastırılır, çoğaltılabilir. Zortrax M200 modelinde iki adet yan kapaklar bulunmaktadır. Bu kapaklar ile tasarlanıp üretilmek istenen parçanın basılması sırasında sıcaklık dengesini sağlayarak daha kontrollü soğumaya olanak sağlar. Bastırılacak modeli dış etkenlere karşı korurlar. Aynı zaman da modelin basılması sırasında oluşabilecek yarıklar gibi hataların da önüne geçerler. Zortrax M200 modeli, kendisine özel Z-Suite sezgisel üç boyutlu baskı yazılımına sahiptir (Anonim, 2022).

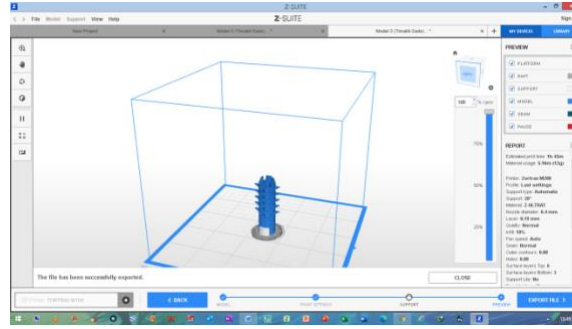


Şekil 3.17. Zortrax M200 3D yazıcının görüntüsü (Anonim, 2022).

Üç boyutlu yazıcı modeli olan Zortrax M200' ün kendisine ait düşüncel üç boyutlu katı model baskı yazılımıdır. Bu program ile programı.stl, .obj, .3mf, .dxf dosya bileşenleri üzerinden değişim, çıktı, düzeltme gibi işlemler uygulanabilir. Atabey Alev Gizleyen katı modeli oluşturulurken SolidWorks ile katı modellemesi oluşturulan yapı .stl uzantısı ile dosyalanarak kaydedilmiş ve son haliyle Z-Suite yazılımından çıktı ayarları yapılmıştır ve bu yazılım ile Atabey Alev Gizleyen modeli prototip imalata hazır hale getirilmiştir.

Z-Suite programı ile imalata hazırlana parça x,y ve z eksenlerinde üç boyutlu yazıcının tablası üzerinde istenilen yön ve şekilde konumlandırılabilir. Ayrıca baskı öncesi imal edilecek parçanın kalite, dolgu, kullanılacak filament, tabaka kalınlığı, baskı sırasında atılacak destekler, pervane hızı gibi pek çok özellik istenilen şekilde ayarlanabilir (Bozdemir, 2016).

Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen katı modeli Z-Suite programına atılarak prototip imalatı için çıktı ayarları yapılmıştır. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen' in, Z-Suite programındaki baskı ön izleme ayarlarının görülebilmesi için katı modelin resmi Şekil 3.18. de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen, Z-Suite baskı ön hazırlama ayarları

Z-Suite programında baskı ön hazırlama ayarları yapılan Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modelinin dosyası bir SD kart ile yazıcıya gönderilmiştir. Çizelge 3.1. de prototip olarak 3D baskı teknikleriyle üretilen Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modeline ait parçanın isimlerini, sayıları, kullanılan filament miktarı, baskı süresi gibi temel veriler verilmiştir.

Tablo 3.1. Alev gizleyen modellerinin baskı temel verileri

Parçanın adı	İmalat Süresi (sa,dk)	Parça malzemesi	Parçanın ağırlığı (gr)
Atabey alev gizleyen	1 sa 43 dk	Z-Ultrat	12 gr

Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modelinin prototipi imal edilmiştir. Şekil 3.19. da prototip görüntüsü verilmiştir. Model 0,1 mm tolerans ile imal edilmiştir. Parçada yapıştırılmalı bağlantı bulunmamaktadır. İmal edilen alev gizleyen modeli, tasarlanan ve modellenen ölçülerin 1/1 ölçüsünde prototipi üretilmiştir. Model 70 mm uzunluğundadır ve 7.62 mm kalibrelerde kullanılabilir.



Şekil 3.19. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen Prototipi

4.SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada genel tasarım yöntemiyle yerli ve milli piyade tüfeği MPT-76 da kullanılmak üzere çok fonksiyonlu geliştirilmiş bir alev gizleyen katı modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan alev gizleyen üç boyutlu yazıcı kullanılarak prototipi yapılmıştır.

MPT-76 da kullanılmak üzere modellenen Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modeli tasarımı için genel tasarım yöntemleri üzerinden yapılmıştır. Bu uygulamadaki temel adımlar izlenerek uygun modele ulaşılmıştır. Elde edilen uygun model ise, MPT-76 da kullanılmak üzere Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modelidir. Genel tasarımla elde edilen MPT-76' da kullanılmak üzere tasarlanan gizleyen modelinin çizimi ve katı modellemesinde Bilgisayar Destekli Programlar'dan olan SolidWorks kullanılmıştır. Daha sonrasında tasarlanan alev gizleyen akış hesapları SolidFlow programı üzerinden yapılmıştır. Tasarlanan alev gizleyen malzemesi, fonksiyonları, saha da kullanım dayanıklılığı ve akış hesaplarından optimum model olan Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modeli ile milli ve yerli piyade tüfeği MPT-76' da kullanılmak üzere, silah ateşlendiği namluda oluşan alev görünümünü minimize ederek özellikle gece kullanımlarında kullanıcının kör olmasının önüne geçilir ve gece görüşü artırılır. Ayrıca gece kullanımlarında kullanıcının konumunu gizlemeye yarar. Kendine özel tasarımı ve iç yapısı ile alev gizleme özelliğinin yanı sıra geri tepmeyi de azaltarak kullanıcı hem daha kolay silah kullanımını sağlar hem de hedef doğruluğunu artırır. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen' e eklenen özel opsiyon ile kesici ve delici dikenli yapılarıdır. Bu kesici ve delici dikenli yapılar ile kullanıcı olası müdafaa ve saldırı anlarında kolaylıkla ve hızlıca harekete geçme olanağı sağlar. Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen' e eklenen bir diğer özel opsiyon olan dört turnak ile hem alev gizlemeye yardımcı olur hem de namlu hizalanması ile tel kesme işlevi görür. Yapılan çalışmada MPT-76' da kullanılmak üzere çok fonksiyonlu geliştirilmiş bir alev gizleyen olan Atabey Çok Fonksiyonlu Alev Gizleyen modeli tasarlanmıştır.

Tasarlanan üç boyutlu katı modelin prototip halinde üretilebilmesi için üç boyutlu yazıcı teknolojilerinden yararlanılmıştır. SolidWorks programında yapılan modelleme .stl dosyası olarak kaydedilerek üç boyutlu yazıcıya aktarılmıştır. Baskıda üç boyutlu yazıcı modeli olan Zortrax M200 ve Z-SUITE yazılı kullanılmıştır. T Yazıcı malzemesi olarak Z-Ultrat kullanılarak tek bir parça halinde, beyaz renkte 1sa 43 dakikada ve 12 gr olarak imal edilmiştir.

Gerçeğiyle birebir aynı ölçülerde modelleme yapılarak prototip üretilmiştir. Yapılan çalışma ile savunma sanayi alanında binlerce konulardan bir tanesi olan ateşli silahların namlu ucu parçaları için farklı bakış açısıyla öğrenmeye ve öğretmeye yönelik akılda kalıcı ve görsellerle dolu silah sistemleri eğitiminde faydalı bir eğitim materyali olacağı öngörülmektedir.

Referanslar

Alli H., Tuncer D., "Ağır silah geri tepme mekanizması tasarımı iç balistik modelinin oluş. ve kama kuv. hes.", 2.Ulusal Tas. İm. ve Anl. Kongresi, Sayfa 413-414, Balıkesir, 2010.

Anonim, "MPT-76 modeli", <https://free3d.com/tr/3d-model/mpt-76-infantry-rifle-3027.html>, (Erişim Tarihi: 15.02.2022)

Anonim, "Zortrax M200 üç boyutlu yazıcının görüntüsü", <https://cdn3.zortrax.com/wp-content/uploads/2016/06/m20030.107web.pdf?ga=2.101812291.37032421.1527333923-560047254.1527333923>, (Erişim Tarihi: 15.02.2022)

Army Material Command, "Engineering desing handbook guns series muzzle devices", Pages 52-187, United States, New York, 1968

Ay, N., Bozdemir, M., "Füze sistemleri tasarımı için kavramsal tasarım uygulaması", 1 st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials, Sayfa 169-170, Karabük, 2018.

Ay, N., "Meslek eğitimi alanında 3D yazıcılarla tasarım etkinlikleri geliştirilmesi", 1 st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials, Sayfa 178-179, Karabük, 2018.

Barnatt, C. "3D Printing", Pages 75-120, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016.

Bozdemir, M., "Silah mekanik sistemleri için 3 boyutlu eğitim modellerinin geliştirilmesi", International Symposium on 3D Printing Technologies, Sayfa 91-100, İstanbul, 2016.

Brown, C., "Flash hidens and the 1919a4 bmg", Small Arms Review V17N2, Vol. 17, Issue 2, Pages 14-21, 2013.

Deng S., Sun H. K. and Chung-Jung Chiu, "RiflesIn-boreFinite element transient analysis", Int. Conf. On Mechanical Productionand Materials Engineering (ICMPME'2012) June 16-17, 2012.

- Di Maio, VJM., "Ateşli silah yaraları, ateşli silahlar, balistik ve adli tekniklerin pratik yönleri", Sayfa 187-228, CRC Basın, Boca Raton ,1999
- Evans, B., "Practical 3D printers: The science and art of 3D printing", Apress, 2012.
- Gündüzer, O., "Namlu cidarı boyutlandırılmasına iç balistik davranışın etkisi", Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi, Ankara, 11.2011.
- Mark, H., Kennewick, W.,Gerald B., "Flash suppressor", US. Patent No:4.893.544, Jan. 16, 1990
- Micallef, J., "Beginning design for 3D printing", Pages 18-38, Apress, Kaliforniya, 2015.
- Nixon, J., "ForensicEngineering analysis of firearm silencers", Journal of theNational Academy of ForensicEngineers, Vol. 25, Issue 2, Pages 3-19, 2009
- Noorani, R., "3D printing: technology applications, and selection", Pages 145-180, CRC Press, England, 2017.
- Oztürk A.R., "İç balistik", Sayfa 75-180, MKEK Özel Yayınları, Ankara, 1984.
- Perkins, W., "Ordu yeni bir tüfek kabul ediyor". Popüler Mekanik, Vol.109, Issue 1, Pages 149, 1958.
- Petzl, D., "Tehlikedeki gelenek". Alan ve Akış, Vol. 99, Issue 2, Pages 26–30, 1994
- Rottman, G., "Kalaşnikof AK-47 taarruz tüfeği", Sayfa 35, Osprey Yayıncılık, Lonra, 2011.
- Savunma Sanayii Müsteşarlığı., "2011-2016 Teknoloji yönetim stratejisi", Sayfa 15-35, Savunma Sanayii Müsteşarlığı, Ankara, 2011.



Stent' in Vitro Degradation Rate and Toxic Degradation Products

Mustafa Doğan¹ Yaşar Aluç¹

¹ Scientific and Technological Research Application and Research Center, Kırıkkale University, Kırıkkale, 71450, Turkey

Başvuru/Received: 17/03/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Abstract

Medical stents are tubes made of a metal or plastic wire mesh. They are inserted into a hollow structure of a body part to keep an anatomic vessel or passageway open. Stents placed in the body can cause toxic effects by releasing metal ions into the body, and can also cause harmful effects on the body by creating corrosion products. In this study, the decomposition rate and release of corrosion products in artificial body fluid (PBS) of a stent sample with a nitinol structure produced for medical purposes were examined. If any metal decomposes in the body, it can endanger human life and can damage the body via heavy metal residues and toxic radical products that accumulate over long periods in the body. An in vitro degradation test was performed according to the standard 10993-13 and metal release values were found after short periods (one month) for nitinol. In the present study, the release values and possible toxic effects of nickel and titanium within the body with long-term intra-body use were examined. By calculating the mass loss caused by degradation, its relationship to heavy metal release inside the body and the possible side effects on human health of heavy metal residues were evaluated. Low metal ion release values of heavy metals resulting from degradation were determined by the ICP-OES device. Physical changes (diameter) in the surface of stent parts were also measured to compare and evaluate with the degradation rates. When the nitinol stent' toxicological distribution of released heavy elements were investigated; after one month of degradation the 191 ppm release level of tungsten was in toxic range, while the levels of nickel and titanium were in a acceptable range in the scopes of literature. Also it has been found that after approximately 12 years the whole nitinol stent wire would be dissolved and released into the body.

Key Words

“nitinol, degradation, tungsten, toxic elements, coil stent”

1. Introduction

Stents are specially made of corrosion resistant materials. These materials include titanium, nickel, tungsten, nitinol, and stainless steel. Tungsten, which is found in soil and rocks in nature, is not found in a pure form but found together with other mineral structures. It increases the strength, flexibility, and durability of metals when included in metal alloys. In addition, it has a high melting temperature (3422 degrees). This advantageous property allows its use in bulb filaments and X-ray tubes. Because of the hard structure of tungsten carbide, tungsten is also widely used in abrasive, insert grinding, and cutting tools in industry [Knowles et al., 2021]. It has been determined that the limit for tungsten as a volatile component in industrial plants should be $<10 \text{ ng/m}^3$, while this limit should be in the range 1.82-6.04 $\mu\text{g/L}$ when it is in drinking water [Haddad & Zikovsky., 1985]. For tungsten, the Occupational Safety and Health Administration (OSHA) has set the allowed 8-hour average exposure limit as 5 mg/m^3 (5 ppb). When metal particles are in dissolved form an exposure limit of 11 mg/m^3 has been determined for the construction and shipbuilding industries [Keith., 2005]. As a result of exposure to tungsten components, low sperm mobility has been observed along with other side effects such as increased embryotoxicity and cancer [Keith., 2005, Wild et al., 2000]. It has also been found to cause localized irritation to the mouth and eyes when those areas are exposed to it. Moreover, an implanted tungsten alloy (91.1% tungsten, 6.0% nickel, and 2.9% cobalt) was found to cause aggressive tumors in rats [Keith., 2005, Wild et al., 2000, Nyren et al., 1995]. According to these studies, nickel and cobalt alloys are known to cause tumors.

After low dose nickel was implanted in mice, histopathological and immunohistochemical studies showed rapid metastasis in the liver. Histological lesions in the heart were observed as a result of exposure to 62.5 and 125 mg/kg/day soluble sodium tungstate via oral gavage in rats. There were also behavioral disruptions affecting motor activity [McInturf et al., 2011].

In a clinical study on an endobronchial nitinol coil stent, this product was used in 155 patients and not used in 157 other patients. Comparison of the results showed a 20% increase in mortality in those who underwent the endobronchial coil treatment [Scurba et al., 2016]. Corrosion studies on these stents have also been carried out. In a corrosion simulation performed with stents in accordance with the scope of "ASTM G61-78 Standard Practice for corrosion resistance measurements" in Ringer's solution, it was predicted that there would be melting and loss of 275 $\mu\text{m/year}$. Moreover, polyurethane coatings (5-30 μm) were applied to the stents to extend the life cycle of these medical materials and reduce their metal release into the body. When this coating was applied, the melting rate (degradation rate) decreased from 275 $\mu\text{m/year}$ to 13 $\mu\text{m/year}$ [Mazumder et al., 2003].

In the present study, the degradation of nitinol samples in phosphate-buffered saline (PBS) was examined within the scope of the standard 10993-13:2010 (Biological evaluation of medical devices - Part 13: Identification and quantification of degradation products from polymeric medical devices) and the percentage of degradation was also calculated. In addition, the possible toxic metal ions released and their amounts that could occur within the scope of the standard 10993-15:2019 (Biological evaluation of medical devices - Part 15: Identification and quantification of degradation products from metals and alloys) were calculated using an ICP-OES device and their damage to the human body was evaluated

2. Materials and Methods

A commercially used nitinol sample (endobronchial nitinol coil stent) was used for this experimental process. The diameter of the nickel-titanium wire was about 297 μm . Around this nitinol wire there was a tungsten wire 58 μm in diameter wrapped in a spiral. All around the entire wire was a 75- μm -thick coating of polypropylene to decelerate the effect of degradation. The ICP-OES device was calibrated for nickel, tungsten, and titanium. The operating conditions for the ICP-OES are given in Table 1. Nickel, tungsten, and titanium are the main known elements in the stent. For these metals, ICP-OES calibration curves are given in Figure 1, Figure 2, and Figure 3.

The structure of the nitinol wire was visually inspected under a Leica DM5000B stereomicroscope with 100 \times magnification. A Dasqua model (4210-2105 part number) digital micrometer ($\pm 0.001 \text{ mm}$) was used to measure the diameter of the nitinol wire's components in the micrometre range before and after the degradation experiment. In addition, the percentages of the elements in the nitinol wire were measured using an X-ray fluorescent (XRF) spectrometer (SPECTRO X-LAB 2000, AMETEK, Germany). XRF technology provided the determination of the chemical composition of the nitinol samples in this system. The XRF system has a 50 W/60 kV X-ray tube for excitation and TurboQuant II software accurately analyzes unknown liquid, powder, or solid samples. Degradation experiments were conducted according to the standard 10993-13: 2010 (Biological assessment of medical devices — Part 13: identification and quantification of degradation products from polymeric medical devices).

3. Results and Discussion

The effects of degradation on the nitinol stent will occur initially, but slowly; after several years of implantation, these effects will become accelerated. At the tissue contact interface, the released ions will “burst-out” at higher levels locally. Over time, metal ion accumulation will occur and after long periods accumulated ions are taken up by the adjacent cells. Determining the released nitinol’s heavy element level is of critical importance. In vitro experiments involve simulations of body environments outside the living being. Every piece of laboratory equipment is a device with upper and lower measuring limits. To measure a value and obtain a reliable result, the data obtained must be between these limits. A piece of laboratory equipment has lower limit of detection (LOD) and low limit of quantification (LOQ) values. To obtain reliable results these limits must be defined before the experiment

Every measurement device must be calibrated for the related measurement region and the LOD and LOQ must be defined to have a reliable and meaningful result [Doğan., 2020]. Otherwise data measured under the LOD values would be invalid. The ICP-OES is a highly sensitive piece of chromatography equipment. LOD and LOQ values for the ICP-OES are defined in Table 2. The LOD was defined for tungsten as 1 ppb, for titanium as 1 ppb, and for nickel as 0.5 ppb. The LOQ was defined as 3 ppb for tungsten, as 24 ppb for titanium, and as 1.5 ppb for nickel with the device program. Values measured below these LOQ values would be invalid; this is the measurement limit for this device.

All the ionic metal release experiments were performed in PBS. PBS simulates the body liquid. This buffer solution is commonly used in biological research experiments. PBS is also recommended by the standard TS-EN ISO 10993-13. The pH of this water-based salt solution was set to 7.4 to simulate blood pH level. The buffer solution contains disodium hydrogen phosphate, sodium chloride, potassium chloride, and potassium dihydrogen phosphate. The related metallic ion values in the blank PBS, before the metal ion release experiment, were also measured and considered. Blank PBS’s related metal element levels were as follows: tungsten 50 ppb, titanium <8 ppb, and nickel <0 ppb (Table 2). When degradation occurs the pH level must be monitored. pH is another parameter used to assess the degradation level. pH level decreased from 7.4 to 6.99 value after degradation. This change was calculated with the formula $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$. To achieve this pH value (6.99), the equivalent of 1.5×10^6 million positive ionic compounds [H^+ or positive metallic ions] must be released into the PBS solution by the degraded material.

A stent is made up of two main compounds (Figure 5, Figure 6). The main backbone wire consists of nickel and titanium (Figure 5, labeled B1). This backbone, named “nitinol”, is coiled with tungsten wire (Figure 6, labeled A). Degradation decreased the diameters of the A and B wires’ parts separately and decreased the whole nitinol’s diameter (Figure 5, labeled B1) after the degradation (Table 3). XRF measurements were recorded before and after the degradation experiments and the results are given in Table 4.

Accelerated degradation experiments were done at 70 degree celcius. Three days accelerated degradation of sample at 70 degree celcius corresponds to 1 month degradation at 37 degree celcius. Long term intra body temperature 37 degree celcius exposure in PBS was simulated by the accelerated degradation experiments. Experiments conducted in accordance with TS EN ISO 10993-13 calculated the percentage of degradation in samples according to equation 1. WL: amount of degradation; W0: initial weight; Wr: dry weight. The degradation percentage and derived data are summarized in Table 5.

$$\text{WL}\% = (\text{W0} - \text{Wr})/\text{W0} \times 100 \quad (1)$$

Investigation of the degradation revealed that it accelerated logarithmically with time (Figure 4). After one month of degradation 191 ppm tungsten was released into 40 mL of PBS liquid. The level of released titanium was <8 ppm and the level of released nickel was 252 ppb (Table 2). When these values are evaluated over one year approximately, it is estimated that 2292 ppm tungsten, 96 ppm titanium, and 3 ppm nickel would be released.

In a previous study, it was reported that released nickel ion levels of around 7500-30000 ppm are carcinogenic and negatively affect the growth of cultured 3T6 embryo mouse fibroblast cells [Shih et al., 2000]. Within the scope of the present study a released nickel ion level of 3 ppm seems negligible after 1 year. Titanium is a well-known and frequently used heavy metal. There is no known toxic effect of this biomedical material but it has some long-term negative effects via its corrosion product (TiO_2) [Kim et al., 2019]. In an experimental study performed with pure titanium and a titanium alloy (Ti-6Al-4V), the results did not show any significant increases in lactate dehydrogenase (LDH) or morphological change [Rae., 1981]. LDH is an enzyme involved in energy production and this enzyme’s value increases as a marker when tumors, cancers, infections, anemia, muscle trauma, cell toxicity, and bone fractures occur.

A release level of the heavy metal tungsten larger than 5 mg/L (5000ppm) would be lethal [Van der voet., 2007] after only 1 month, and so when the level of tungsten released in the present study (191 ppm) is considered, it is far below this harmful limit. Moreover, in a study performed with degraded embolization coils by in situ evaluation, an average tungsten level in the blood of 8.4 $\mu\text{g/L}$ (8.4 ppb) was not showed toxic affects [Butler et al., 2000].

However, in the present study the stent's nitinol and tungsten wire diameters decreased differently. The outer layer consists of coiled tungsten and it degraded more than the inner nitinol core wire. The diameter of A, the tungsten part, decreased from 58 μm to 51 μm after one month of degradation (Figure 5, Figure 6). The diameter of the nitinol (B1) wire decreased from 297 μm to 295 μm after one month of degradation. A tungsten coil covers the inside nitinol wire and this coil mostly dissolves before the nitinol inner core wire with degradation (Figure 5). The outer tungsten coil (A) covers the inner nitinol core wire (B1) and decelerates the inner wire's degradation. This affected the XRF results before and after degradation. XRF results gave the nitinol wire composition. The maximum percentage was for tungsten. Titanium and nickel levels were around 50-60% after the degradation (Table 5).

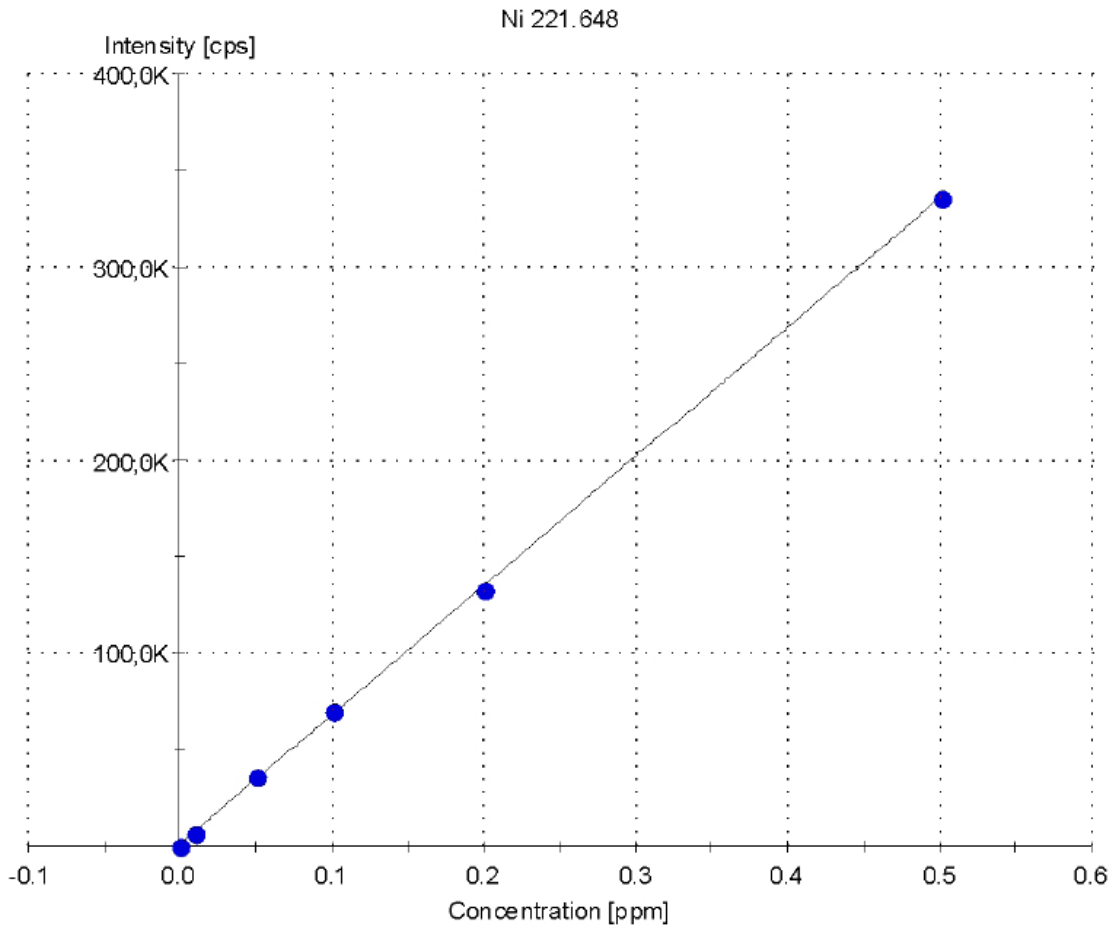


Figure 1. Calibration curve of ICP-OES for nickel element

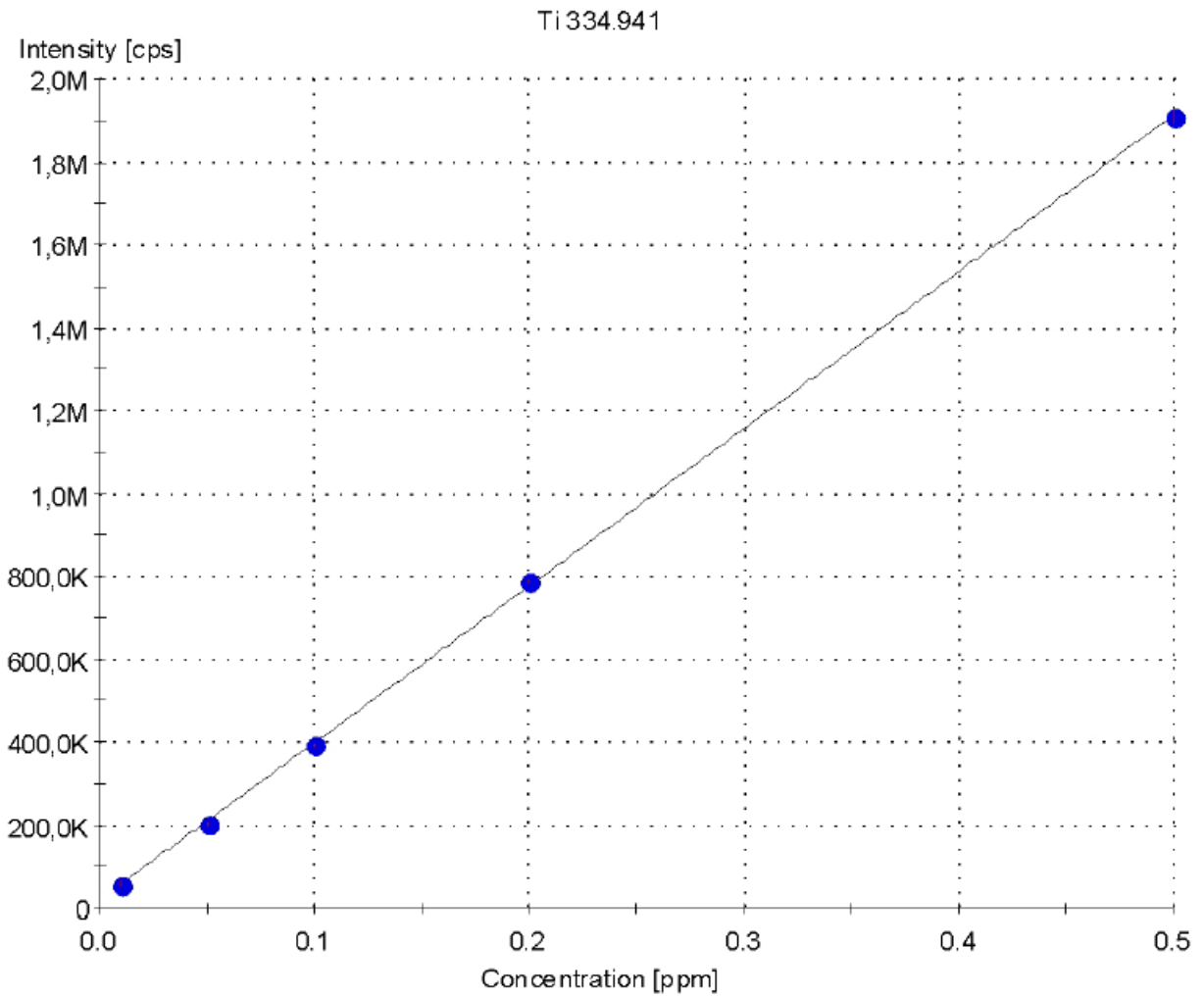


Figure 2. Calibration curve of ICP-OES for titanium element

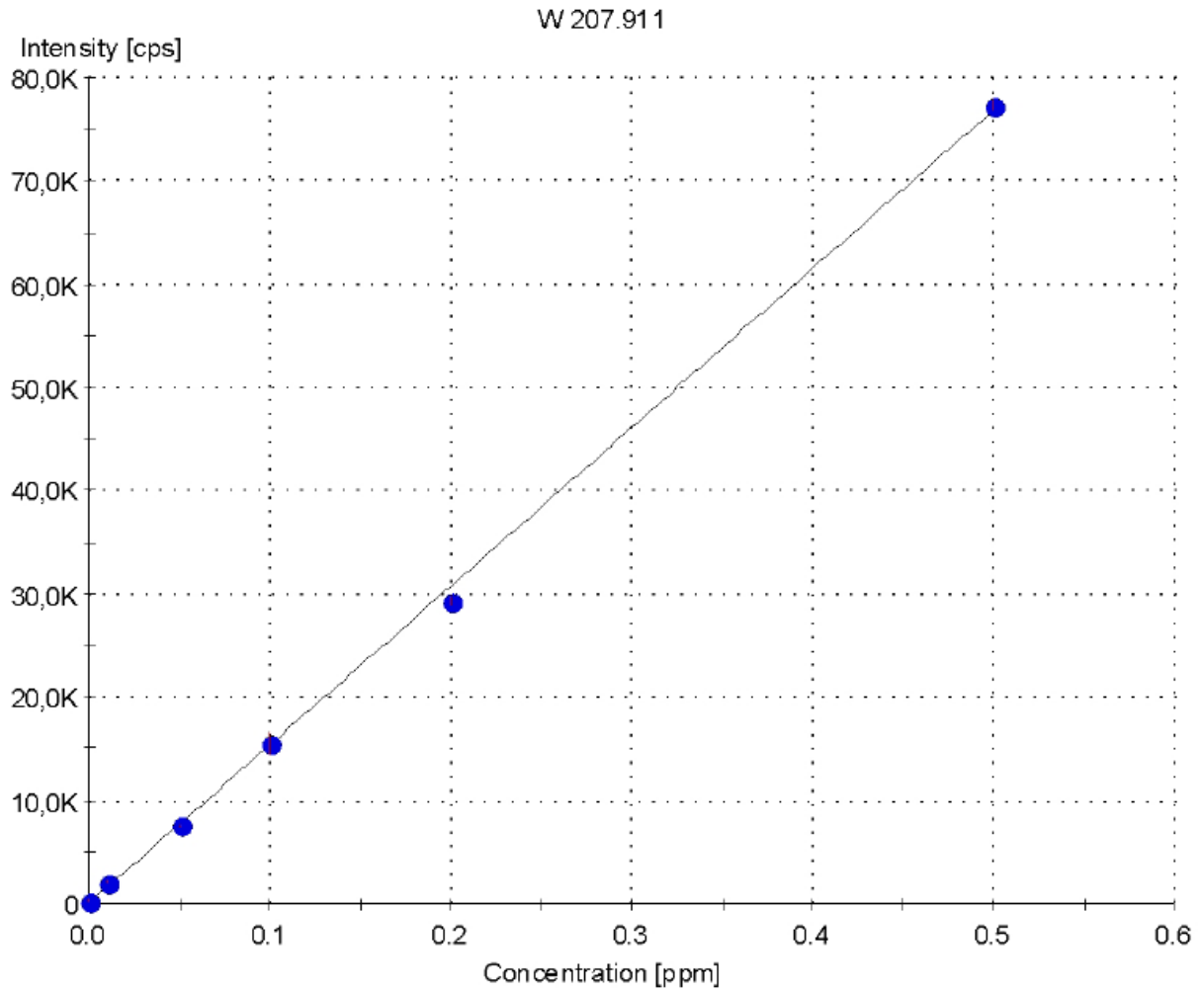


Figure 3. Calibration curve of ICP-OES for tungsten element

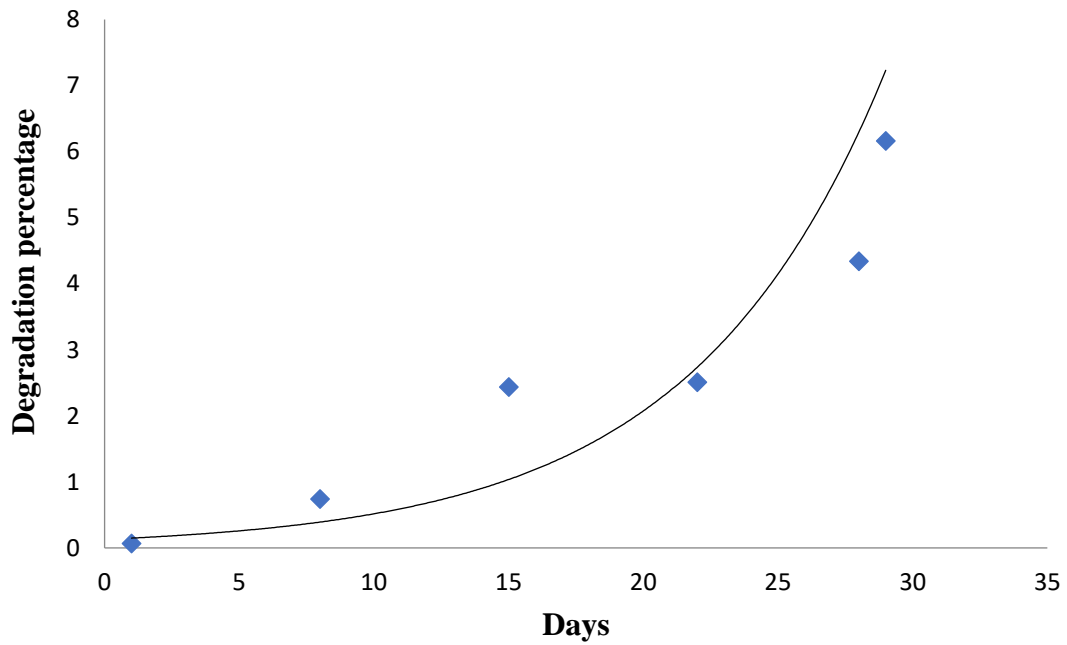


Figure 4. Graph showing the degradation percentage of nitinol stent through 28 days

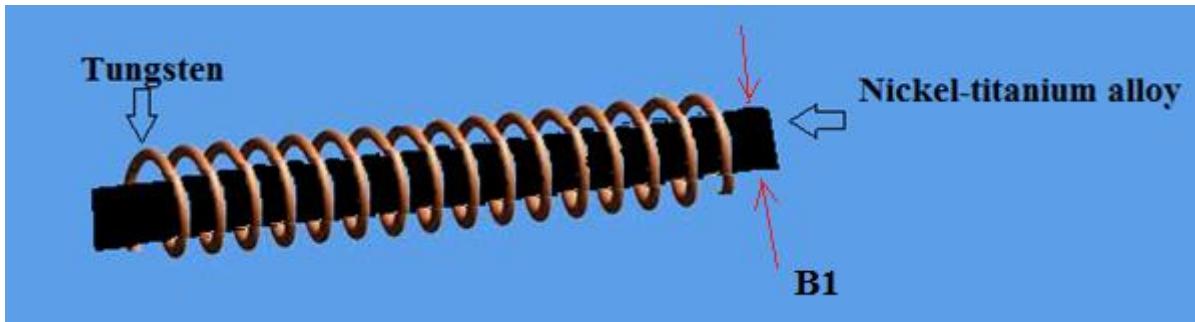


Figure 5. Schematic picture of nitinol stent ; tungsten wire coiled over the nitinol wire

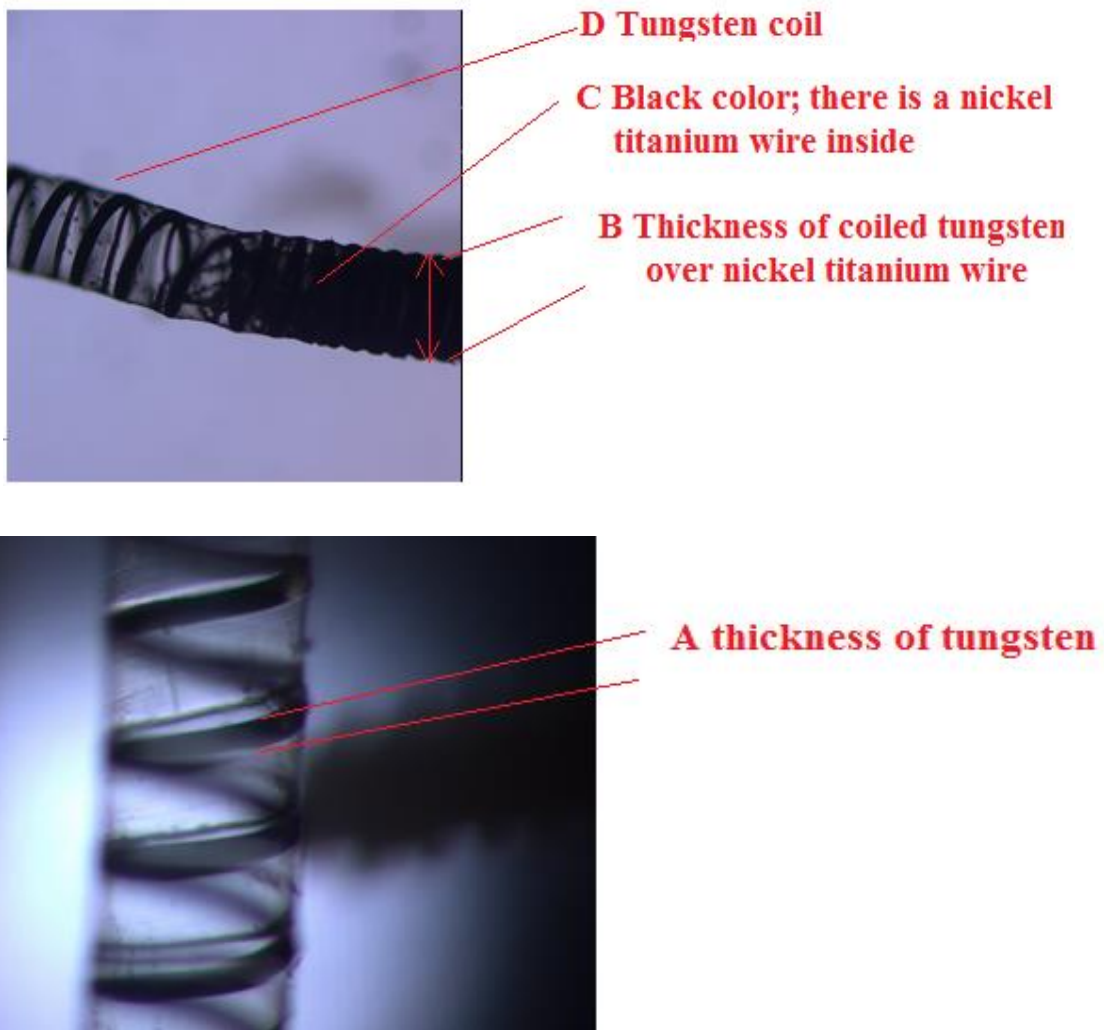


Figure 6. Light microscope pictures of nitinol stent

Table 1. ICP-OES operating conditions

Parameters	Value
Plasma power	1435 W
Pump speed	30 rpm
Coolant flow	13 L/min
Auxiliary flow	0.80 L/min
Nebulizer flow	0.70 L/min
Number of replicates	3
Integration time (s)	3 s
Sample uptake rate ($\mu\text{L}/\text{min}$)(speed)	0.3

Table 2. Released metal ion values of blank PBS and degradation liquid(values were measured with ICP-OES device), LOD and LOQ values of the device were given for tungsten, titanium, and nickel elements

Experiment name	Tungsten	Titanium	Nickel	pH value
Measurement of blank PBS	50ppb	<8ppb	<0	7,4
Degradation liquid (PBS -28 days)	191ppm	<8ppb	252ppb	6,99
ICP-OES LOD dedection limit (Low dedection limit)	1ppb	8ppb	0,5ppb	-
ICP-OES LOQ dedection limit (Low quantification limit)	3ppb	24ppb	1,5ppb	-

Table 3. Thickness changes of nitinol stent parts before and after degradation experiment

Diameter measurements explanation	Figure explanation	Thickness
Tungsten coil wire diameter before degradation	Figure6 _ A named	58 μm
Tungsten coil wire diameter after degradation	Figure6 _ A named	51 μm
Whole nitinol wire diameter before degradation	Figure6 _ B named	486 μm
Whole nitinol wire diameter after degradation	Figure6 _ B named	440 μm
Nickel-titanium core wire before degradation	Figure 5 _B1 named	297 μm
Nickel-titanium core wire after degradation	Figure 5 _B1 named	295 μm

Table 4. Spectro X-Lab measurement program X-REF measurement results before and after the degradation of stent sample

Element name	Element concentration before degradation	Element concentration after degradation
Titanium	% <0.00020	%5.944
Nickel	% 1.239	%4.64
Tungsten	%92.22	%84.78
Iron	%2.46	%2.298
Gold	%2.49	%1.017

Table 5. Accelerated degradation values of stent samples from 1 to 28 days at 70 degree celcius.

Days	Corresponding time month	Sample Weight	Weight After Degradation	Degradation Percentage
1	0,3	48,15	48,12	0,03
8	2,6	44,79	44,46	0,73
15	5	48,07	46,9	2,43
22	7,3	53,48	52,14	2,50
28	9,3	50,5	48,31	4,34
29	9,7	52,45	49,22	6,16

5. Conclusion

The present study examined the in vitro degradation of an endobronchial nitinol coil according to 10993-13 (Biological evaluation of medical devices — Part 13: Identification and quantification of degradation products from polymeric medical devices). The possible usage of this coil and the toxicological distribution of the elements released were evaluated. After one month of degradation the level of tungsten released, 191 ppm, was lethal and toxic, while the levels of nickel and titanium were acceptable within the scope of toxicological studies.

Furthermore, degradation of the tungsten coil showed that after 1 year most of the tungsten wire would be dissolved when the 7 $\mu\text{m}/\text{month}$ decrease in the diameter of the tungsten wire is considered. The decrease in diameter for nitinol was 2 $\mu\text{m}/\text{month}$. With the possible aging time calculated, after approximately 12 years the whole nitinol core wire would be dissolved and released into the body.

Referanslar

Butler, T. J., Jackson, R. W., Robson, J. Y., Owen, R. J., Delves, H. T., Sieniawska, C. E., & Rose, J. D. (2000). In vivo degradation of tungsten embolisation coils. *The British journal of radiology*, 73(870), 601-603.

Doğan, M. (2020). Determining the lowest sulfur detection limit in diesel fuel by ultraviolet fluorescence. *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*, 196(1), 47-53.

Haddad, E., & Zikovsky, L. (1985). Determination of Al, As, Co, Cr, Cs, Fe, Mn, Sb, Sc, W and Zn in the workroom air by instrumental neutron activation analysis. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 93(6), 371-378.

Keith, S. (2005). Toxicological profile for tungsten. Agency for Toxic Substances and Disease Registry.

Kim, K. T., Eo, M. Y., Nguyen, T. T. H., & Kim, S. M. (2019). General review of titanium toxicity. *International journal of implant dentistry*, 5(1), 1-12.

Knowles, A. J., Dye, D., Dodds, R. J., Watson, A., Hardie, C. D., & Humphry-Baker, S. A. (2021). Tungsten-based bcc-superalloys. *Applied Materials Today*, 23, 101014.

Mazumder, M. M., De, S., Trigwell, S., Ali, N., Mazumder, M. K., & Mehta, J. L. (2003). Corrosion resistance of polyurethane-coated nitinol cardiovascular stents. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 14(12), 1351-1362.

McInturf, S. M., Bekkedal, M. Y. V., Wilfong, E., Arfsten, D., Chapman, G., & Gunasekar, P. G. (2011). The potential reproductive, neurobehavioral and systemic effects of soluble sodium tungstate exposure in Sprague–Dawley rats. *Toxicology and applied pharmacology*, 254(2), 133-137.

Nyrén, O., McLaughlin, J. K., Gridley, G., Ekblom, A., Johnell, O., Fraumeni Jr, J. F., & Adami, H. O. (1995). Cancer risk after hip replacement with metal implants: a population-based cohort study in Sweden. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*, 87(1), 28-33.

Rae, T. (1981). The toxicity of metals used in orthopaedic prostheses. An experimental study using cultured human synovial fibroblasts. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, 63(3), 435-440.

Sciurba, F. C., Criner, G. J., Strange, C., Shah, P. L., Michaud, G., Connolly, T. A., ... & RENEW Study Research Group. (2016). Effect of endobronchial coils vs usual care on exercise tolerance in patients with severe emphysema: the RENEW randomized clinical trial. *Jama*, 315(20), 2178-2189.

Shih, C. C., Lin, S. J., Chen, Y. L., Su, Y. Y., Lai, S. T., Wu, G. J., & Chung, K. H. (2000). The cytotoxicity of corrosion products of nitinol stent wire on cultured smooth muscle cells. *Journal of Biomedical Materials Research: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, 52(2), 395-403.

Van der Voet, G. B., Todorov, T. I., Centeno, J. A., Jonas, W., Ives, J., & Mullick, F. G. (2007). Metals and health: a clinical toxicological perspective on tungsten and review of the literature. *Military medicine*, 172(9), 1002-1005.

Wild, P., Perdrix, A., Romazini, S., Moulin, J. J., & Pellet, F. (2000). Lung cancer mortality in a site producing hard metals. *Occupational and environmental medicine*, 57(8), 568-573.



Taşkınların Ekonomik Zararlarının Değerlendirilmesi (Samsun-Mert Irmağı Havzası)

Evaluation of Economic Damages of Floods (Samsun-Mert River Basin)

Vahdettin Demir¹, Aslı Ülke Keskin²

¹ KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42020, Konya

² Ondokuzmayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 55139, Samsun

Başyuru/Received: 20/03/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Taşkın nehir yatağında bulunan su miktarının çeşitli sebeplerle kesitine sığamayarak, çevresindeki arazilere, yerleşim yerlerine ve canlılara zarar verdiği doğal bir afettir. Yaşamımızı etkileyen taşkınların maddi ve manevi zararlarını azaltmak için taşkın afet haline getiren mekanizmanın iyi bilinmesi ve taşkın meydana gelmeden önce önlemlerin alınması gerekmektedir. Taşkınlar meydana gelmeden önce taşkınlara eğilimli alanların ve bu alanlara ait ekonomik kayıpların belirlenmesi taşkın yönetim planları için önemlidir. Taşkın yönetiminde en önemli adımlardan biri taşkın modellemesidir. Bu modellemede taşkın yayılım alanı, su yüksekliği, su hızı ve ekonomik kayıpları belirlenebilir. Bu çalışmada, Orta Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Mert Irmağı Havzası'nın 2 boyutlu taşkın modellemesi yapılmıştır. Ülkemizde, taşkınlar sonucunda oluşabilecek ekonomik kayıpları belirlemede kullanılan, hasar fonksiyonları bulunmamaktadır. Bu çalışma ile birçok Avrupa ülkesinde kullanılan yöntemler kullanılarak tahmini ekonomik kayıpları elde edilmiştir. Taşkın modellemesinde 50, 100, 500 ve 1000 yıllık tekerrür süresine sahip debiler kullanılmıştır. Bu debiler HEC-RAS programıyla modellenmiştir. Modellemeler sonucunda ilgili taşkın tekerrür debilerinin çalışma alanında 150 ile 500 milyon ₺ tahmini hasar verebileceği ve 9 ile 12 bin insanın etkilenileceği tespit edilmiştir. Bu tahminler bakanlık raporları ile karşılaştırılarak kullanılan hasar fonksiyonlarının ülkemize uygunluğu araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Taşkın modelleme, Hasar fonksiyonu, HEC-RAS, Samsun-Mert Irmağı”

Abstract

Flood is a natural disaster in which the amount of water in the riverbed cannot fit into its cross-section for various reasons and damages the surrounding lands, settlements and living things. To reduce the material and non-material damages of the floods affecting our lives, the mechanism of the flood disaster must be well known, and measures should be taken before flooding. For flood management plans, it is important to determine the areas that may flood before the floods occur and to determine the economic losses of these areas. One of the most important steps in flood management is flood modeling. In this modeling, flood spread area, water height, water velocity and economic losses can be determined. In this study, two-dimensional flood model of the Mert River Basin, located in the Central Black Sea Region, was investigated. In our country, there are no damage functions used in determining the economic losses that may occur as a result of floods. This study estimated flood risk and economic losses using damage curves models from European countries. Hydraulic model was created by using with HEC-RAS for 50, 100, 500 and 1000 years return period. The study exposes those flows cause an estimated damage of 150-500 million ₺, affect 9 and 12 thousand people. These estimates and comparisons show applicability of the damage functions suggested.

Key Words

“Flood Modeling, Damage function, HEC-RAS, Samsun, Samsun-Mert River”

1. Giriş

Taşkın nehir yatağında bulunan su miktarının; normalden fazla yağmur yağması, mevcut karın hızlıca erimesi, heyelan, barajdan kontrolsüz su bırakılması, nehir yatağının kesitinin değiştirilmesi gibi nedenlerle akarsu yatak kesitine sığamayarak, çevresindeki arazilere, yerleşim yerlerine, alt yapı tesislerine ve canlılara zarar vererek bölgede ekonomik ve sosyal faaliyetleri kesintiye uğratan doğal bir afettir. Dünyada ve ülkemizde can ve mal kayıpları açısından tüm afetler arasında ikinci, meteorolojik afetler arasında ise ilk sırada yer almaktadır (Anılan vd., 2016). Mevcut veriler incelendiğinde taşkınlardan kaynaklanan ekonomik kayıp her yıl yaklaşık olarak 300 milyon TL'dir (Anonim, 2014).

Doğal afetlerden taşkınlar tamamen ortadan kaldırılabilecek bir problem değildir. Bu nedenle, özellikle kentsel alanlarda, nehirlerin aşağı ve yukarı kesimlerinde taşkınlara karşı önleyici tedbirlerin alınması gerekmektedir. Küresel olarak, taşkınları tahmin etmek, etkileri yönetmek ve ilgili hasarı azaltmak için son yıllarda artan bir ilgi söz konusudur. Taşkınların neden olduğu hasarı azaltmak, farklı alanlarda farklı stratejiler gerektirir. Bu nedenle, taşkın riski yönetiminde kullanılan hedefler ve önlemler çeşitlendirilmeli ve bölgeselleştirilmelidir (Hooijer vd., 2004). Taşkın modellemesi ve risk analizinin amacı, taşkınların sebep olabileceği can ve mal kaybı en aza indirmektir (Petrow vd., 2006). Aynı zamanda nehir ekolojisinin korunmasıdır (Rubinato vd., 2019). Taşkın tehlikesinin doğası genellikle nedensellik, diğer bir deyişle taşkın olayının olasılığı ve büyüklüğü ile tanımlanır. Taşkın riski ise, taşkın kırılabilirliğinin bir fonksiyonudur (Merz vd., 2007).

Hızlı ve plansız kentleşme, yetersiz altyapı sistemleri ve iklim değişikliğine bağlı yağış özelliklerindeki değişiklikler ülkemizde ve dünya çapında daha fazla taşkından etkilenecek alanları meydana getirmektedir (Willems vd., 2012). Bu alanlarda taşkınlardan dolayı can kayıpları, yaralanmalar, psikolojik travmalar, sosyal hayatta bozulmalar meydana gelmektedir. Ayrıca taşkınlar kamu ve özel mülkiyetlerde, kanalizasyon gibi alt yapı sistemlerinde ve yol, köprü gibi üst yapı sistemlerinde zarara sebep olabilmektedir (Beden & Ülke Keskin, 2020).

Yaşamımızı etkileyen taşkınların maddi ve manevi zararlarını azaltmak için taşkını afet haline getiren mekanizmanın iyi bilinmesi ve taşkın meydana gelmeden önce önlemlerin alınması gerekmektedir. Akarsu yatağına yapılan müdahaleler, plansız şehirleşme, arazi kullanım şeklinin değişmesi ve iklim değişikliği gibi nedenlerle meydana gelen taşkınların önceden tahmin edilmesi, gözlem değeri yardımıyla istatistiksel analizlerin ve hidrolik modelleme çalışmalarının yapılmasıyla mümkün olmaktadır. Günümüzde bir boyutlu ve iki boyutlu hidrolik hesaplamaların yapıldığı birçok model mevcuttur. Bu modeller, taşkın debilerinin simule edilmesinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Quiroga vd., 2016). Bir boyutlu veya iki boyutlu modellemelerin kullanılması, verilerden elde edilecek sonuç ve veri mevcudiyetine bağlıdır (Beden & Ülke Keskin, 2020). Literatürde bir ve iki boyutlu modellemelerin karşılaştırılmasıyla ilgili birçok çalışma mevcuttur (Horritt & Bates, 2002; Alho & Aaltonen, 2008; Leedal vd., 2010; Vozinaki vd., 2017). Bu çalışmalarda görülen ortak sonuç bir boyutlu modellemenin hızlı, pratik ve uygulanmasının kolay olduğudur. Fakat bir boyutlu modellemeler tek yönde akış modellemesi yapabilmektedir. Bu tek yönlü hesap ise oluşturulmuş kesitler arasında yapılmaktadır. Kesitlerin belirlenmesinde topografyanın karmaşıklığına bağlı olarak yapılacak tanımlama hataları kesitler arasında boşlukların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle de akış kesikli olarak modellenmektedir. Bu durumda bir boyutlu modellemenin karmaşık akış sistemlerine ve karmaşık arazilerde uygulanmasının uygun olmadığı görülmektedir (Huthoff vd., 2015). Bir boyutlu modelleme, sabit akış analizi için uygundur (Bates & De Roo, 2000; Zenger & Wealands, 2004; Cesur, 2007). Karmaşık akış ve arazi sistemlerine sahip alanlarda iki boyutlu modellemeler daha uygundur (Cook & Merwade, 2009). İki boyutlu modelleme ile arazi ve serbest yüzey akışı yüksek çözünürlükte modellenilebilir ve taşkın yayılım haritaları, taşkın hız ve taşkın derinlik haritaları modellenmiş alan boyunca gösterilebilir.

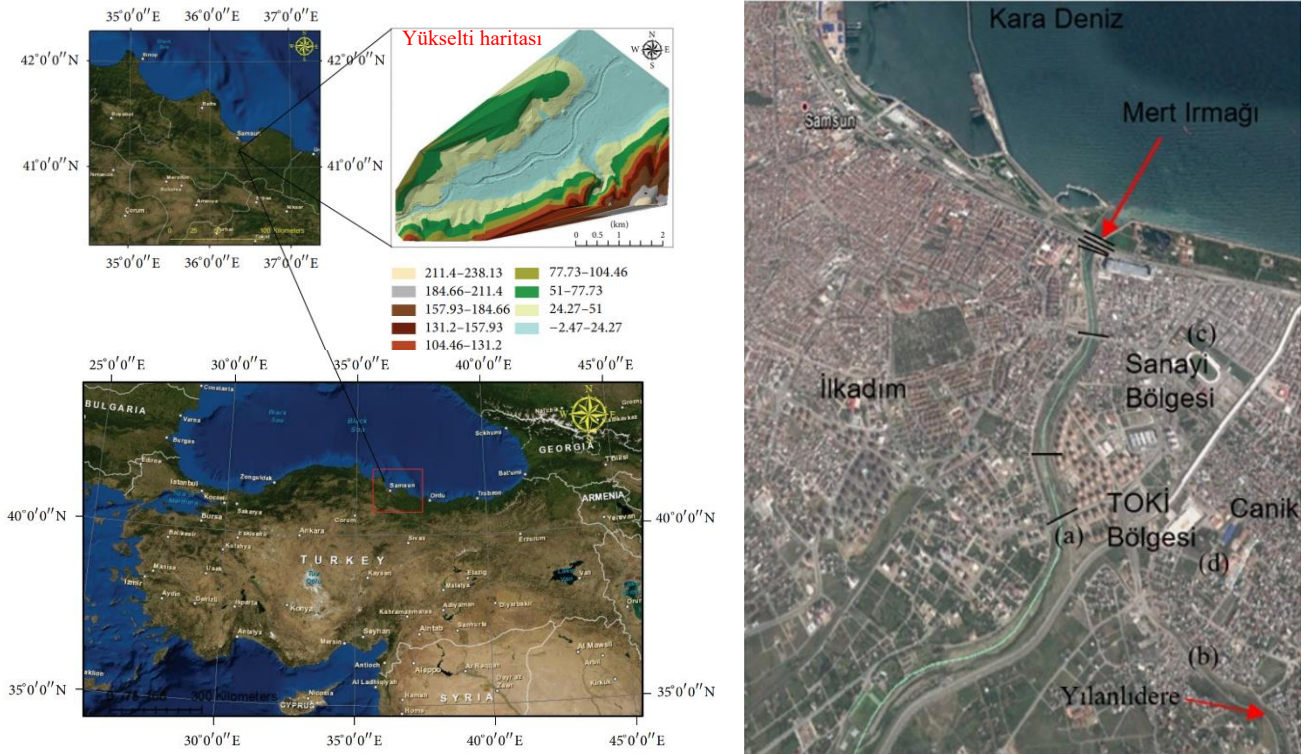
Literatürde Samsun Mert Irmağı havzasında gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde Demir ve Kişi (2016), bölgede bir boyutlu HEC-RAS modellemesi çalışmıştır. Yazarlar, taşkınların kentsel bölgede eğimin azalması nedeniyle su baskını şeklinde meydana geldiğini ve ırmağın sağ yamacında sanayi ve TOKİ bölgesindeki kesitlerin yetersiz olduğunu vurgulamıştır. Ülke vd. (2017) 100 ve 500 yıllık tekerrürlü taşkın debilerini MIKE 1D (1 Boyutlu) ve 2D (2 Boyutlu) programlarıyla modellemiştir. Çalışmada, iki boyutlu modellemede TOKİ bölgesinde ve özellikle sanayi bölgesinde tekerrür debilerinin yayıldığı gösterilmiştir. Bir boyutlu modellemede ise köprülerin modellenen taşkın debilerinden etkilendiği ve nehir yatağının temizlenmesi gerektiği belirtilmiştir. Uslu vd. (2018), 2012 taşkın debisini ve çeşitli tekerrürlü taşkın debilerini HEC-RAS programıyla modellemiştir. Buna göre, taşkından etkilenecek alanların Tip İmar Yönetmeliği'nin 23. maddesine göre; taşkın koruma bandı içinde bulunan yapıların kaldırılarak kentsel dönüşüm planları kapsamına alınması ve bu alanların ağaçlandırılması gerektiğini gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca taşkından etkilenebilecek alanlar için taşkın sigortası kavramının hayata geçirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Beden ve Ülke Keskin (2020), 100, 500 ve 1000 yıllık tekerrürlü taşkın debilerini MIKE programıyla modellemiştir. Modelleme sonucunda taşkın yayılım, derinlik, hız ve tehlike haritaları elde edilmiştir.

Bu çalışmada Türkiye'nin Orta Karadeniz Bölgesi'nde yer alan ve Karadeniz'de akan Mert Irmağı çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Bu bölgede geçmişte birçok büyük taşkın meydana gelmiş ve özellikle de 2012'de yaşanan taşkında, can kayıpları, kamu ve özel mülkiyetlerde büyük zararlar ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı Mert Irmağı havzasında yer alan Mert Irmağı ve yan kolu olan Yılanlıdere'nin geçmiş ve olası taşkınlarını (50, 100, 500 ve 1000 yıllık tekerrürlü taşkın debileri) göz önünde bulundurarak

iki boyutlu taşkın modellemesini yapmak ve taşkın risklerine ait tahmini ekonomik kayıpları belirlemektir. Bu çalışmayla, ülkemizde henüz tanımlanmamış taşkın risklerine ait ekonomik öğeler, geçmiş ve olası taşkınlar göz önünde bulundurularak Huizinga, Van Eck ve Kok, ICBR ve Pistrika ve Jonkman yöntemleri kullanılarak incelenmiştir.

2. Çalışma Alanı

Çalışma alanı olarak Samsun merkez ilçe sınırlarında yer alan ve Karadeniz'e dökülen, Mert Irmağı havzası (havzanın alanı: 814 km², havza uzunluğu: 73 km, eğimi: 0,01029) seçilmiştir. Taşkın modelleme alanı ise Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu alan Mert Irmağı Havzası'nın Karadeniz'e çıkışı yaptığı ve kentsel sınırlar içerisinde kalan bölgesi olup Canik ve İlkadım merkez ilçelerine ait bazı mahalleleri içermektedir. Havzadan gelinerek bu alanın seçilmesinin nedeni, kent sınırlarındaki en değerli ve en önemli alan olması, taşkınımın en fazla yayılabileceği ve tehlike oluşturabileceği alan olması, topografik, meteorolojik ve hidrolik verilerinin ulaşılabilir olmasıdır. Havzanın ana kolu olan Mert Irmağı üzerinde beşi bölünmüş yol köprüsü biri tramvay köprüsü ve biri yaya köprüsü olmak üzere toplam yedi köprü bulunmaktadır. Mert Irmağı'nın birinci, ikinci ve üçüncü köprüleri Karadeniz sahil şeridinde yer almakta ve şehirlerarası karayolu ulaşımında kullanılmaktadır. Dördüncü ve beşinci köprüler ise Mert Irmağı'nın üzerine inşa edilmiş olup Canik ve İlkadım ilçeleri arasındaki karayolu ulaşımında kullanılmaktadır (Demir & Üke Keskin, 2020a, 2020b).



Şekil 1. Çalışma alanı

Samsun ili Canik ilçesinde, 03-04.07.2012 tarihlerinde şiddetli sağanak sebebiyle meydana gelen taşkın sonucunda 14 kişi yaşamını yitirmiş ve büyük maddi hasar meydana gelmiştir (Anonim, 2014). 2012 taşkını sonrası etkilenen bölgeler Şekil 1'de yer alan plan üzerine işaretlenmiş (a, b, c ve d) ve Şekil 2'de taşkının yıkıcı etkisini gösteren bazı resimler gösterilmiştir.



Şekil 2. 2012 taşkını sonrası çalışma alanından görüntüler (Anonim, 2014).

3. Yöntem

3.1. HEC-RAS 2D

HEC-RAS 2D yazılımı Hydrologic Engineering Center River Analysis System (HEC-RAS) 2D, Birleşik Devletler Ordusu Mühendisler Birliği tarafından geliştirilmiş 2 boyutlu yüzeysel akışı modelleyebilen bir programdır. Bu amaçla geliştirilen yazılım Eş.1-3'te verilen Saint-Venant denklemlerini sayısal yöntemlerle çözmektedir (Quiroga vd., 2016).

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(zu)}{\partial x} + \frac{\partial(zv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(zu)}{\partial t} + \frac{\partial(zu^2 + gz^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial(zuv)}{\partial y} = gz(S_{0x} - S_{fx}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(zu)}{\partial t} + \frac{\partial(zuv)}{\partial x} + \frac{\partial(zv^2 + gz^2/2)}{\partial y} = gz(S_{0y} - S_{fy}) \quad (3)$$

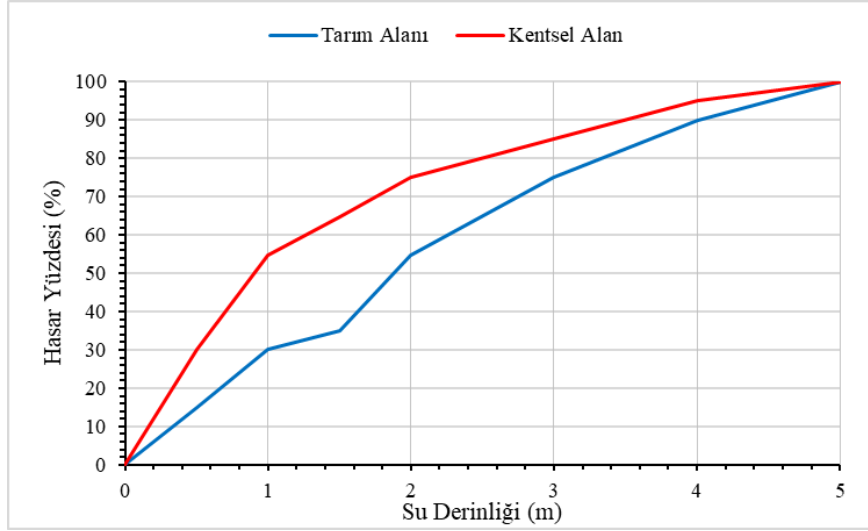
Burada, 1 numaralı eşitlik süreklilik denklemidir. 2 ve 3 numaralı eşitlikler ise sırasıyla x ve y yönleri için geçerli momentum denklemleridir. Eşitliklerde z (m) su yüzeyi yüksekliği, u (m/s) ve v (m/s) sırasıyla x ve y yönlerinde hız bileşenleri, g (m/s²) yerçekimi ivmesi, S_{0x} ve S_{fx} x yönünde su yüzeyi gradyanı ve sürtünme direnci, S_{0y} ve S_{fy} ise y yönünde su yüzeyi gradyanı ve sürtünme direncidir (Kamboh vd., 2016).

Hasar Tespiti (Derinlik-Zarar Fonksiyonları)

Türkiye'de taşkınlar için herhangi bir derinlik-zarar (veya derinlik-hasar) fonksiyonu geliştirilmemiştir. Bu sebeple ülkemiz için derinlik-zarar fonksiyonu geliştirilinceye kadar uluslararası literatürden ülkemize uygun ve genel kabul görmüş derinlik-zarar fonksiyonları kullanılabilir (Bakanlık, 2020). Bir taşkının sebep olduğu mülkiyet zararlarının değerlendirilmesi için, taşkın yayılma haritası ile taşkın derinlik haritası birleştirilerek ayrıntılı bir arazi örtüsü haritası hazırlanmalıdır. Ön bir zarar değerlendirmesi ve taşkınların doğru olarak modellenmesi için; bu harita üzerinde özel mülkler, tarımsal araziler ve altyapı tesisleri belirtilmelidir. Beklenen taşkın zararı, çoğu defa, ortalama derinlik-zarar fonksiyonları şeklinde ifade edilir. Bu fonksiyonlar, genellikle, değerli varlıklarda (binalar, işyerleri, araçlar, yollar vb. altyapı tesisleri) oluşan zararları veya zarar yüzdelere (oranlarını) su derinliğine bağlı

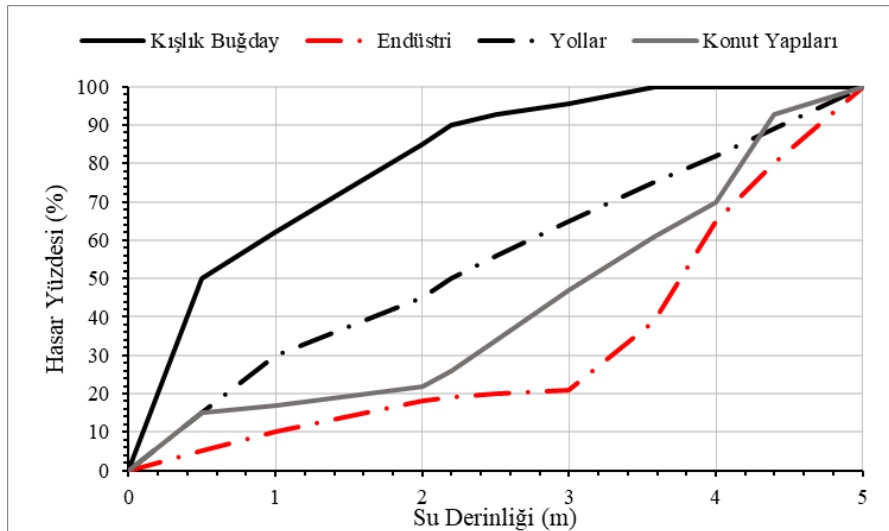
olarak gösterir. Bu fonksiyonların kullanılması çeşitli taşkın senaryolarının analiz edilmesi ve taşkın zararlarını azaltma önlemlerinin etkinliğinin incelenmesi gibi önemli avantajlar sağlamaktadır. Derinlik-zarar eğrilerinin belirlenmesi uzun çalışmalar gerektirir. Önemli olan böyle bir ilişkinin çıkartılabilmesidir. En büyük dezavantajlarından birisi, bu ilişkinin sadece incelenen bölge için geçerli olmasıdır. Doğru bir değerlendirmeye varabilmek için, incelenecek her alana ait ayrı bir derinlik-zarar eğrisi çıkarılmalıdır. FIA (Federal Insurance Administration) bu açığı kapatmak için geliştirilmiş derinlik-zarar eğrilerini geliştirmiştir ve bu eğriler her sene güncellenmektedir. Önceki çalışmalarda yapılan çalışmaların çoğunda bu geliştirilmiş ilişki kullanılmasına rağmen müstakil olarak çıkarılmış derinlik-zarar eğrileri de mevcuttur (Serencam, 2013; Beden, 2019).

Bu çalışmada Huizinga, Van Eck ve Kok, ICBR (International Commission for the Protection of the Rhine) Rhine Atlas yöntemi derinlik-zarar eğrileri ve Pistrika ve Jonkman'ın zarar analizi kullanılmıştır (ICBR, 2001; Van Eck & Kok, 2001; Huizinga, 2007; Pistrika & Jonkman, 2010). Derinlik-zarar eğrileri; Huizinga yöntemi için Şekil 3'te, Van Eck ve Kok yöntemi için Şekil 4'te ve ICBR yöntemi için Şekil 5'te yer almaktadır.



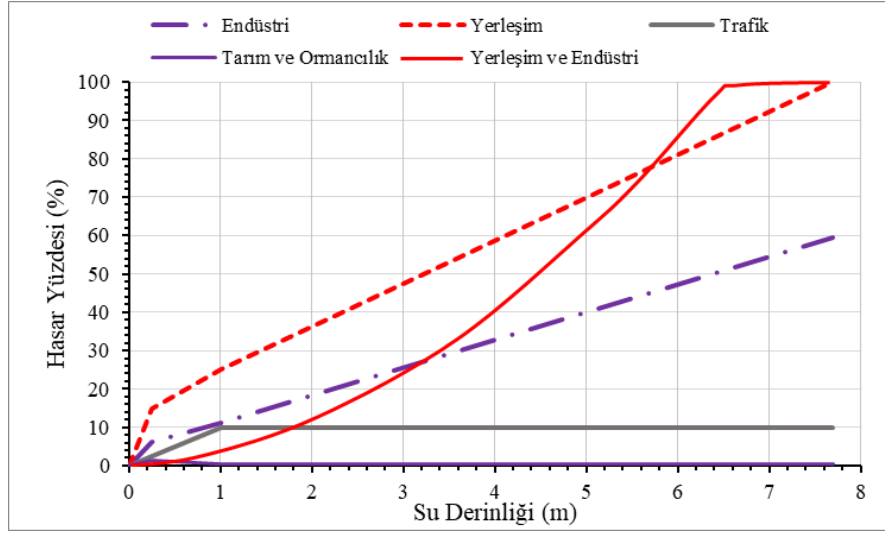
Şekil 3. Huizinga (2007)'nin derinlik-hasar eğrileri

Huizinga (2007)'nin derinlik-hasar eğrisi kentsel alan ve tarım alanı olmak üzere iki kategori içermektedir.



Şekil 4. Van Eck ve Kok (2001)'ün derinlik-hasar eğrileri

Van Eck ve Kok'in derinlik-hasar eğrileri endüstri, konut yapıları, yollar ve kışık buğday olmak üzere dört kategori içermektedir. de Moel ve Aerts'in çalışmalarında yer verdiği ICBR tarafından üretilmiş derinlik-hasar eğrilerinde trafik, tarım ve ormancılık, endüstri, yerleşim, endüstri-yerleşim olarak beş kategori yer almıştır (de Moel & Aerts, 2011).



Şekil 5. ICBR'nin derinlik-hasar eğrileri

Pistrika ve Jonkman, 2005 yılında meydana gelen Katrina kasırgasının neden olduğu büyük felakette New Orleans'ta sular altında kalan yapılara yönelik hasar analizi yapmıştır. Yazarlar, bu analiz için kamuya ait verileri alarak taşkın özellikleri ile ekonomik zarar arasındaki ilişkiyi araştırmıştır (Pistrika & Jonkman, 2010). Buna göre, ekonomik zararı bulmak için taşkın derinliğini ve hızını kullanarak,

$$D = 0,457 + 0,06dv^{0,654} \quad (4)$$

4 numaralı eşitliği elde etmiştir. Burada, D taşkın zarar faktörü (%), d taşkın derinliği (m), v taşkın hızıdır (m/s). Bu yöntemde diğerlerinden farklı olarak taşkın hızı da hesaba dahil edilmektedir. Çalışmada Q_{50} , Q_{100} , Q_{500} ve Q_{1000} debilerinin meydana getireceği zararların tahmininde risk altındaki varlıkların (yapılar) hasar faktörleri/dereceleri yukarıda anılan yöntemler ile bulunmuş ve varlıkların değerleri ile çarpılarak muhtemel hasarlar tahmin edilmiştir.

4. Uygulama

Taşkın modellemesi birtakım süreçleri içerir. Modelleme için öncelikle sayısal bir yükseklik modeli, nehir veya kanal boyunca kesitler, farklı dönüş süreleri için hesaplanan taşkın tekerrür debileri, çalışma alanına ait halihazır haritalar ve Manning sürtünme katsayıları gerekir. Bu çalışmada sadece ekonomik kayıplar üzerine yoğunlaşmış olup diğer veriler, özellikleri ve hesaplama detayları ile sonuçları yazarlar tarafından daha önce yayınlanan makalelerde (Demir & Ülke Keskin, 2019, 2020b, 2021) ve Demir (2020) tez çalışmasında yer almaktadır.

- Çalışmada sayısal yükseklik modeli ilçe belediyelerinden temin edilen 1/1000 ölçekli halihazır haritalardan oluşturulmuştur (Şekil 1).
- Nehir kesitleri DSİ'den temin edilmiştir.
- Mert Irmağı üzerinde yer alan akım gözlem istasyonunda 2007'den günümüze kadar akım verileri bulunmaktadır. Fakat elde edilen veriler taşkın tekerrür debilerinin istatistiksel yöntemlerle hesaplanması için yeterli uzunluğa sahip değildir (Beyazıt, 1981, Çıtakoğlu vd., 2017). Bu nedenle yağış-akış modeline dayalı sentetik birim hidrograf yöntemleri kullanılarak farklı tekerrürlü taşkın debileri hesaplanmıştır. Taşkın tekerrür debileri havza alanı ve karakteristik özelliklerine göre Mert Irmağı için DSİ sentetik hidrograf yöntemine göre hesaplanmıştır. Yıllıklı dere üzerinde ise herhangi bir akım gözlem istasyonu bulunmadığından buradaki taşkın tekerrür debileri havza alanının büyüklüğüne göre Mockus yöntemine göre belirlenmiştir. Mockus yöntemi, hesabının pratikliği ve üçgen hidrografının çizim kolaylığı nedeniyle genellikle tekerrür debilerinin elde edilmesinde tercih edilmektedir. Üçgen hidrograflar, rezervuarlarda ve akarsu yataklarındaki ötelemelerde de eğrisel hidrograflar kadar hassas neticeler vermekte, sadece hidrograf kuyruğunun projelendirmeye tesir ettiği hallerde eğrisel hidrograflar zorunlu olmaktadır. Ayrıca üçgen hidrografların eğrisel hidrograflara dönüştürülmesi hassasiyetleri bozulmadan mümkün olmaktadır. Yöntemde, toplanma zamanı (tc) 30 saate kadar olan drenaj alanları için uygulanabilmekte, daha büyük alanlarda drenaj alanı tali parçalara ayrılarak her bir parça için çizilecek hidrograflar geciktirme sürelerine göre süperpoze edilmektedir (Aslan, 1997). Ayrıca çalışma alanı 1000 km²'ye kadar olan alanlarda Mockus yönteminin kullanılması önerilmektedir (Özdemir, 1978).

Tablo 2. Taşkın etkilerine maruz kalan yapıların yaklaşık maliyetleri

Bölge/Debi	Taşkın etki alanındaki toplam alan (m ²)				Taşkın etki alanındaki toplam maliyet (₺)			
	Q ₅₀	Q ₁₀₀	Q ₅₀₀	Q ₁₀₀₀	Q ₅₀	Q ₁₀₀	Q ₅₀₀	Q ₁₀₀₀
Liman-Park	21.780	24.983	28.186	29.467	17.702.784	20.306.182	22.909.581	23.950.778
Sanayi-Konut	376.204	394.140	426.811	443.466	354.233.686	371.122.224	401.885.238	417.567.586
Memba-Konut	46.763	63.419	92.246	101.214	29.928.320	40.588.160	59.037.440	64.776.960
Konutlar	203.512	203.512	203.512	203.512	12.954.957	212.954.957	12.954.957	12.954.957
Piazza AVM	24.366	24.366	24.366	24.366	32.007.178	32.007.178	32.007.178	32.007.178
Toplam	672.625	710.420	775.121	802.025	646.826.925	676.978.701	728.794.393	751.257.458

Daha önce görüldüğü gibi Huizinga'nın derinlik-hasar eğrileri tarımsal ve kentsel alanları kapsamaktadır. Çalışmamızda bu yöntem ile yapılan hesaplamalarda taşkına maruz kalan alanlar “kentsel alan” olarak seçilmiştir. Buna göre meydana gelen tahmini zararlar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Huizinga'ya göre toplam taşkın zarar tahmini

Bölge/Debi		Q ₅₀	Q ₁₀₀	Q ₅₀₀	Q ₁₀₀₀
Liman-Park	Derinlik (m)	0,957	1,207	1,192	1,334
	Hasar (%)	30	30	32	34
	Maliyet (₺)	17.702.784	20.306.182	22.909.581	23.950.778
	Toplam Zarar (₺)	5.310.835	6.091.855	7.331.066	8.143.264
	Derinlik (m)	1,194	1,314	1,62	1,854
Sanayi-Konut	Hasar (%)	32	33	38	49
	Maliyet (₺)	354.233.686	371.122.224	401.885.238	417.567.586
	Toplam Zarar (₺)	113.354.780	122.470.334	152.716.390	204.608.117
	Derinlik (m)	2,007	1,88	1,934	2,06
	Hasar (%)	55	50	54	56
Memba-Konut	Maliyet (₺)	29.928.320	40.588.160	59.037.440	64.776.960
	Toplam Zarar (₺)	16.460.576	20.294.080	31.880.218	36.275.098
	Derinlik (m)	1,7	1,9	2,1	2,2
	Hasar (%)	41	50	56	58
	Maliyet (₺)	212.954.957	212.954.957	212.954.957	212.954.957
Konutlar	Toplam Zarar (₺)	87.311.532	106.477.478	119.254.776	123.513.875
	Derinlik (m)	3,2	3,6	3,9	4,2
	Hasar (%)	79	84	87	91
	Maliyet (₺)	32.007.178	32.007.178	32.007.178	32.007.178
	Toplam Zarar (₺)	25.285.670	26.886.029	27.846.245	29.126.532
Çalışma Alanı Toplam Zarar (₺)		247.723.393	282.219.776	339.028.694	401.666.885

Tablo 3 incelendiğinde, Q₅₀'de toplam zarar yaklaşık 247 milyon ₺, Q₁₀₀'de 282 milyon ₺, Q₅₀₀'de 339 milyon ₺ ve son olarak Q₁₀₀₀'de 401 milyon ₺'dir.

Bir diğer yöntem olan Van Eck ve Kok'un derinlik-hasar eğrilerinin kullanımında tüm bölgeler “konut yapıları” olarak alınmıştır. Buna göre çalışma alanında meydana gelen zararlar Tablo 4'te verilmiştir. Diğer taraftan, ICBR yöntemi derinlik-hasar eğrilerinin kullanımında tüm bölgeler “yerleşim” olarak alınmıştır. Buna göre çalışma alanında meydana gelen zararlar Tablo 5'te yer almaktadır.

Tablo 4. Van Eck ve Kok'a göre toplam taşkın zarar tahmini

Bölge/Debi		Q ₅₀	Q ₁₀₀	Q ₅₀₀	Q ₁₀₀₀
Liman-Park	Derinlik (m)	0,957	1,207	1,192	1,334
	Hasar (%)	18	19	19,5	20
	Maliyet (₺)	17.702.784	20.306.182	22.909.581	23.950.778
	Toplam Zarar (₺)	3.186.501	3.858.175	4.467.368	4.790.156
Sanayi-Konut	Derinlik (m)	1,194	1,314	1,62	1,854
	Hasar (%)	19,5	19,9	20,5	21
	Maliyet (₺)	354.233.686	371.122.224	401.885.238	417.567.586
	Toplam Zarar (₺)	69.075.569	73.853.323	82.386.474	87.689.193
Membra-Konut	Derinlik (m)	2,007	1,88	1,934	2,06
	Hasar (%)	23	21,5	22,5	25
	Maliyet (₺)	29.928.320	40.588.160	59.037.440	64.776.960
	Toplam Zarar (₺)	6.883.514	8.726.454	13.283.424	16.194.240
Konutlar	Derinlik (m)	1,7	1,9	2,1	2,2
	Hasar (%)	21	23	23,5	25
	Maliyet (₺)	212.954.957	212.954.957	212.954.957	212.954.957
	Toplam Zarar (₺)	44.720.541	48.979.640	50.044.415	53.238.739
Piazza	Derinlik (m)	3,2	3,6	3,9	4,2
	Hasar (%)	53	62	66	79
	Maliyet (₺)	32.007.178	32.007.178	32.007.178	32.007.178
	Toplam Zarar (₺)	16.963.804	19.844.450	21.124.737	25.285.670
Çalışma Alanı Toplam Zarar (₺)		140.829.929	155.262.042	171.306.418	187.197.998

Tablo 4 incelendiğinde, Q₅₀'de toplam zarar yaklaşık 140 milyon ₺, Q₁₀₀'de 155 milyon ₺, Q₅₀₀'de 171 milyon ₺ ve son olarak Q₁₀₀₀'de 187 milyon ₺'dir.

Tablo 5. ICBR Yöntemi'ne göre toplam taşkın zarar tahmini

Bölge/Debi		Q ₅₀	Q ₁₀₀	Q ₅₀₀	Q ₁₀₀₀
Liman-Park	Derinlik (m)	0,957	1,207	1,192	1,334
	Hasar (%)	24	25	27	29
	Maliyet (₺)	17.702.784	20.306.182	22.909.581	23.950.778
	Toplam Zarar (₺)	4.248.668	5.076.546	6.185.587	6.945.726
Sanayi-Konut	Derinlik (m)	1,194	1,314	1,62	1,854
	Hasar (%)	27	28	31	34
	Maliyet (₺)	354.233.686	371.122.224	401.885.238	417.567.586
	Toplam Zarar (₺)	95.643.095	103.914.223	124.584.424	141.972.979
Membra-Konut	Derinlik (m)	2,007	1,88	1,934	2,06
	Hasar (%)	35,5	34	35	36
	Maliyet (₺)	29.928.320	40.588.160	59.037.440	64.776.960
	Toplam Zarar (₺)	10.624.554	13.799.974	20.663.104	23.319.706
Konutlar	Derinlik (m)	1,7	1,9	2,1	2,2
	Hasar (%)	32	35	38	38
	Maliyet (₺)	212.954.957	212.954.957	212.954.957	212.954.957
	Toplam Zarar (₺)	68.145.586	74.534.235	80.922.884	80.922.884
Piazza	Derinlik (m)	3,2	3,6	3,9	4,2
	Hasar (%)	48	55	58	62
	Maliyet (₺)	32.007.178	32.007.178	32.007.178	32.007.178
	Toplam Zarar (₺)	15.363.445	17.603.948	18.564.163	19.844.450
Çalışma Alanı Toplam Zarar (₺)		194.025.349	214.928.925	250.920.161	273.005.744

Tablo 5 incelendiğinde, Q₅₀'de toplam zarar yaklaşık 194 milyon ₺, Q₁₀₀'de 214 milyon ₺, Q₅₀₀'de 250 milyon ₺ ve son olarak Q₁₀₀₀'de 273 milyon ₺'dir.

Pistrika ve Jonkman'a göre taşkından etkilenen binalar çevresindeki maksimum hızların ortalaması Tablo 6'da, tahmini zararlar ise Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 6. Pistrika ve Jonkman'a göre maksimum hızların ortalaması

Bölge/Debi	Q ₅₀	Q ₁₀₀	Q ₅₀₀	Q ₁₀₀₀
Liman-Park	0,465	0,526	0,655	0,761
Sanayi-Konut	0,634	0,715	0,906	1,043
Memba-Konut	1,279	1,253	1,377	1,51
Konutlar	2,201	2,404	2,404	2,401
Piazza AVM	2,201	2,400	1,680	4,00

Tablo 7. Pistrika ve Jonkman'a göre toplam taşkın zarar tahmini

Bölge/Debi	Q ₅₀	Q ₁₀₀	Q ₅₀₀	Q ₁₀₀₀	
Liman-Park	Derinlik (m)	0,957	1,207	1,192	1,334
	D (%)	0,49	0,51	0,51	0,53
	Maliyet (₺)	17.702.784	20.306.182	22.909.581	23.950.778
	Toplam Zarar (₺)	8.737.029	10.294.306	11.774.213	12.629.116
Sanayi-Konut	Derinlik (m)	1,194	1,314	1,62	1,854
	D (%)	0,51	0,52	0,55	0,58
	Maliyet (₺)	354.233.686	371.122.224	401.885.238	417.567.586
	Toplam Zarar (₺)	181.663.648	194.272.849	222.113.600	240.962.691
Memba-Konut	Derinlik (m)	2,007	1,88	1,934	2,06
	D (%)	0,61	0,59	0,61	0,63
	Maliyet (₺)	29.928.320	40.588.160	59.037.440	64.776.960
	Toplam Zarar (₺)	18.122.159	24.120.105	35.847.327	40.610.332
Konutlar	Derinlik (m)	1,7	1,9	2,1	2,2
	D (%)	0,64	0,67	0,69	0,70
	Maliyet (₺)	212.954.957	212.954.957	212.954.957	212.954.957
	Toplam Zarar (₺)	135.516.747	142.510.177	147.266.995	149.645.403
Piazza	Derinlik (m)	3,2	3,6	3,9	4,2
	D (%)	0,79	0,86	0,80	1,11
	Maliyet (₺)	32.007.178	32.007.178	32.007.178	32.007.178
	Toplam Zarar (₺)	25.433.713	27.496.392	25.668.189	35.596.605
Çalışma Alanı Toplam Zarar (₺)	369.473.296	398.693.829	442.670.324	479.444.147	

Tablo 7 incelendiğinde, Q₅₀'de toplam zarar yaklaşık 369 milyon ₺, Q₁₀₀'de 398 milyon ₺, Q₅₀₀'de 442 milyon ₺ ve son olarak Q₁₀₀₀'de 479 milyon ₺'dir.

Alana oranla en büyük zararlar TOKİ yerleşim yerlerinin de yer aldığı konutlar bölgesinde ve Piazza AVM bölgesinde görülmektedir.

Taşkın zarar tahmini ekonomik öğelerin yanında olası taşkınlardan etkilenebilecek insan sayısı üzerinden de yapılmıştır. Çalışma alanı olan Canik - İlkadım merkez ilçelerinde yer alan mahallelerin nüfus bilgilerine göre taşkınlardan etkilenebilecek nüfus için tahminler yapılmıştır (Canik, 2020; İlkadım, 2020). Çalışma alanında, taşkından etkilenen insanların sayısı; farklı tekerrür debileri için taşkın yayılım alanlarının mahallelerle çakıştırılmasıyla elde edilen bölgesel alan-mahalle nüfusu doğrusal ilişkisine göre yaklaşık olarak tespit edilmiştir. Mahallelerdeki nüfusun alana homojen dağıldığı varsayımı yapılmıştır. Göz önüne alınan taşkın tekerrür debilerine göre etkilenen nüfus bilgileri Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Taşkınlardan etkilenen tahmini nüfus değerleri

Taşkın Debisi	Nüfus (kişi)
Q ₅₀	8.510
Q ₁₀₀	9.434
Q ₅₀₀	10.917
Q ₁₀₀₀	11.841

Tablo 8'de verilen olası taşkınlardan etkilenebilecek nüfusların yüzdeleri incelendiğinde, Q₅₀'de bölge nüfusunun %1,98'inin etkilenebileceği görülmüştür. Bu değer Q₁₀₀₀'de %2,75'e kadar çıkmaktadır. Kişi sayıları incelendiğinde Q₅₀'de yaklaşık 9 bin insanın

etkilenebileceği görülmüştür. Bu değer Q_{1000} 'de 12 bin'e kadar çıkmaktadır. Q_{1000} gibi taşkınların görülme olasılığı çok düşük olsa da Q_{50} gibi taşkınların Karadeniz Bölgesi'nde görülme olasılığı oldukça yüksektir (Beden, 2019, 2021). Q_{50} debisi meydana geldiğinde ilgili bölgedeki nüfusun yaklaşık %2'sinin etkilenebilecek olması çalışma alanı için ciddi önemlerin alınması gerektiğini göstermektedir.

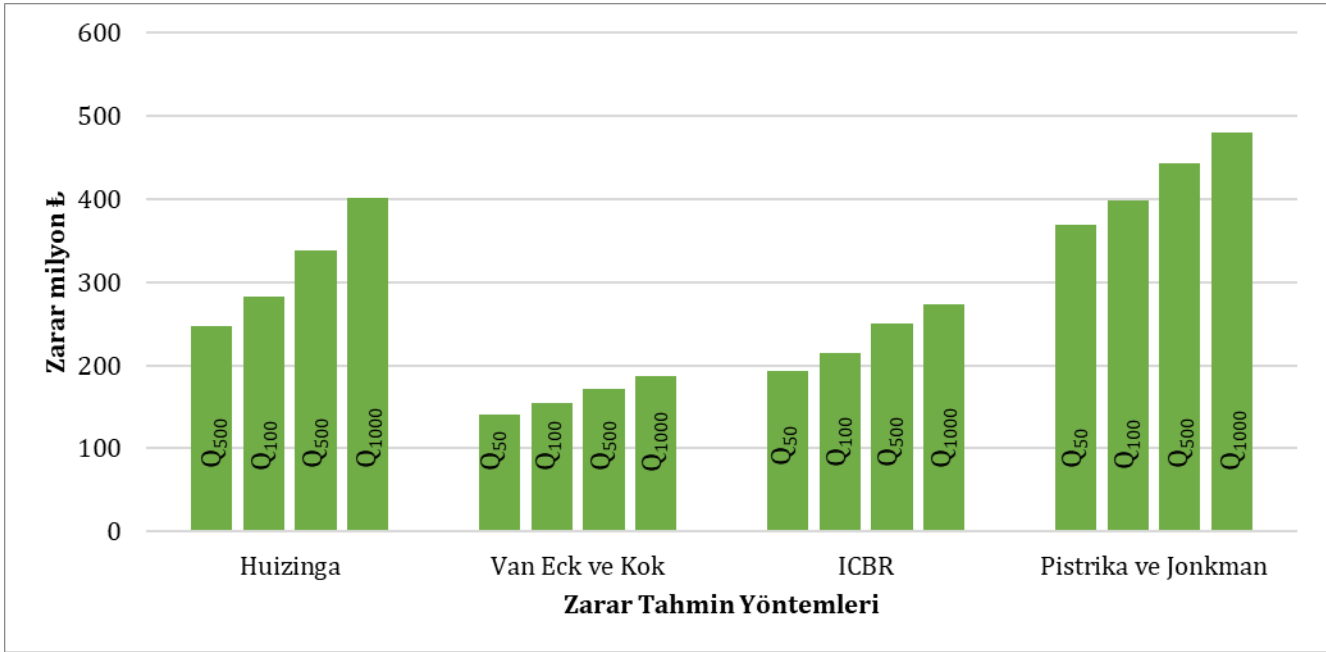
5. Tartışma

Bu çalışmada HEC-RAS 2D yazılımı ile taşkın modellenmesi yapılmıştır. Modelleme sonucunda taşkın haritaları elde edilmiştir ve taşkınlar nedeniyle oluşabilecek zararlar tahmin edilmiştir. Bu çalışma alanı ve literatürde yer alan diğer başka çalışmaların birçoğunda taşkınlar modellendikten sonra taşkın hasarlarına ait zararlar incelenememektedir. Bunun temel nedeni ise ülkemizde derinlik-hasar çalışmalarının yeni yeni çalışılan konular olmasıdır. Bu çalışma ile hem HEC-RAS 2D modellenmesi hem de hasar tahmin çalışmaları bölgede ilk kez yapılmıştır. Taşkın yayılım, hız, derinlik, tehlike ve risk haritalarının yanında bu haritalarda olayın büyüklüğünü anlamlı kılacak zararların da belirlenmesi, taşkınların yıkıcı etkilerini anlamak için büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Su Yönetimi Genel Müdürlüğü tarafından 2015 yılında hazırlanan “Yeşilirmak Havzası Taşkın Yönetim Planı” raporu ile karşılaştırılmıştır. Raporda elde edilen sonuçların 2014 yılı nüfus bilgilerine göre ve Mert Irmağı için yapılan taşkın modellenmesi ve 2013 yılında DSİ tarafından hazırlanan “Taşkın Tehlike Alanlarının Belirlenmesi” planlama raporlarından alındığı belirtilmiştir (Bakanlık, 2020). Rapora göre, Samsun Mert Irmağı havzası Q_{100} , Q_{500} ve Q_{1000} taşkın debileri için öncelikli riskli bölgelerdendir. Söz konusu raporda, risklerin belirlenmesinde ülkemizde herhangi bir tanımlı yöntem olmadığı için Avrupa ülkelerinde kullanılan hasar fonksiyonları kullanılmış ancak hangi yöntem(ler) olduğu belirtilmemiştir. Taşkın etki şiddeti ve tekrerrüne göre sağlık, çevre, kültürel miras ve ekonomik risklere göre Yeşilirmak Havzası'nda incelenen 20 nehrin önem sırasına göre Samsun Mert Irmağı Q_{50} debisine göre 16. sırada Q_{100} debisine göre 3. sırada, Q_{500} debisine göre 5. sırada, Q_{1000} debisine göre ise 8. sırada yer almaktadır. Mert Irmağı'nda şiddetli taşkınların ve çok yüksek hasarların yaşandığı belirtilmekte ve yıllık 12 milyon ₺'lik hasar beklentisi öngörülmektedir. Havzadaki taşkından etkilenen insanların beklenen yıllık sayıları bağlamında Samsun'un tehlikenin en fazla olduğu yerleşim yeri olduğu görülmektedir. Mert Irmağı için tahmini etkilenen nüfus sayıları 2014 nüfus verine göre; Q_{100} için 6.119 kişi, Q_{500} için 10.254 ve Q_{1000} için 14.733 kişidir (Bakanlık, 2020). Taşkın zararları ise tekerrür debilerine ve 2013 yılında DSİ tarafından hazırlanan rapora göre; Q_{100} için 297 milyon ₺, Q_{500} için 420 milyon ₺, Q_{1000} için 600 milyon ₺ şeklindedir. Mert Irmağı için yıllık ortalama taşkından etkilenen insan sayısı 111 olarak belirtilmiş ve havzada Terme çayı (238), Çorum merkez (209), Samsun Batı (189) nehirlerinden sonra 4. sıradadır. Havzada taşkından etkilenen toplam yıllık beklenti ise 1237 kişidir. Mert Irmağı taşkınları için yıllık ortalama tahmini zarar ise 4,95 milyon ₺'dir. Olası taşkınlardan etkilenebilecek tahmini kişi sayıları Tablo 9'da karşılaştırılmıştır.

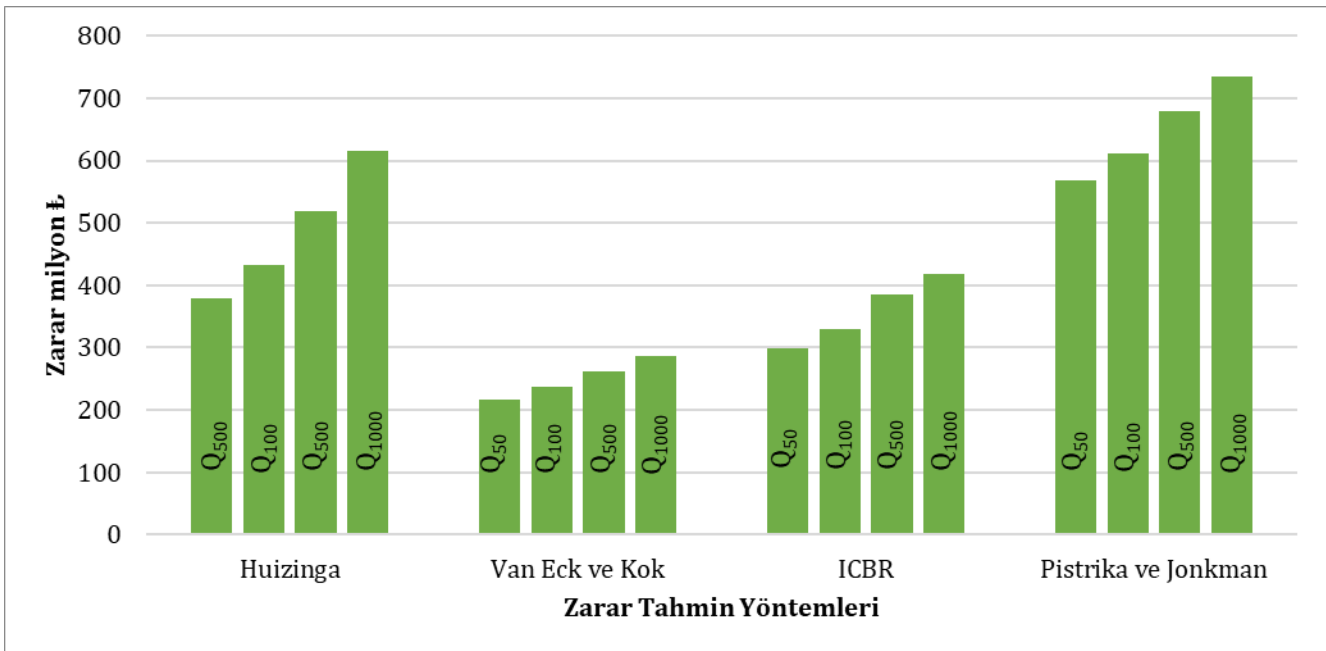
Tablo 9. Taşkınlardan etkilenen tahmini nüfus sayılarının karşılaştırması

Taşkın Debisi	HEC-RAS 2D	Rapor
Q_{50}	8.510	-
Q_{100}	9.434	6.119
Q_{500}	10.917	10.254
Q_{1000}	11.841	14.733

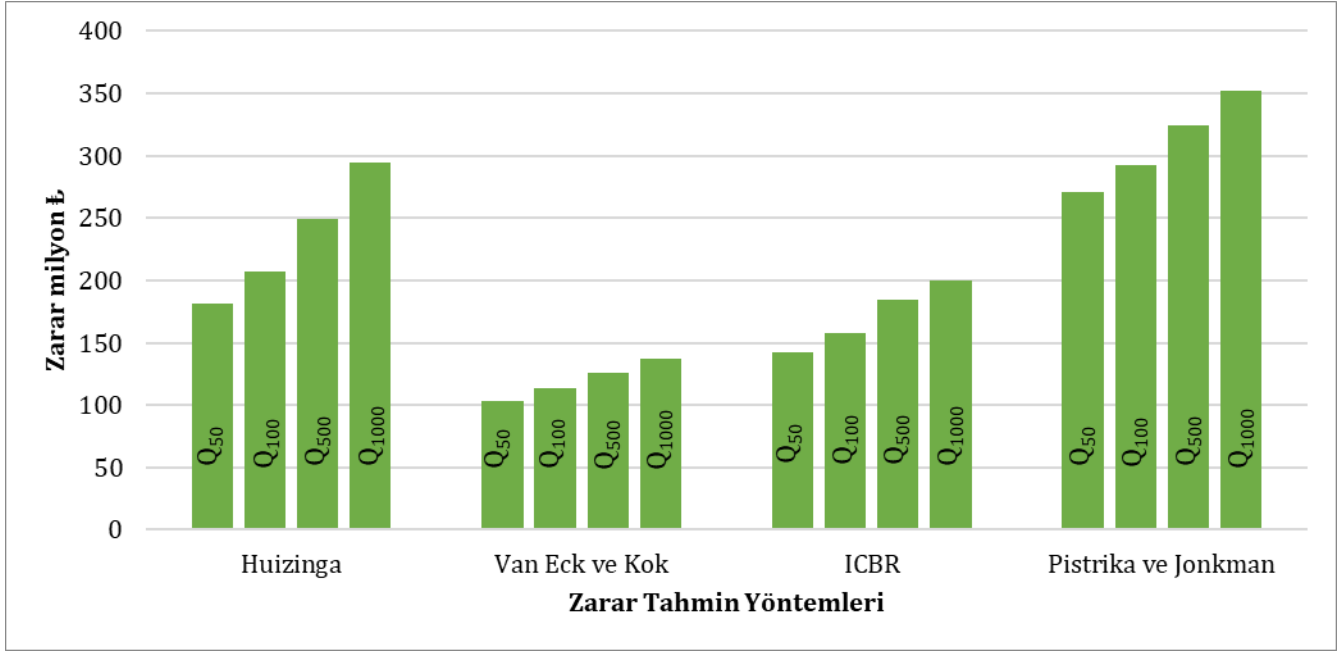
Tablo 9'da modellemeler sonucunda elde edilen tekerrür debileri - etkilenebilecek nüfus sayılarına bakıldığında Q_{100} debisinde modeller daha fazla nüfus tahmin etmiş, Q_{500} debisinde sonuçlar birbirine 1-2 bin kişi kadar yaklaşmış, Q_{1000} debisinde ise rapordan daha düşük sayılar elde edilmiştir. 2014 ile 2018 yılları arası ilçe nüfuslarında artış da göz önüne alındığında sonuçların daha da yaklaşacağı düşünülmektedir. Nüfusun bölgesel artış hızının tam olarak bilinmemesi bu farkın sebebi olarak düşünülmektedir. Ayrıca, 2018, 2020 ve 2015 (rapor yayınlanma yılı) yıllarına ait taşkın zararları sırasıyla Şekil 7, 8 ve 9'da karşılaştırılmıştır. Raporda tahmini zararların hangi yıla ait yapı maliyetleriyle ve birim fiyatları ile yapıldığı hakkında bilgi yer almamaktadır. Bu bölümde sonuçların değerlendirilmesi üç farklı (2015, 2018, 2020) yıla ait birim fiyatlar üzerinden değerlendirilmiştir. Buna göre, mimarlık ve mühendislik hizmet bedellerinin hesabında kullanılacak 2015, 2018 ve 2020 yılları için yapı yaklaşık birim maliyetleri hakkında resmi tebliğlere göre yapı birim maliyetleri göz önüne alınmıştır. Bu yılların seçilme sebepleri; (i) “Yeşilirmak Havzası Taşkın Yönetim Planı” 2015 yılında yayınlandığından bu yıla ait modelden elde edilen sonuçlarla rapor sonuçları karşılaştırılmıştır, (ii) Taşkın modellemeleri 2018 yılı verileriyle gerçekleştirildiğinden bu yıla ait yapı birim maliyetleri kullanılmıştır, (iii) 2020 yılı verileri ise güncel yapı birim maliyetlerini içerdiği için güncel verilerle de sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 7. 2018 yılı için tahmini taşkın zararların karşılaştırılması



Şekil 8. 2020 yılı için tahmini taşkın zararların karşılaştırılması



Şekil 9. 2015 yılı için tahmini taşkın zararların karşılaştırılması

Şekil 9 incelendiğinde, 2015 yılından 2018 yılına yapı yaklaşık maliyetlerinin %50-%70 oranında arttığı göz önüne alınarak, çalışma alanı için Pistrika ve Jonkman zarar tahmin yönteminin daha uyumlu olduğu düşünülmektedir. Burada kullanılan yöntemlerden elde edilen sonuçlar ile rapor çıktıları arasındaki farklılığın başlıca sebepleri çalışmada kullanılan veri ve yöntemlerden kaynaklanan belirsizlikler olarak sıralanabilir. Öncelikle, çalışma yılının farklı olması model girdi ve çıktıları (yağış ve akış) dolayısıyla modelleme sonuçlarını değiştirmektedir. Diğer taraftan, Manning değerlerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemin ve yapı yaklaşık maliyetleri için hangi yılın baz alındığının bilinmemesi bir diğer belirsizlik kaynağıdır. Bu çalışmada yıpranma payı %20 olarak alınmıştır, fakat raporda bununla ilgili herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. Ayrıca, hidrolik modelleme altlıkları hakkında karşılaştırma amacıyla gerekli bilgi yer almamaktadır.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada Mert Irmağı havzasında yer alan Mert Irmağı ve yan kolu Yılanlıdere'nin iki boyutlu taşkın modellemesi HEC-RAS 2D paket programıyla yapılmıştır. Bu amaçla, 4 farklı (Q₅₀, Q₁₀₀, Q₅₀₀ ve Q₁₀₀₀ yıllık) taşkın tekerrür debisi kullanılmıştır. Çalışma alanında HEC-RAS 2D programı ilk kez kullanılarak taşkın yayılım haritaları oluşturulmuştur. Daha sonra ArcMap, coğrafi bilgi sistemi yazılımı, kullanılarak bu haritalardan taşkın sonucunda oluşabilecek ekonomik kayıplar tahmin edilmiştir. Ayrıca, mahalle nüfus verileri ile taşkından etkilenecek alanlar ArcMap'de üst üste çakıştırılarak taşkınlardan etkilenecek kişi sayısı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen veriler Su Yönetimi Genel Müdürlüğü tarafından 2015 yılında hazırlanan Yeşilirmak Havzası Taşkın Yönetim Planı'nda yer alan rapor sonuçlarıyla karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Buna göre çalışma bölgesinde;

1. Göz önüne alınan taşkın debileri sonucunda oluşan taşkın zararları hesaplanırken mansap bölgesinde yer alan yapılar beş bölgede incelenmiştir. Her bir debinin çalışma alanında meydana getireceği zararları tahmin etmek için Huizinga, Van Eck ve Kok, ICBR ile Pistrika ve Jonkman'ın zarar belirleme yöntemleri kullanılmıştır. Huizinga yönteminde taşkın zarar miktarları 247 ile 401 milyon ₺, Van Eck ve Kok'da 140 ile 187 milyon ₺, ICBR'de 194 ile 273 milyon ₺ ve Pistrika ve Jonkman'a göre ise 369 ile 479 milyon ₺ arasında değiştiği tespit edilmiştir.
2. Tüm zarar tahmin yöntemlerinin sonuçları incelendiğinde en büyük zarar maliyetleri Pistrika ve Jonkman yöntemiyle; en düşük zarar maliyetleri ise Van Eck ve Kok yöntemiyle hesaplanmıştır. Bunun başlıca nedeninin Pistrika ve Jonkman yönteminde hesaplamalara hem hız hem de derinliğin etki ettirilmesi olarak düşünülmektedir. İki boyutlu taşkın modellemesi ve bakanlık rapor sonuçlarının değerlendirilmesi sonucunda çalışma bölge için güvenli tarafta kalabilecek hasar tahmininde Pistrika ve Jonkman eşitliğinin kullanılması uygun olacaktır.

Teşekkür

Karatay Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümüne ve çalışmanın makale formatına uyarlanması konusunda yardımlarından dolayı Abdulkadir Özcan'a teşekkür etmektedir. Yazarlar bağımsız hakemlere önerileri için teşekkür etmektedir.

Bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi'nde Aslı Ülke Keskin danışmanlığında Vahdettin Demir tarafından hazırlanan "Samsun Mert Havzasında Bir ve İki Boyutlu Modeller ile Taşkın Alanlarının Belirlenmesi" başlıklı doktora tez çalışmasının bir bölümü kullanılarak hazırlanmıştır.

Referanslar

- Aslan, B. (1997). S.C.S. sentetik birim hidrograf yönteminin Türkiye şartlarında uygulanabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Alho, P., Aaltonen, J., Comparing A (2008), 1D Hydraulic Model with A 2D Hydraulic Model for The Simulation of Extreme Glacial Outburst Floods. *Hydrol. Process.*, 22(10), 1537–1547.
- Anılan, T., Yüksek, Ö., Kankal, M. (2016), Regional Flood Frequency Analysis of Eastern Black Sea Basin Based on L-Moments. *UCTEA Technical Journal*, 451, 7403–7427.
- Anonim, 2014. Guidelines for the preparation of flood risk management plans, capacity building for the implementation of the flood directive EU twinning project. General Directorate of Water Management, Ankara. http://taskinyonetimi.suyonetimi.gov.tr/taskin/Files/Outputs/TRYP_Kilavuzlar.pdf Yayın tarihi 2014. Erişim tarihi Mayıs 11, 2019.
- Bakanlık (2020) Yeşilirmak Basin Flood Management Plan Available online: [https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/Taşkın Yönetim Planları/1\) YESILIRMAK HAVZASI TAŞKIN YÖNETİM PLANI.pdf](https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/Taşkın_Yönetim_Planları/1)YESILIRMAK_HAVZASI_TASHKIN_YONETIM_PLANI.pdf) Yayın tarihi 2020. Erişim tarihi Mayıs 11, 2020.
- Bates, P., De Roo, A.P., (2000), A simple Raster-Based Model for Flood Inundation Simulation. *J. Hydrol.*, 236(1-2), 54–77.
- Bayazıt, M. (1981), Hidrolojide İstatistik Yöntemler; İstanbul Teknik Üniversitesi matbaası, İstanbul, 1981.
- Beden, N. (2019) Cevizdere havzasının sayısal modelleme sistemlerine dayalı taşkın analizi ve taşkın zararlarının değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Ondokuzmayıs Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Beden, N., Ülke Keskin, A., (2020), Flood Hazard Assessment of A Flood-Prone Intensively Urbanized Area - A Case Study From Samsun Province, *Geofizika*, 37(1), 1–31.
- Beden, N., Ülke Keskin, A. (2021), Flood Map Production and Evaluation Of Flood Risks in Situations of Insufficient Flow Data. *Nat. Hazards* 105, 2381–2408.
- Canik (2020), Canik Nüfusu, https://www.nufusu.com/ilce/canik_samsun-nufusu Yayın tarihi 2020. Erişim tarihi Mayıs 15, 2020.
- Cesur, D. (2007), GIS As An Information Technology Framework for Water Modeling. *J. Hydroinformatics*, 9(2), 123–134.
- Çıtakoğlu, H., Demir, V., & Haktanır, T. (2017). L–momentler yöntemiyle Karadeniz'e dökülen akarsulara ait yıllık anlık maksimum akım değerlerinin bölgesel frekans analizi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (2), 571-580. doi: 10.28948/ngumuh.341711
- Cook, A., Merwade, V. (2009), Effect of Topographic Data , Geometric Configuration and Modeling Approach on Flood Inundation Mapping. *J. Hydrol.*, 377(1), 131–142.
- de Moel, H.; Aerts, J.C.J.H., (2011), Effect of Uncertainty in Land Use, Damage Models and Inundation Depth on Flood Damage Estimates. *Nat. Hazards*, 58 (1), 407–425.
- Demir, V. (2020), Samsun Mert havzasında bir ve iki boyutlu modeller ile taşkın alanlarının belirlenmesi, Doktora Tezi, Ondokuzmayıs Üniversitesi. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Samsun.
- Demir, V., Kisi, O. (2016), Flood Hazard Mapping by Using Geographic Information System and Hydraulic Model: Mert River, Samsun, Turkey. *Adv. Meteorol.*, 2016.
- Demir, V., Ülke Keskin, A., (2021), Flood flow calculation and flood modeling in rivers that do not have enough flow measurement (Samsun, Mert River sample). *Geomatik*, 7(2), 149–162.

- Demir, V., Ülke Keskin A., (2020a), Height Modeling with Artificial Neural Networks (Samsun-Mert River Basin). *Gazi J. Eng. Sci.*, 6(1), 54–61.
- Demir, V., Ülke Keskin, A., (2020b), Obtaining the Manning Roughness with Terrestrial-Remote Sensing Technique and Flood Modeling using FLO-2D, a case study Samsun from Turkey. *Geofizika* 37(2), 131-156.
- Demir, V., Ülke Keskin A., (2019), Determination of Manning Roughness Coefficient by Cowan Method and Remote Sensing. *Gazi J. Eng. Sci.* 5(2), 167–177.
- Hooijer, A., Klijn, F., Pedroli, G.B.M., Van Os, A.G. (2004), Towards sustainable flood risk management in the Rhine and Meuse river basins: synopsis of the findings of IRMA-SPONGE. *River Res. Appl.*, 20(3), 343–357.
- Horritt, M.S., Bates, P.D., (2002), Evaluation of 1D and 2D Numerical Models for Predicting River Flood Inundation. *J. Hydrol.*, 268(1-4), 87–99.
- Huizinga HJ (2007), Flood damage functions for EU member states. Technical Report, HKV Consultants. Implemented in the framework of the contract #382441-FISC awarded by the European Commission Joint Research Centre, 2007.
- Huthoff, F., Remo, J.W.F., (2015), Pinter, N., Improving Flood Preparedness Using Hydrodynamic Levee-Breach and Inundation Modelling: Middle Mississippi River, USA. *J. Flood Risk Manag.*, 8(1), 2–18.
- ICBR (2001), Atlas van het overstromingsgevaar en mogelijke schade bij extreem hoogwater van de Rijn. Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn (ICBR), Koblenz, 2001.
- İlkadım (2020), İlkadım Nufusu, https://www.nufusu.com/ilce/ilkadim_samsun-nufusu Yayın tarihi 2020. Erişim tarihi Mayıs 15, 2020.
- Kamboh, S.A., Sarbini, I.N., Labadin, J., Eze, M.O., (2016), Simulation of 2D Saint-Venant equations in open channel by using MATLAB. *J. IT Asia*, 5(1), 15–22.
- Leedal, D., Neal, J., Beven, K., Young, P., Bates, P. (2010), Visualization Approaches for Communicating Real-Time Flood Forecasting Level And Inundation Information. *J. Flood Risk Manag.*, 3(2), 140–150.
- Merz, B., Thielen, A. H., Gocht, M. (2007), Flood risk mapping at the local scale: Concepts and challenges. - In: Beguim, S., Stive, M., Hall, J. W. (Eds.), *Flood Risk Management in Europe: Innovation in Policy and Practice*, (Advances in natural and technological hazards research; 25), Springer, (2007), 231-251.
- Özdemir, H. (1978). *Uygulamalı taşkın hidrolojisi*. Ankara: DSİ Matbaası.
- Petrow, T., Thielen, A.H., Kreibich, H., Merz, B., Bahlburg, C.H. (2006), Improvements on Flood Alleviation in Germany: Lessons Learned from the Elbe Flood in August 2002. *Environ. Manage.*, 38(5), 717–732.
- Pistrika, A.K., Jonkman, S.N., (2010), Damage to residential buildings due to flooding of New Orleans after hurricane Katrina. *Nat. Hazards*, 54(2), 413–434.
- Quirogaa, V.M., Kurea, S., Udoa, K., Manoa, A. (2016), Application of 2D Numerical Simulation for The Analysis of The February 2014 Bolivian Amazonia Flood: Application of The New HEC-RAS version 5, *Ribagua*, 3, 25–33.
- Resmî Gazete (2022), <https://www.resmigazete.gov.tr/>. Erişim tarihi Nisan 20, 2022.
- Rubinato, M., Nichols, A., Peng, Y., Zhang, J., Lashford, C., Cai, Y., Lin, P., Tait, S. (2019), Urban and River Flooding: Comparison of Flood Risk Management Approaches in The UK and China and An Assessment of Future Knowledge Needs. *Water Sci. Eng.*, 12(4), 274–283.
- Serencam, U. (2013), Taşkın zararları ve zarar görebilirlik analizi: Trabzon değirmendere sanayi mahallesi örneği, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Trabzon.

- Taş, E., İçağa, Y., Zorluer, İ., (2016), Constitution of Flood Inundation Maps and Flood Damage Analysis: A Case Study of Akarcay Afyon Subbasin, *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, 16, 711–721.
- Ulke, A., Beden, N., Demir, V., Menek, N. (2017), Numerical modeling of Samsun Mert River floods. *EWRA Publ.*, 57, 27–34.
- Uslu, G., Sesli, A. F., Uzun, B., Yilmazsoy, B., Akdemir, Ç., Güler, S. (2018), Determination of Flood Hazard Maps with Geographic Information Systems. *Journal of Urban Culture and Management*, 11(4), 545–558.
- Van Eck N.V., Kok M. (2001), *Standaard Methode Schade en Slachtoffers Als Gevolg Van Overstromingen*. Dienst Wegen Waterbouwkunde. Ministerie van Rijkswaterstaat, Netherlands. https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_20427_31/, 2001.
- Vozinaki, A.E.K., Morianou, G.G., Alexakis, D.D., Tsanis, I.K. (2017), Comparing 1D and Combined 1D/2D Hydraulic Simulations Using High-Resolution Topographic Data: A Case Study of The Koiliaris Basin, Greece. *Hydrol. Sci. J.*, 62(4), 642–656.
- Willems, P., Arnbjerg-Nielsen, K., Olsson, J., Nguyen, V.T.V., (2012), Climate Change Impact Assessment on Urban Rainfall Extremes and Urban Drainage: Methods And Shortcomings. *Atmos. Res.*, 103, 106–118.
- Zerger, A., Wealands, S., (2004), Beyond Modelling: Linking Models with GIS for Flood Risk Management. *Nat. Hazards*, 33, 191–208.



Düşey Yüzlü Duvar Önünde Pervane Jetinin Neden Olduğu Oyulma

Scour Induced by Propeller Water Jet in front of a Vertical Wall

Ali Doğu¹ , Kubilay Cihan¹ , Ayşe Yüksel Ozan² , Osman Yıldız¹ , Hayri Ateş 

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71450 Yahşihan, Kırıkkale, TÜRKİYE
²Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 09010 Aydın, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 22/03/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Gemilerin seyir ve manevraları sırasında deniz tabanında meydana gelebilecek oyulmalar, önlem alınmadığı takdirde ciddi sorunlara neden olabilir. Oluşacak oyulmaların tahmini liman yapılarının stabilitesi için büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, düşey yüzlü bir duvar önünde oluşan oyulma deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, 3.2x2.0x1.0 m ölçülere sahip deney tankının tabanına ortalama elek çapı $d_{50} = 0.24$ mm ve özgül kütlesi $\rho = 2650$ kg/m³ olarak belirlenen kuvars kumu serilmiştir. Deneylerde 0.06 m çaplı pirinçten imal edilmiş bir pervane kullanılmıştır. Pervane kendi eksenini ile polikarbon esaslı düşey yüzlü bir duvar arasında 4 farklı konumda yerleştirilmiş ve 3 farklı dönüş hızında çalıştırılmıştır. Hız ölçümleri Akustik Doppler prensibi ile çalışan ADVP kullanılarak elde edilmiştir. Düşey yüzlü duvar ile pervane eksenini arasındaki mesafenin ve ayrıca pervane dönüş hızının oyulma mekanizması üzerindeki etkileri hem pervane akımı doğrultusunda hem de duvar önünde yanıl doğrultuda irdelenmiştir. Deney sonuçları, literatürde duvar önündeki maksimum oyulmayı tahmin etmek için önerilen eşitliklerle karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları ile eşitliklerden elde edilen maksimum oyulmalar arasındaki ilişkinin zayıf olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Oyulma, Düşey yüzlü duvar, Pervane jeti, Sınırlandırılmış oyulma”

Abstract

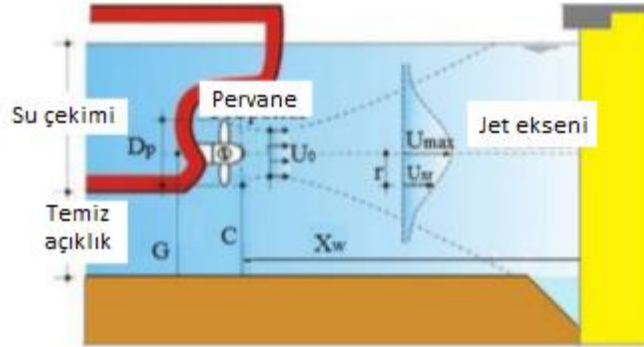
Scours that may occur on the sea floor during the navigation and maneuvers of ships can cause serious problems if precautions are not taken. The estimation of the scours to occur is of great importance for the stability of the port structures. In this study, scour in front of a vertical wall was investigated experimentally. For this purpose, quartz sand with an average sieve diameter of $d_{50} = 0.24$ mm and a specific mass of $\rho = 2650$ kg/m³ was laid on the bottom of the 3.2x2.0x1.0 m test tank. A propeller made of brass with a diameter of 0.06 m was used in the experiments. The propeller was placed in 4 different positions between its axis and the polycarbon-based vertical wall and operated at 3 different rotation speeds. Velocity measurements were obtained using an ADVP operating on the Acoustic Doppler principle. The effects of the distance between the vertical wall and the propeller axis, as well as the propeller rotation speed, on the scour mechanism are investigated both in the direction of the propeller flow and in the lateral direction in front of the wall. The test results are compared with the equations proposed in the literature to estimate the maximum scour in front of the wall. It was determined that the relationship between the test results and the maximum scours obtained from the equations is weak.

Key Words

“Scour, Vertical wall, Propeller jet, Confined scour”

1. Giriş

Gemilerin liman içindeki seyirleri ya da manevraları sırasında özellikle su derinliğinin az olması durumunda pervane kaynaklı akım, deniz tabanında oyulmalara sebep olmaktadır. Pervane akımı ya pervaneden çıktıktan sonra gelişerek tabana ulaşmakta ya da bir yapıyla etkileşim sonucunda tabana etki etmektedir. Böylece taban malzemesi, askıya geçmekte ve taşınarak oyulma çukuru oluşturmaktadır. Oyulma çukurunun gelişimine dikkat edilmez ve önlem alınmazsa, zaman içerisinde önemli problemlere sebep olmaktadır. Örneğin yapı stabiliteleri bozulabilir ya da tabanda oluşacak yığılmalar sonucunda gemilerin su çekiminin yetersiz kalmasına sebep olabilir (Lull vd., 2021). Şekil 1’de kapalı bir yanaşma yapısının topuğunda oluşan oyulma şematik olarak görülmektedir (PIANC, 2015).



Şekil 1. Kapalı bir yanaşma yapısının topuğunda oluşan oyulma (PIANC, 2015)

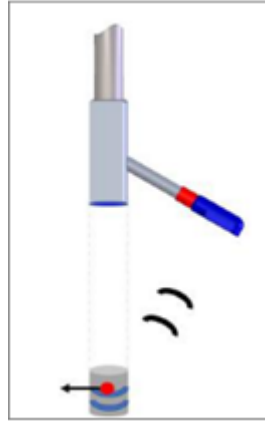
Literatürde düşey yüzü bir yapı tarafından sınırlandırılmış tek ya da çift pervane kaynaklı su jeti etkisinde deniz tabanında oluşan oyulmayı inceleyen çalışmalar mevcuttur. Hamill vd. (1999), düşey yüzü bir duvar ile sınırlandırılmış pervane jeti etkileşimi sonucunda duvar önünde oluşan oyulma problemini deneysel olarak inceleyerek maksimum oyulma değerini veren bir ifade önermiştir. Çalışmadaki deneylerde kanat sayıları 3,4 ve 6 olan 4 farklı çapta pervane kullanılmış olup düşey yüzü bir duvar önünde oluşan oyulma profili incelenirken söz konusu duvar 19 farklı noktaya konumlandırılmıştır. Yüksel vd. (2019), düşey yüzü bir duvar önünde pervane jeti etkisinde oluşan oyulmayı deneysel olarak incelemiş ve oyulma değerini veren bir ifade önermiştir. Söz konusu çalışmada, 6.5 ve 10 cm çaplara sahip pervaneler kullanılmıştır. 3 ayrı duvar konumu için yapılan deneyler duvarsız durum için de tekrar edilmiş ve araştırmacılara sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış şartlar için meydana gelen oyulma profillerini kıyaslama imkânı sunulmuştur. Cui vd. (2020), gemilerin çift pervane kullanması durumunda, pervane dönüş yönlerinin düşey yüzü bir duvar önünde oluşacak oyulmayı nasıl etkilediğini deneysel olarak incelemiştir. Yapılan deneylerde içten dönen çift pervane (İDÇP) ve dıştan dönen çift pervane (DDÇP) kullanılmıştır. Lull vd. (2021), çift pervane kullanan bir geminin manevra hareketleri sırasında pervanenin çalışma yönlerine göre düşey yüzü bir duvar önünde oluşturacağı oyulmayı deneysel bir çalışma ile araştırmış ve oyulmayı veren bir ifade elde etmiştir.

Bu çalışmada, tek pervane kullanılarak düşey yüzü bir duvar önünde oluşan oyulma mekanizması deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, Hamill (1987), Hamill vd. (1999) ve Yüksel vd. (2019) tarafından önerilen bağıntularla hesaplanan değerler ile karşılaştırılmıştır. Hamill (1987), Hamill vd. (1999) ve Yüksel vd. (2019) yaptıkları çalışmalarda deniz tabanını benzeştirmek için kullandıkları kumun d_{50} değerleri sırasıyla 0.76-3.00 mm ve 0.52 mm’dir. Sunulan çalışmada ise daha ince kum malzemesi ($d_{50} = 0.24$ mm) için deneyler gerçekleştirilmiş ve önerilen formüllerin geçerlilikleri bu çap değeri için incelenmiştir. Ayrıca, bu çalışmalardan farklı olarak pervane ve duvar etkileşimlerinin yanıl oyulma profilleri üzerindeki etkisi de incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Deneyler, Kırıkkale Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarında bulunan ve deniz tabanında meydana gelebilecek oyulmaların pervane özelliklerinin, konumunun ve dönüş hızlarının değiştiği durumlarda test edilmesine olanak sağlayan bir deney tankında gerçekleştirilmiştir. Pervanenin farklı hızlarda çalışmasını sağlayan pervane sistemi ve Akustik Doppler prensibi ile çalışan Akustik Doppler Hız Profil Ölçer (ADVP: Acoustic Doppler Velocity Profiler) ile deney esnasında ve sonrasında hız ve taban profilleri ölçümleri gerçekleştirilmiştir. ADVP, Akustik Doppler prensibine göre çalışan, üç doğrultudaki hız bileşenlerini ölçen, yüksek doğruluğa sahip bir hız ölçerdir. Özellikle sınır tabakası ve bazı türbülans ölçümleri için oldukça elverişli olduğundan birçok farklı disiplinde kullanılmaktadır (Sarker, 1998). Çalışmada kullanılan ADVP cihazı titanyumdan yapılmış olup ucunda 4 adet alıcı ve 1 adet verici transdüser bulunan bir proba sahiptir. ADVP’nin çalışma prensibi özetle şu şekildedir: (i) merkezde bulunan sinyal üretici kısa ses sinyalleri üretir, (ii) sinyaller sudaki partiküllere çarpıp geri yansır, (iii) 4 adet alıcı tarafından Doppler kayması algılanır. Şekil 2’de bu durum şematik olarak gösterilmiştir. Şekildeki mavi renkli dalga çifti verici tarafından üretilen sinyali, kırmızı renkli nokta hareket halindeki partikülü, siyah dalga çifti ise alıcı tarafından algılanan Doppler kaymasına uğramış yansıyan sinyali temsil etmektedir. ADVP ile aynı anda hem hız profilleri hem de tabana olan uzaklık değerleri elde edilebilmektedir. Cihazın akustik frekansı 10 MHz’dir. Hız ölçümlerinde 100 Hz frekansında veri toplayabilmektedir. Taban ölçümlerinde frekans değeri 10 Hz’e ulaşabilmektedir. ADVP ile hız ölçümünde noktasal ve hücresele olmak üzere iki farklı yöntem kullanılabilir. Noktasal yöntemde örnek hacmi içindeki bir

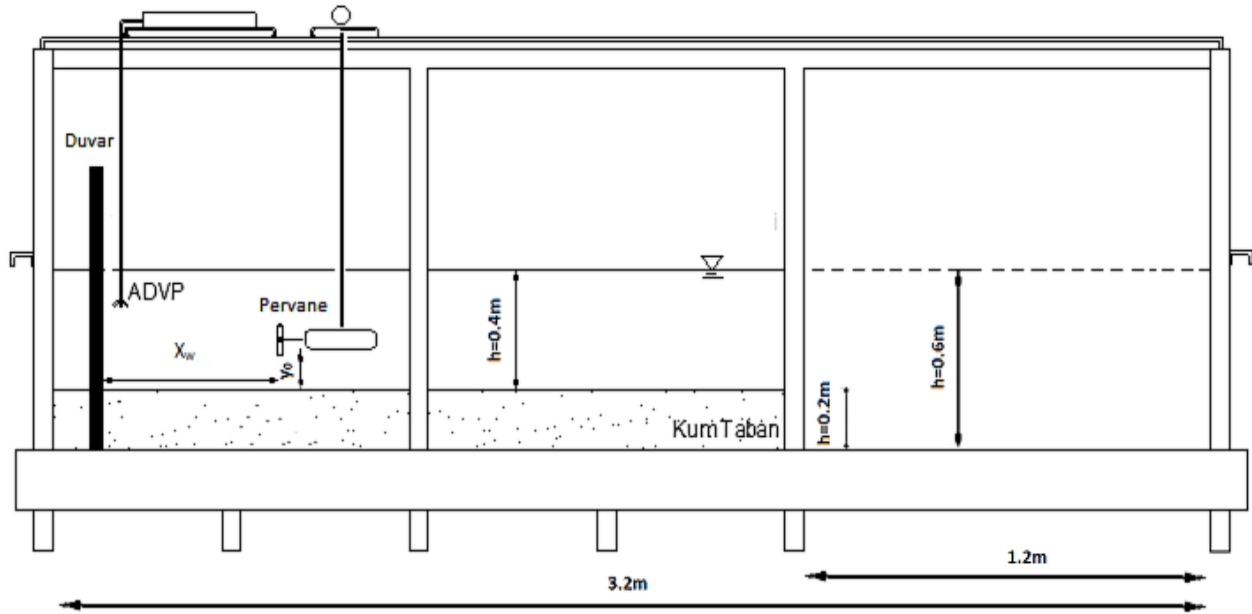
nokta için hız profili belirlenebilirken, hücresel yöntemde 3 cm yüksekliğinde su sütunu için hız profili elde edilebilmektedir. Burada su sütununun boyutları 1 mm'den 4 mm'ye kadar hücreleri içermesi mümkün olabilmektedir. (The Comprehensive Manual for Velocimetres, 2018)



Şekil 2. ADVP'nin çalışma prensibinin şematik gösterimi (The Comprehensive Manual for Velocimetres, 2018)

2.1. Deney Sistemi

Deneylerin gerçekleştirilmesi için 3.2 m uzunluğa, 2.0 m genişliğe ve 1.0 m yüksekliğe sahip; bir tarafı camdan, diğer üç tarafı çelikten yapılmış bir deney tankı inşa edilmiştir. Deney tankına su doldurma/boşaltma işleminin yapılabilmesi için 1 adet depo ve 2 adet pompa kullanılmıştır. Deney tankı üzerinde ölçüm cihazlarının yerleştirilmesini sağlayan kızaklı ve tankın eni ve boyu doğrultusunda hareket etmeyi sağlayan bir sistem yerleştirilmiştir. Düşey duvar olarak polikarbon esaslı bir levha kullanılmıştır. Levhanın yüzeyine kum tanecikleri yapıştırılarak prototip koşullarına benzeşimi artırılmaya çalışılmıştır. Şekil 3'te deney sistemi şematik olarak gösterilmiştir. Burada, y_0 pervane eksenini ile deniz tabanı arasındaki uzaklığı, X_w ise pervane açıklığını (düşey yüzü ile pervane yüzü arasındaki uzaklığı) temsil etmektedir.



Şekil 3. Deney sisteminin şematik gösterimi

Deneylerde deniz tabanını temsil etmesi amacıyla kohezyonsuz malzeme olarak kuvars kumu kullanılmıştır. Kum $2.0 \times 1.5 \times 0.2$ m boyutlarında bir kutu içine serilmiştir. Serili kum tabanının bozulmaması için su yavaş yavaş doldurulmuştur ($h=0.4$ m). Kum malzemenin ortalama elek çapı $d_{50} = 0.24$ mm ve özgül kütlesi $\rho = 2650$ kg/m³ olarak elde edilmiştir. Benzer bir çalışmada, Hong vd. (2013) aynı çapa ve özgül kütleye sahip malzeme kullanmıştır. Diğer taraftan, Cui vd. (2019) bu çalışmadaki malzeme özellikleri ile benzer nitelikte ($d_{50} = 0.2$ mm, $\rho = 2650$ kg/m³) malzeme ile deneyler gerçekleştirmiştir. Çalışmamızda kullanılan kuvars kumunun geometrik standart sapma (σ_g) değeri Eşitlik (1) ile 1.5 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değer, taban malzemesinin orta derecede iyi sınıflandırılmış olduğunu göstermektedir.

$$\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}} \quad (1)$$

Burada, d_{16} ve d_{84} sırasıyla taban malzemesinin ağırlıkça %16 ve %84'ünün geçtiği çapları göstermektedir.

Deneylerde kullanılan pervane, pirinç malzemenin yapılmıştır ve pervanenin çapı $D_p=0.06$ m'dir. Pervane ekseninin tabandan yüksekliği $y_0=10$ cm olarak seçilmiştir. Hong vd. (2013) ile Tan ve Yüksel (2018) tarafından yapılan çalışmalarda aynı y_0 değeri kullanılmıştır. Çalışmamızda kullanılan pervaneye ait özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi, Römisch (1975)'e göre K_T (itme katsayısı) belirlenemediği durumlarda 0.35 olarak kabul edilebilmektedir.

Tablo 1. Pervane özellikleri

Parametre	Değer
Çap D_p (m)	0.06
Kanat Sayısı N	4
Kanat Alanı Oranı β	0.60
Hatve Oranı P/D_p	1.025
İtme Katsayısı K_T	0.35

Deneylerde pervane çıkış hızı değerlerini ölçmek ve tabandaki seviye değişimlerini belirlemek için Vectrino II ADVP kullanılmıştır. ADVP kullanarak deney esnasında suyu boşaltmadan ve hasara uğramış deniz tabanında bozulmaya sebep olmadan taban ölçümleri yapmak mümkün olmaktadır.

2.2. Pervane Çıkış Hızı Ölçümleri

Pervane çıkışında elde edilen düşey hız dağılımındaki maksimum hız, çıkış hızı olarak tanımlanmaktadır. Verhey (1983), Eşitlik (2) ve (3) ile hesaplanan pervane ve akım Reynolds sayılarının sırasıyla 7.0×10^4 ve 3.0×10^3 değerlerinden büyük olması durumunda viskoz etkilerin ihmal edilebileceğini ifade etmiştir.

$$Re_{pervane} = \frac{nD_p L_m}{\nu} \quad (2)$$

$$Re_{akım} = \frac{U_0 D_p}{\nu} \quad (3)$$

Burada, n pervane hızı, D_p pervane çapı, L_m pervanenin karakteristik uzunluğu, U_0 pervane jet çıkış hızı ve ν kinematik viskozitedir. L_m değerinin bulunması için Blaauw ve van de Kaa (1978) tarafından Eşitlik (4) önerilmiştir.

$$L_m = \beta D_p \pi \left(2N \left(1 - \frac{D_h}{D_p} \right) \right)^{-1} \quad (4)$$

Burada, β pervane kanat alanı oranını, N pervane kanat sayısını, D_p pervane çapını, D_h pervane göbek çapını ifade etmektedir. Pervane jet çıkış hızı için Fuehrer ve Römisch (1977) tarafından verilen Eşitlik (5) kullanılmıştır.

$$U_0 = 1.59nD_p \sqrt{C_t} \quad (5)$$

Burada, U_0 pervane jet çıkış hızı, n pervane hızı (diğer bir ifade ile 1 saniyedeki dönme sayısı), D_p pervane çapı ve C_t ise itme katsayısıdır. Bu çalışmada, pervane dönüş hızı olarak 500, 750 ve 1000 rpm (revolution per minute: bir dakikalık süredeki devir sayısı) değerleri seçilmiştir. Söz konusu pervane dönüş hızları için Eşitlik (5) ile hesaplanan U_0 değerleri sırasıyla 0.47, 0.70 ve 0.94 m/s olarak hesaplanmıştır. Eşitlik (2) ve (3) ile yapılan hesaplama göre, Pervane Reynolds sayısı ($Re_{pervane}$) 1.0×10^4 ile 1.4×10^4 arasında, akım Reynolds sayısı ($Re_{akım}$) ise 3.3×10^4 ile 4.4×10^4 arasında değişmektedir. Burada, $Re_{akım}$ değerlerinin 3×10^3 değerinden küçük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, Blaauw ve van de Kaa (1978) ile Verhey (1983) tarafından belirtildiği gibi, ölçek etkisi ihmal edilmiştir.

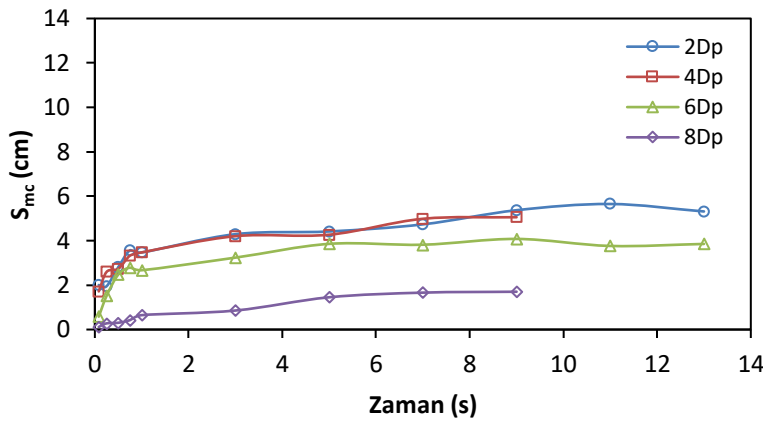
Bu çalışmada, düşey yüzü duvar ile pervane eksen arasında 4 farklı uzaklık için deneyler yapılmıştır. Deney koşulları Tablo 2'de özet olarak verilmiştir.

Tablo 2. Deney koşulları

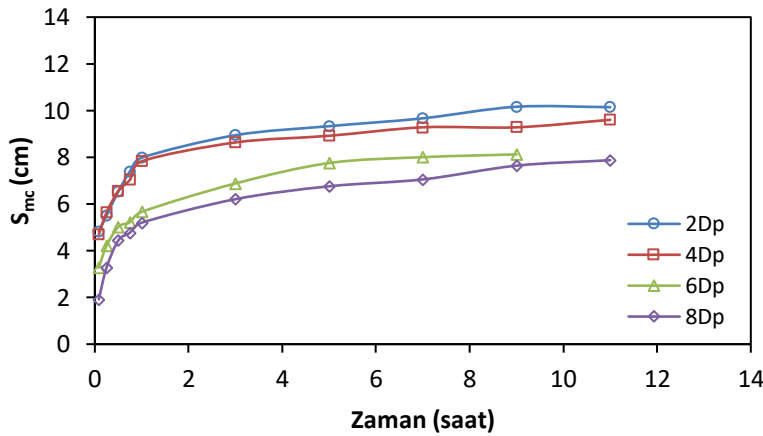
Pervane çapı D_p (cm)	Pervane yüksekliği y_0 (cm)	Pervane dönüş hızı (rpm)	Pervane ekseninden uzaklık X_t
6.0	10.0	500	$2D_p, 4D_p, 6D_p, 8D_p$
		750	$2D_p, 4D_p, 6D_p, 8D_p$
		1000	$2D_p, 4D_p, 6D_p, 8D_p$

2.3. Pervane Akımı Etkisinde Oluşan Oyuğunun İncelenmesi

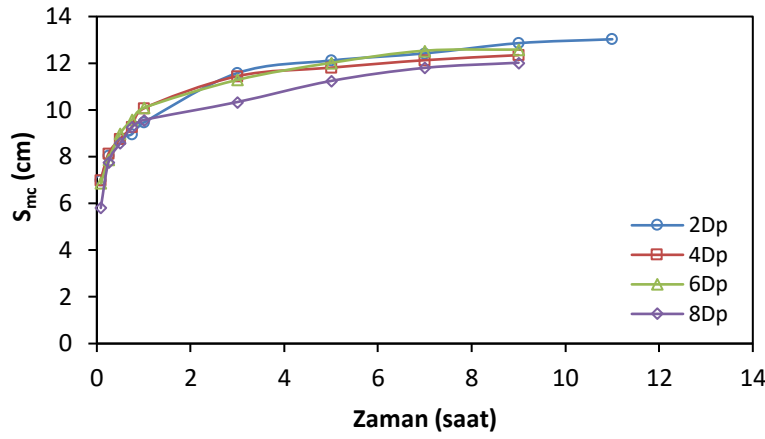
Düşey yüzü duvar önünde pervanenin oluşturacağı jet akımının etkisiyle meydana gelen oyulmanın araştırılması için deneyler Bölüm 2.2’de bahsedilen koşullarda gerçekleştirilmiştir. Deneylerde pervane çalıştırılmadan önce hem pervane doğrultusunda (duvardan pervaneye doğru) hem de duvara en yakın noktada yanal (pervaneye dik) doğrultuda taban seviyeleri ölçülmüş ve bu değerler referans değerleri olarak kayıt altına alınmıştır. Ölçüm alım noktaları $4D_p$, $6D_p$ ve $8D_p$ için 1 cm, $2D_p$ açıklık için 0.5 cm aralıklarda belirlenmiştir. Her taban ölçüm alım noktası için, pervane çalışmadan önceki referans değerleri ile pervane çalıştırdıktan sonraki ölçülen değerler arasındaki fark o noktadaki oyulma ya da yığılma durumunu vermektedir. Farkın negatif olması tabanda oyulmanın, pozitif olması ise yığılmanın olduğunu gösterir. Pervanenin çalıştırılmasından sonra 5, 15, 30, 45 ve 60. dakikalarda, daha sonra 120 dakika aralıklarla pervane durdurulup sonra taban seviye ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Belirtilen zaman aralıkları için tabanda oluşan oyulmanın zamansal değişimi elde edilmiştir. Hong vd. (2013), pervanenin durdurulup çalıştırılması sırasında tabanda meydana gelebilecek değişimlerin ihmal edilebilir olduğunu ve hatta bunun gemilerin limana girmeleri ve limandan ayrılmaları esnasındaki gerçek manevralarına benzediğini söylemiştir. Deneyler, oyulma profilleri dengeye ulaşınca kadar, yani birbirini takip eden ölçümlerde oyulma derinlikleri arasındaki fark 1 mm oluncaya kadar devam ettirilmiştir. Bu amaca yönelik olarak iki saat aralıklarla taban ölçümüne devam edilmiştir. Şekil 4-6’da sırasıyla 500, 750 ve 1000 rpm dönüş hızlarında maksimum oyulma derinliğinin (S_{mc}) zamansal değişimi gösterilmiştir. Söz konusu şekillerde görüldüğü gibi, deney süresi 7-13 saat arasında değişmektedir. Şekil 7’de ise 750 rpm dönüş hızı ve pervane konumu duvardan $8D_p$ uzaklıkta bulunduğu durumdaki deney için oyulma profilinin zamansal değişimi verilmiştir. Şekilde (0,0) noktası, pervane ucunun kum taban üzerindeki izdüşümüdür. Denge durumu tüm profil boyunca oluşuncaya kadar deneylere devam edilmiştir.



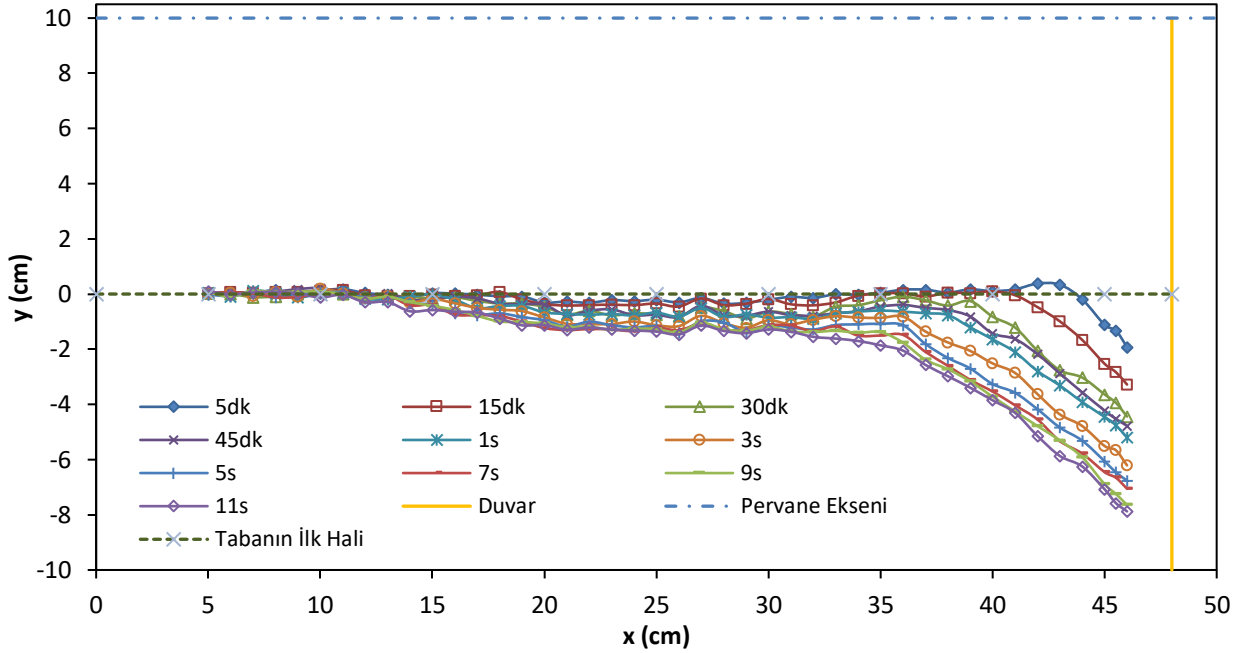
Şekil 4. 500 rpm dönüş hızında S_{mc} değerinin zamansal değişimi



Şekil 5. 750 rpm dönüş hızında S_{mc} değerinin zamansal değişimi



Şekil 6. 1000 rpm dönüş hızında S_{mc} değerinin zamansal değişimi

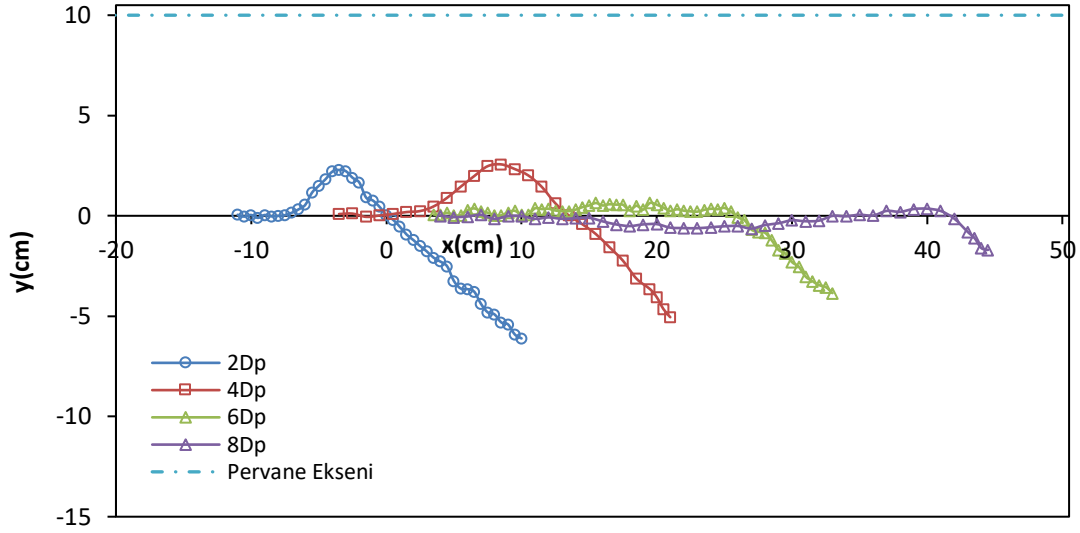


Şekil 7. 750 rpm dönüş hızında oyluma profilinin zamansal değişimi ($X_w=8D_p$)

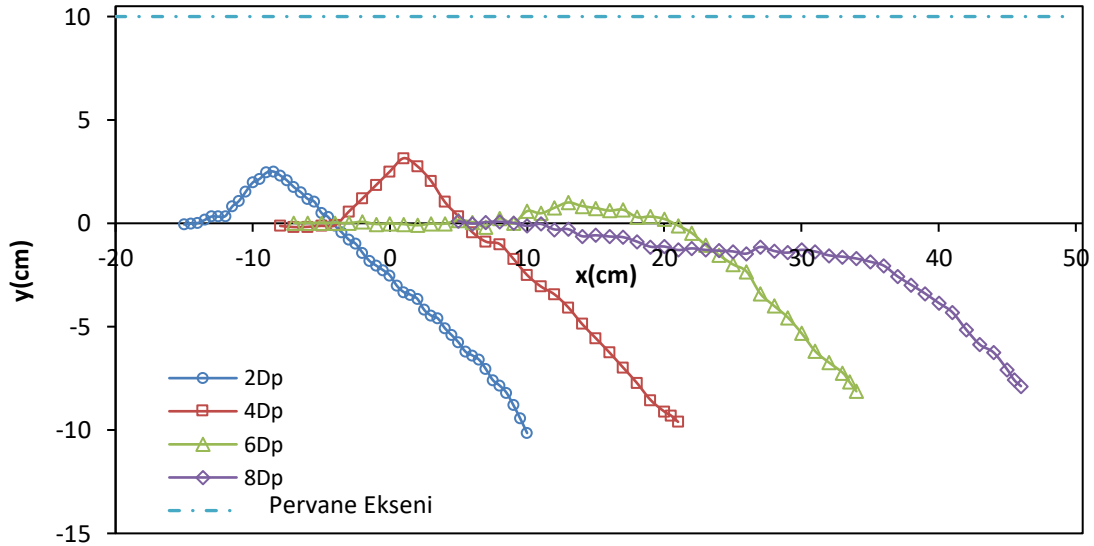
Şekil 8-10'da ise sırasıyla 500, 750 ve 1000 rpm dönüş hızlarında 2D_p, 4D_p, 6D_p ve 8D_p pervane-duvar açıklığı için denge durumuna ulaşmış oyluma profilleri gösterilmiştir. Şekillerde (0,0) noktası, pervane ucunun kum taban üzerindeki izdüşüm noktasıdır. 500 rpm dönüş hızında oluşan profillere göre, 2D_p ve 4D_p pervane mesafelerinde oluşan oyluma profilleri aynı özellikler göstermektedir. Duvar önündeki maksimum oylumalar birbirine oldukça yakın iken, pervane bölgesindeki yığılma yükseklikleri de oldukça yakındır. Her iki durum için hesaplanan şev eğimleri ise sırasıyla 32° ve 34° olarak belirlenmiştir. Pervane açıklığı 6D_p'ye ulaştığında yığılma yüksekliği ve duvar önü maksimum oyluma azalmıştır. 8D_p pervane açıklığında duvar etkisi önemli ölçüde azalmış ve pervanenin mansabında derinliği az olmasına rağmen, sınırlandırılmamış akım şartlarına benzer bir oyluma profili oluşmuş, ayrıca duvar önünde yine bir oyluma bölgesi ortaya çıkmıştır.

750 rpm pervane dönüş hızında denge durumunda oluşan profiller incelendiğinde, 500 rpm deneylerine benzer şekilde 2D_p ve 4D_p pervane açıklıkları için benzer profillerin oluştuğu görülmektedir. Duvar önünde oluşan oyluma çukuru şev eğimleri ise 2D_p ve 4D_p için sırasıyla 34° ve 32.52°'dir. 6D_p pervane açıklığında yığılma yüksekliğinin oldukça azaldığı ve benzer şekilde duvar önündeki maksimum oylumanın da azaldığı görülmektedir. 8D_p pervane açıklığında ise duvar etkisi ile pervane akımının tabanı yıkama etkisinin etkileşimi görülmektedir. Duvar önündeki oyluma çukuru ile pervane yıkama etkisi sonucu oluşmaya başlayan oyluma çukuru sınırları kesişme göstererek her iki profil bu bölgede birleşmiştir. Yapılan değerlendirmeye göre pervane devir sayısının (rpm) artışı her iki etkiyi de artırmıştır.

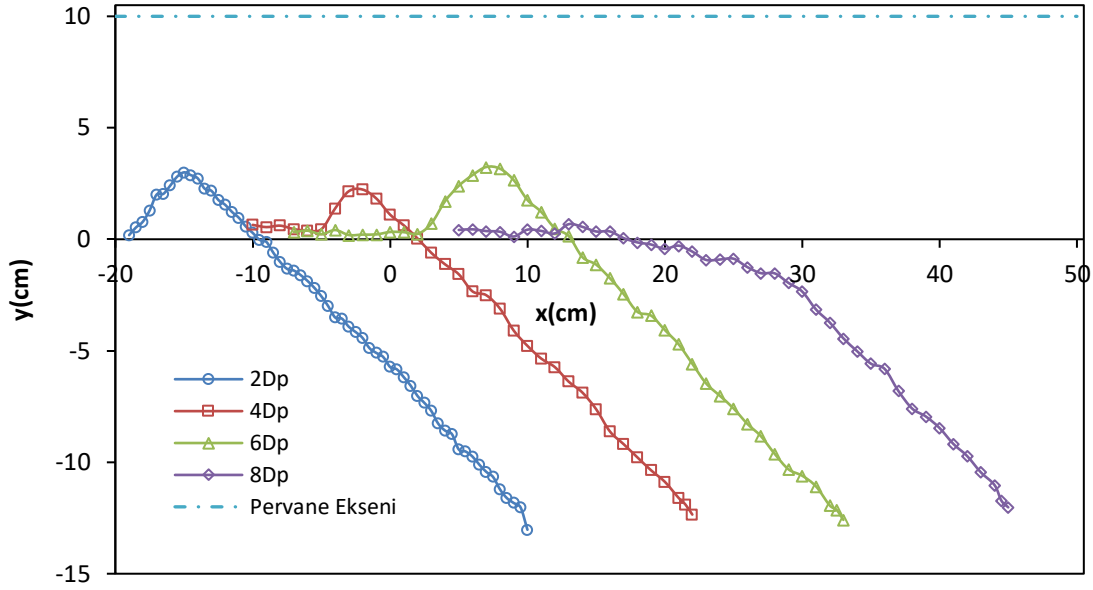
1000 rpm pervane dönüş hızında denge durumunda oluşan profiller incelendiğinde, pervane çıkış hızının artması sonucunda duvar etkisi artmış, $2D_p$, $4D_p$ ve $6D_p$ pervane açıklıkları için benzer profillerin oluşmuştur. Duvar önünde oluşan oyulma çukuru şev eğimleri ise $2D_p$, $4D_p$ ve $6D_p$ için sırasıyla 32.62° , 33.78° ve 32.21° olarak ele edilmiştir. $8D_p$ pervane açıklığında ise duvar etkisi ile pervane akımı tabanı yıkama etkisine göre daha baskın olmasından dolayı sadece duvar önünde oyulma çukuru oluşmuştur. Oyulma derinliği ise daha yakın pervane açıklıklarına oldukça yakın mertebelerde oluşmuştur. Duvar önündeki oyulma çukuru ile pervane yıkama etkisi sonucu oluşmaya başlayan oyulma çukuru sınırları kesişme göstererek, her iki profil bu bölgede birleşmiştir. Yine burada da pervane devir sayısının artışı her iki etkiyi de artırmıştır.



Şekil 8. 500 rpm dönüş hızında $2D_p$, $4D_p$, $6D_p$ ve $8D_p$ pervane-duvar açıklığı için denge durumuna ulaşan oyulma profilleri

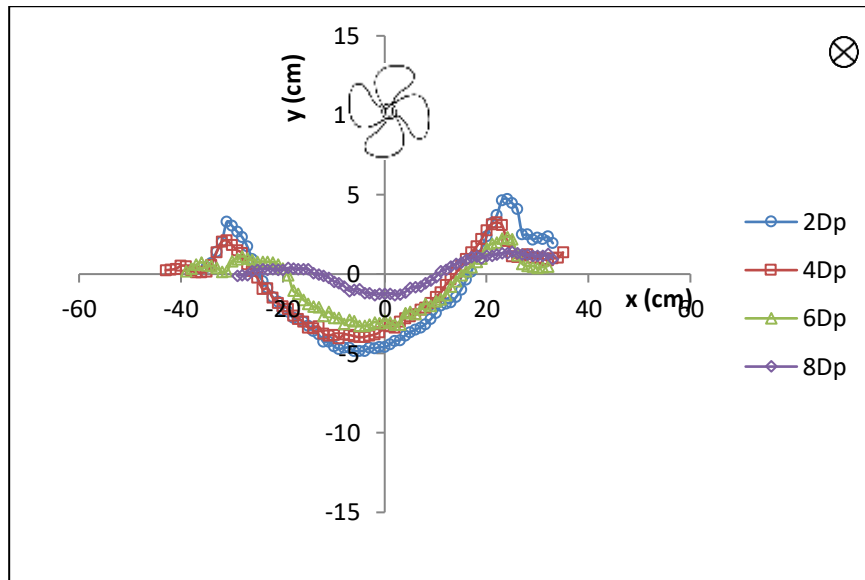


Şekil 9. 750 rpm dönüş hızında $2D_p$, $4D_p$, $6D_p$ ve $8D_p$ pervane-duvar açıklığı için denge durumuna ulaşan oyulma profilleri

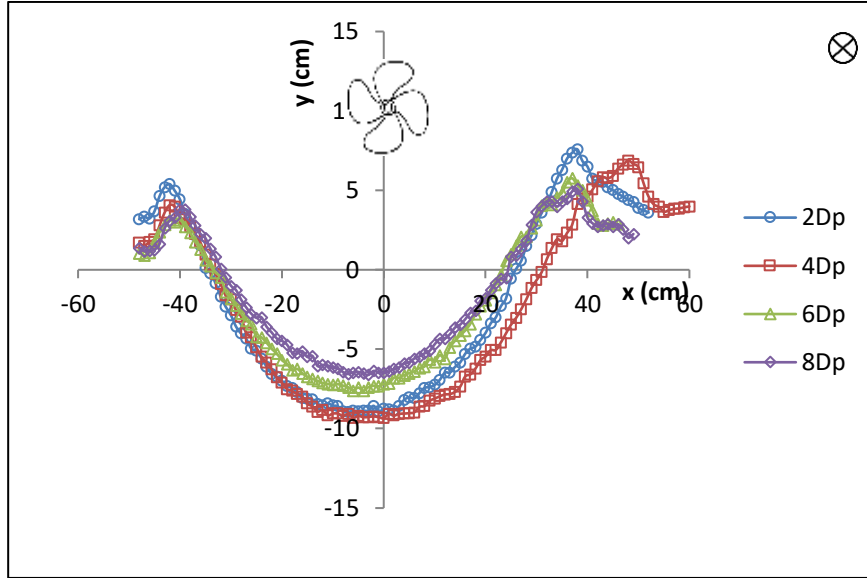


Şekil 10. 1000 rpm dönüş hızında $2D_p$, $4D_p$, $6D_p$ ve $8D_p$ pervane-duvar açıklığı için denge durumuna ulaşan oyulma profilleri

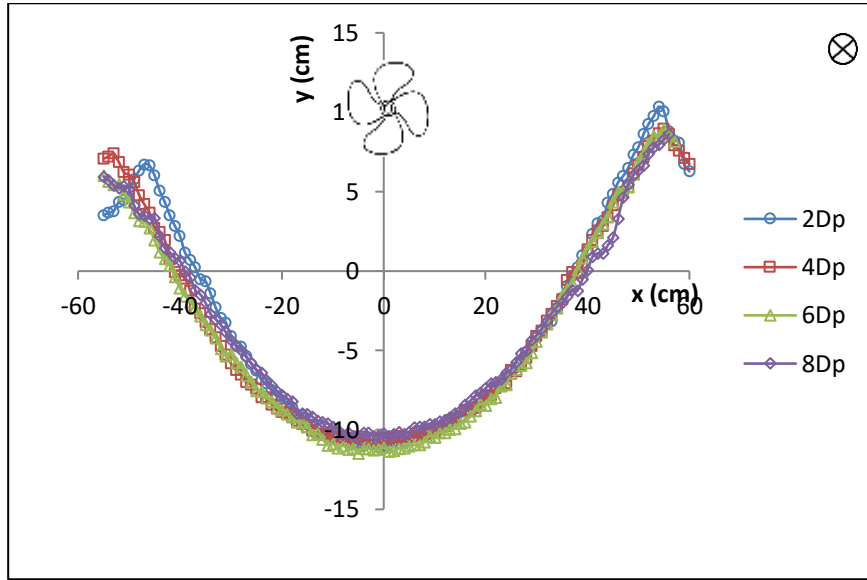
Oyulma profillerinin dengeye ulaşması sonucunda yanıl doğrultuda duvar önünde profiller elde edilmiştir. Şekil 11-13'te sırasıyla 500, 750 ve 1000 rpm dönüş hızlarında farklı pervane açıklıklarında oluşan yanıl profiller verilmiştir. Şekillerde (0,0) noktası, pervane ucunun kum taban üzerindeki izdüşüm noktasıdır. Bakış ve pervane yönü sayfa düzleminde içeri doğrudur. 500 rpm için oluşan yanıl profillerde, pervane açıklığının etkisi belirgin iken, 750 rpm dönüş hızında oluşan yanıl profillerde $2D_p$ ve $4D_p$ pervane açıklığında profiller birbirine yakın değerler almıştır. 1000 rpm dönüş hızında oluşan yanıl profillerde ise her dört pervane açıklığı için oluşan profillerin birbirine benzer şekilde olduğu gözlenmiştir. Buna göre, pervane çıkış hızındaki artışın pervane açıklığının oyulma profili üzerindeki etkisinin azalmasına neden olacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 11. 500 rpm dönüş hızında ölçülen yanıl profiller

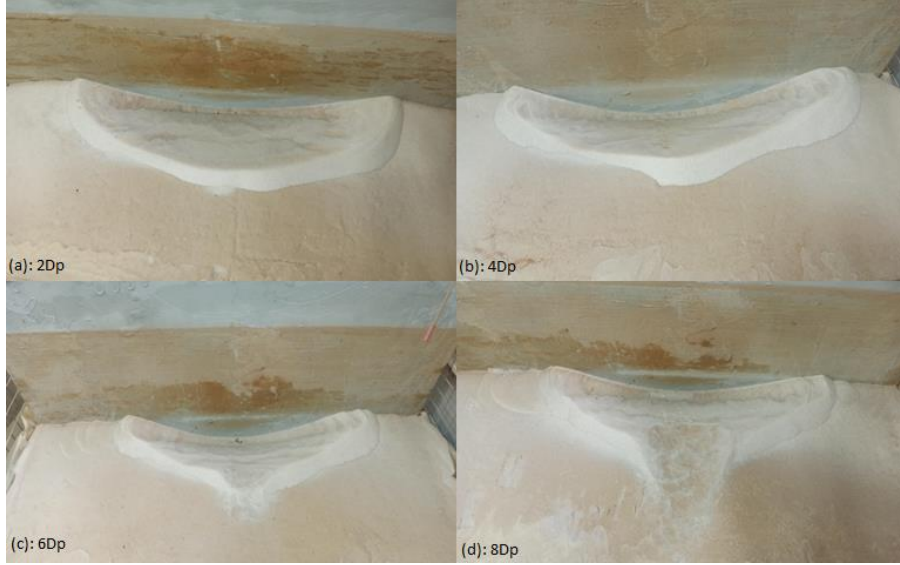


Şekil 12. 750 rpm dönüş hızında ölçülen yanal profiller



Şekil 13. 1000 rpm dönüş hızında ölçülen yanal profiller

Şekil 14'te 750 rpm dönüş hızında denge durumuna ulaşmış oylulma profillerinin deney sonrası çekilen fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 14. 750 rpm dönüş hızında denge durumuna ulaşmış oyulma profillerinin deney sonrası çekilen fotoğrafları

2.4. Maksimum Oyulma Derinliğinin Hesaplanması

Oyulma derinliğinin aldığı en yüksek değer tasarım kriterlerinin en önemli parametresi olduğu için birçok araştırmacı bu yönde odaklanmıştır (Wei vd., 2020). Pervane açıklığına (X_w) bağlı olarak oluşan oyulmanın maksimum değerini belirlemek için Hamill (1987) tarafından Eşitlik (7), Hamill vd. (1999) tarafından Eşitlik (6) ve (8)'deki bağıntılar kullanılmıştır.

$$\left(\frac{S_{mc}-S_{mu}}{Z_b+S_{mu}}\right) + 1 = 1.18 \left(\frac{X_w}{X_{mu}}\right)^{-0.2} \quad (6)$$

$$\frac{S_{mu}}{Z_b} = 0.0467 F_0^{1.39} \left(\frac{Z_b}{D_p}\right)^{-1.39} \quad (7)$$

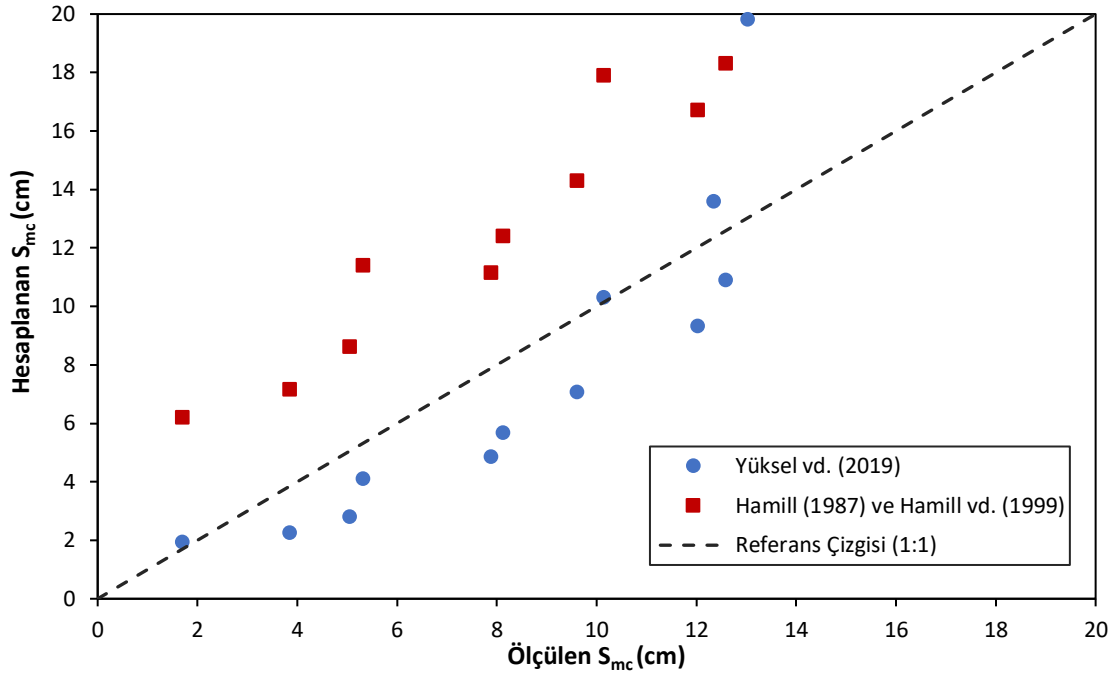
$$X_{mu} = F_0^{0.94} C \quad (8)$$

Burada, S_{mc} duvar ile sınırlandırılmış pervaneden kaynaklı tabanda oluşan denge durumundaki maksimum oyulma derinliği, S_{mu} serbest jet durumunda (duvar olmaksızın) denge durumunda tabandaki maksimum oyulma derinliği, C pervane kanadının ucu ile taban arasındaki mesafe, $Z_b=D_p/2+C$, X_w pervane açıklığı, F_0 ise yoğunluk Froude sayısı ($F_0 = \frac{U_0}{\sqrt{gd_{50}\Delta}}$), D_p pervane çapı, X_{mu} ise pervane ile maksimum oyulma noktasına olan uzaklıktır.

Ayrıca, Yüksel vd. (2019), yaptıkları çalışma sonucunda maksimum oyulma yüksekliği için Eşitlik (9)'da verilen bağıntıyı önermiştir.

$$\frac{S_{mc}}{D_p} = 0.512 F_0^{2.27} \left(\frac{y_0}{d_{50}}\right)^{-0.65} \left(\frac{X_w}{D_p}\right)^{-0.543} \quad (9)$$

Bu çalışmada ölçülen oyulma derinlikleri ile Hamill (1987), Hamill vd. (1999) (Eşitlik (6-8)) ve Yüksel vd. (2019) (Eşitlik (9)) tarafından önerilen bağıntılardan hesaplanan oyulma derinlikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 15'te gösterilmiştir. Gözlenen ve hesaplanan değerler arasındaki uyumu belirlemek amacıyla Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) değerleri kullanılmıştır. Buna göre, gözlenen değerler ile Hamill (1987), Hamill vd. (1999) ve Yüksel vd. (2019) tarafından önerilen bağıntılar ile elde edilen sonuçlar arasındaki RMSE değerleri sırasıyla 6.24 ve 2.71 olarak bulunmuştur. Buradaki sonuçlara göre, bu çalışmada elde edilen gözlenen oyulma değerlerinin Yüksel vd. (2019)'nin verdiği bağıntıya (Eşitlik (9)) göre hesaplanan değerlerle daha uyumlu olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 15. Ölçülen ve hesaplanan maksimum oyulmalar (S_{mc})

3. Sonuçlar

Bu çalışmada, düşey yüzü bir duvara belirli mesafelerde konumlandırılan 0.06 m çaplı pervanenin $d_{50}=0.24$ mm çapa sahip ve özgül kütlesi $\rho=2650$ kg/m³ olarak belirlenen kuvars kumlu tabanda meydana getirdiği oyulma profilleri ile duvara uzaklık ve pervane dönüş hızının oyulma profilleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, kum 3.2x2.0x1.0 m ölçülere sahip deney tankının tabanına yerleştirilmiş 2.0x1.5x0.2 m boyutlarında bir kutu içine serilmiştir. Pervane kendi eksenini ile düşey yüzü duvar arasında 4 farklı konumda yerleştirilmiş ve 3 farklı dönüş hızında çalıştırılmıştır. Pervanenin duvara olan uzaklıkları 2D_p, 4D_p, 6D_p ve 8D_p, pervane dönüş hızları ise 500, 750 ve 1000 rpm olarak seçilmiştir. Hız ölçümleri Akustik Doppler prensibi ile çalışan ADVP kullanılarak elde edilmiştir.

Dengeye ulaşmış profiller incelendiğinde; 500 ve 750 rpm dönüş hızında oluşan profillerde 2D_p ve 4D_p uzaklıkta oluşan profiller benzerlik gösterirken, 6D_p mesafede oluşan profilde duvar önündeki oyulma derinliğinde ve yığılma yüksekliğinde azalma meydana gelmiştir. 500 rpm hızda 8D_p uzaklıktaki profilde duvar etkisinin azalmasıyla duvar önünde daha az derinlikte oyulma çukuru oluşmuş ve oyulma profilinin duvar olmadığı durumda meydana gelecek profile benzediği gözlenmiştir. 750 rpm hızda 8D_p mesafede duvar etkisiyle pervane akımının tabanı yıkaması arasında oluşan etkileşim nedeniyle duvar önü profil ile pervane yıkama etkisiyle oluşan profilin birleştiği görülmüştür.

1000 rpm hızında duvar etkisinin arttığı gözlenmiş olup 2D_p, 4D_p ve 6D_p durumları için benzer profiller elde edilmiştir. Aynı pervane hızında 8D_p uzaklıkta pervane akımının tabanı yıkama etkisine baskınlığının arttığı ve bunun sonucunda duvar önü oyulma profili ile pervane yıkama profilinin birleştiği gözlenmiştir. 1000 rpm hızında oyulma derinliklerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Buna göre, dönüş hızı arttıkça duvar etkisi artmakta, diğer taraftan açıklık arttıkça duvar etkisi azalmaktadır.

Duvar önünde oluşan oyulma profilleri yanıl doğrultuda da incelenmiştir. 500 rpm hızında dönen pervanenin oluşturduğu yanıl profillerde pervane açıklığının etkisi belirgin olduğu görülmektedir. Açıklık arttıkça oyulma profillerinin derinliği ve yığılma bölgelerinin yüksekliği azalmaktadır. 750 rpm dönüş hızında oluşan yanıl profillerde, 2D_p ve 4D_p pervane açıklığında birbirine uyumlulukta bir artış gözlenmiştir. 1000 rpm dönüş hızında oluşan yanıl profillerde ise her dört pervane açıklığı için oluşan profillerdeki uyumluluk daha da artmıştır. Buna göre, pervane çıkış hızının artması ile yanıl oyulma profilindeki pervane açıklığı etkisinin azaldığı sonucuna varılmıştır.

Maksimum oyulma derinliğini belirlemek için literatürde Hamill (1987), Hamill vd. (1999) ve Yüksel vd. (2019) tarafından verilen bağıntılar yardımıyla hesaplanan değerler ile deneylerde ölçülen değerler arasındaki uyumu tespit etmek için Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) değerleri kullanılmıştır. Bu çalışmada elde edilen oyulma değerlerinin Yüksel vd. (2019) tarafından bağıntıyla hesaplanan değerlere uyumunun daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (Proje No: 2018/074) ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) (Proje No: 218M428) tarafından desteklenmiştir.

Referanslar

- Blaauw, H. G., and van de Kaa, E. J. (1978). "Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw race of manoeuvring ships." Delft Hydraulics Laboratory, Delft, Netherlands, 1–12.
- Cui, Y., Lam, W. H., Zhang, T., Sun, C., Robinson, D., & Hamill, G. (2019). Temporal model for ship twin-propeller jet induced sandbed scour. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(10), 339.
- Cui, Y., Lam, W. H., Ong, Z. C., Ling, L., Siow, C. L., Robinson, D., & Hamill, G. (2020). Experimental Scours by Impinging Twin-Propeller Jets at Quay Wall. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 872.
- Fuehrer, M., Römisch, K., (1977). Propeller jet erosion and stability criteria for bottom protection of various constructions. In: *Proceedings of P.I.A.N.C, Bulletin No.58.*
- Hamill, G. A. (1987). "Characteristics of the screw wash of a manoeuvring ship and the resulting bed scour," Ph.D. thesis, Queen's University of Belfast, 1987.
- Hamill, G. A., Johnston, H. T. ve Stewart, D. P., (1999). "Propeller Wash Scour Near Quay Walls", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 125(4):15616, 1999.
- Hong, J. H., Chiew, Y. M., & Cheng, N. S. (2013). Scour caused by a propeller jet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(9), 1003-1012.
- Llull, T., Mujal-Colilles, A., & Gironella, X. (2021). Twin propeller time-dependent scouring processes. Physical experiments. *Ocean Engineering*, 236, 109461.
- Nortek AS. The Comprehensive Manual for Velocimeters. Technical Report, 2018. Available online: <https://support.nortekgroup.com/hc/en-us/articles/360029839351-The-Comprehensive-Manual-Velocimeters>.
- P.I.A.N.C, (2015). The World Association for Waterborne Transport Infrastructure, "Guidelines for Protecting Berthing Structures from Scour Caused by Ships". Report No.180, Belgium.
- Römisch K., (1975). Der propellerstrahl als erodierendes element bei anund ablegenamovem von schiffen, *Seewirtschaft Berlin*, Vol.7, Part 7.
- Sarker, A., Flow Measurement Around Scoured Bridge Piers Using Acoustic-Doppler Velocimeter (ADV), *Flow Measurement and Instrumentation*, 9, 217-227, 1998.
- Tan, R. İ., & Yüksel, Y. (2018). Seabed scour induced by a propeller jet. *Ocean Engineering*, 160, 132-142.
- Verhey, H. J. (1983). "The stability of bottom and banks subjected to the velocities in the propeller jet behind ships." Delft Hydraulics Laboratory, Netherlands.
- Wei, M., Chiew, Y. M., & Cheng, N. S. (2020). Recent advances in understanding propeller jet flow and its impact on scour. *Physics of Fluids*, 32(10), 101303.
- Yuksel, Y., Tan, R. I., & Celikoglu, Y. (2019). Determining propeller scour near a quay wall. *Ocean Engineering*, 188, 106331.



Normal ve %4NaCl Çözünürlüklü Kür Edilmiş Düz ve Nervürlü Donatılı Farklı Dayanımlı Betonlar İçin Donatı Aderans Kaybının Hızlandırılmış Korozyon Deneyi ile Belirlenmesi

Determination of Reinforcement Adherence Loss by Accelerated Corrosion Test for Normal and 4%NaCl Solubility Cured Flat and Ribbed Reinforced Concretes with Different Strengths

Melek Akgül^{1*}, Orhan Doğan²

¹ Munzur Üniversitesi, Tunceli MYO, İnşaat Programı, 62000, Tunceli, TÜRKİYE

² Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 24/03/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Birçok yapı alanında yapı malzemesi olarak ilk sırada tercih edilen betonun, yüksek olan basınç dayanımının aksine, düşük olan çekme dayanımını artırmak ve eğilme gerilmeleri altında gevrek geçmeyi önleyebilmek için çelik çubukların takviyesi ile betonarme sistemler oluşturulmuştur. Betonun sağlamış olduğu yüksek alkalın ortam, betonarme donatısı ile beton arasındaki aderansın sağlanabilmesi ve donatının korozyondan korunabilmesi için betonarme elemanlarda aranan en önemli kriterlerdendir. Geçirgen bir yapıya sahip olan beton, agresif kimyasallara maruz kalması halinde zamanla korozyona uğrar ve beklenen durabiliteyi sağlayamaz. Korozyon, donatının içinde bulunduğu ortam ile kimyasal ve/veya elektrokimyasal reaksiyona girerek metalik özelliklerini kaybetmesidir. Betonarme donatısında kesit kaybına neden olmanın yanında, korozyon; donatı ile beton arasındaki aderansın da azalmasına veya yok olmasına neden olmaktadır. Günümüzde betonarme yapılar, kendi zati ağırlıklarına, servis ve sismik yüklere göre boyutlandırılır. Ancak, analizlerde korozyon dikkate alınmadığından, zamanla donatının aderans ve kesit kaybına uğraması nedeniyle, yapıların depremde hasar görmesine veya yıkılmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, donatıların korozyona bağlı aderans kaybını belirleyebilmek için hazırlanan deney numuneleri, Türkiye'deki mevcut betonarme yapıları temsil edecek şekilde tasarlanmıştır. Parametre olarak 5 farklı beton grubu, 2 farklı donatı türü ve 2 farklı kür şartı değişken alınıp, numuneler hızlandırılmış korozyon deneyine tabi tutulmuş, aderanstaki dayanım değişimi grafikler ve tablolar ile değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler

"Beton, Betonarme, Aderans dayanımı, Donatı korozyonu, Hızlandırılmış korozyon deneyi, Durabilite"

Abstract

Reinforced concrete systems have been created with the reinforcement of steel bars in order to increase the low tensile strength of concrete, which is preferred in the first place as a building material in many construction areas, as opposed to its high compressive strength, and to prevent brittle collapse under the bending stresses. The high alkaline condition provided by the concrete is one of the most important criteria sought in reinforced concrete elements in order to ensure the adherence between the reinforcement and the concrete and to protect the reinforcement from corrosion. Concrete, which has a permeable structure, corrodes over time if exposed to aggressive chemicals and cannot provide the expected durability. Corrosion is the loss of metallic properties by entering into a chemical or electrochemical reaction with the environment in which the reinforcement is exposed. Besides causing cross-section loss in reinforcement, corrosion; it also causes the adherence between reinforcement and concrete to decrease or disappear. Today, reinforced concrete structures are designed according to their self-weight, service and seismic loads. However, since corrosion is not taken into account in the analyses, due to the loss of adherence and cross-section of the reinforcement over time, it causes the structures to be damaged or collapsed in an earthquake. In this study, the test specimens prepared to determine the adherence loss of reinforcements due to corrosion were designed to represent the existing reinforced concrete structures in Turkey. As parameters, 5 different concrete groups, 2 different types of reinforcement and 2 different curing conditions were kept variable, the samples were subjected to accelerated corrosion test, and the change in adhesional strength was evaluated in graphs and tables.

Key Words

"Concrete, Reinforced concrete, Adhesional strength, Reinforcement corrosion, Accelerated corrosion test, Durability"

1. Giriş

Uzun yıllardır inşaat endüstrisinde yaygın olarak kullanılan beton; genel itibarı ile agrega, su, çimento ve gerektiğinde katkı maddelerinin takviyesi ile elde edilen kompozit bir yapı malzemesidir (Demir, 2009; Şimşek, 2012). Beton farklı üretim şartlarına kolaylıkla uyum sağlamasına bağlı olarak (Sevim, 2018); yollar, köprüler, barajlar ve konutlar gibi birçok yapı alanında tercih edilir ve her yıl yaklaşık olarak 25 milyar ton üretilmektedir. Başlangıçta plastik kıvamda olup hidrasyon sonucu katılaşıp, sertleşen beton zamanla mukavemet kazanır.

Betonun çekme mukavemeti, basınç mukavemetinin 1/8 ile 1/14'ü arasında bir değer alır (Yüzer vd., 2003). Basınç dayanımı yüksek olmasına rağmen yükler altında gevrek bir davranış sergileyen betonun istenilen süneklik özelliğine sahip olması betonarme çeliği ile beton arasındaki aderansa bağlıdır. Beton ve çelik çubuklardan oluşan bir yapı elemanının betonarme olarak davranabilmesi için çelik çubuklar ve betonun kenetlenmesi gerekir (Ersoy ve Özcebe, 2018). Kenetlenmeyi sağlayan çelik çubukla beton arasındaki kayma gerilmelerine "Aderans" denir (Güneyisi vd., 2005).

Zararlı dış ortamın varlığı, iyi bir aderansın var olduğu betonarme yapı elemanlarında dahi önemli durabilite sorunlarına sebep teşkil etmektedir. Beton ve betonarme servis ömrü süresince çevrede oluşan yıpratıcı etkiler karşısında beklenen dayanıklılık özelliğine sahip olmalıdır (Çoban, 2014; Baradan ve Aydın, 2013). Betonarme yapı elemanlarındaki önemli durabilite sorunlarından biri de korozyondur (Doğan ve Hamidiye, 2010). Çok üstün mekanik özelliklerine bağlı olarak mühendislik alanında yaygın olarak kullanılan çeliğin korozyona dayanıklılığı çok zayıftır. Beton, çimentonun hidrasyonu sonucu açığa çıkan Ca(OH)_2 nedeni ile çelik yüzeyinde alkalitesi yüksek ve koruyucu bir oksit tabakası oluşturur (Yamaç, 2010). Böylece korozyona karşı dayanıklılığı son derece düşük olan çelikte anodik akım yoğunluğunun kısıtlanması sağlanır, bu olaya alkali pasivasyonu denir (Aköz vd., 2007). Ancak betonun geçirimli olması, ortamda su ve oksijen bulunması, beton üretiminde Cl^- iyonu içeren agregaların ve/veya katkıların kullanılması, gibi parametreler karbonatlaşma ile ortamın pH'nın 11'in altına düşmesine neden olur. Bu olay donatı yüzeyindeki pasif demiroksit tabakasının tahrip olmasıyla başlayan korozyon yıkımına zemin hazırlar (Aköz vd., 2007). Betonarme yapılarındaki korozyon, değişken doğal ortam nedeni ile korozif ortam-beton ve beton-donatı ara yüzeylerinde sürekli olarak meydana gelen elektrokimyasal ve kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşur. Çevre-beton-donatı sisteminde, çevrenin çoklu değişen olmasına bağlı olarak kimyasal korozyon oluşur ve betonarmede kimyasal, fiziksel ve mekanik kalite kaybı yaşanır (Çizmecioglu vd., 2010).

Çelik, rutubetli ve yeterince oksijen içeren ortamlarda hızla korozyona uğrar (Özçelik ve Gelişli, 2018). Donatının yüzeyinde oluşan korozyon ürünü, kütlede çok az kayba neden olmasına rağmen, bileşimin türüne bağlı olarak hacimde %600'e varan artışları ile betonarme elemanın ömrünü dolayısı ile yapının güvenliğini azaltır (Aköz vd., 2007).

Beton basınç etkisinde 2000-4000 μD (10^{-6} Deformasyon) değerinde kısıalma oranına sahipken, çekmede kopma uzama oranı ~300 μD mertebesindedir (Yüzer vd., 2003). Gevrek bir malzeme olan betonun çekmede kopma uzama oranının çeliğe göre kısıtlı düzeyde olmasına da bağlı olarak; beton-donatı ara yüzeyinde oluşan korozyon ürünlerinin yaratacağı içsel gerilmeler ve çatlaklar kaçınılmazdır (Li vd., 2009; Xiaojuan vd., 2017; Pehlivan ve Aytekin, 2018).

Donatının çapına bağlı olarak metalde 10-50 μm 'lik kayba neden olan demiroksit, 2-3 cm'lik beton örtünün çatlaması için yeterlidir. Teorikte 10-30 $\mu\text{m}/\text{yıl}$ gibi küçük korozyon hızında dahi beton örtüsünün 1-3 yıl içinde çatlaması söz konusudur. Donatıdaki 10-20 μm gibi çok küçük kayıpların betonda, 0.05-0.1 mm gibi gözle görülebilir genişlikte çatlak oluşumuna neden olmaktadır (Yüzer vd., 2003; Yeğınobalı, 2000; Andrade vd. 1993; Aköz vd., 2000).

Beton-donatı aderansındaki kayıp; ilerleyen süreçte ivme kazanan bir korozyon gelişimi ve devamında yarattığı tahribata bağlı olarak yapının yanal yer değiştirme kapasitesindeki kayıpları doğurur (Göksu ve İlki, 2016; Yüzer vd., 2003). Zararlı dış ortam koşullarına bağlı olarak betonarme çeliğinde görülen korozyonun gelişimini tamamen durdurmak mümkün olmasa da, korozyonun başlama anı ve gelişim hızı gibi iki önemli parametrenin yapının etkili servis ömrü süresince kabul edilebilir limitlerin altında tutmak önemlidir (Çizmecioglu vd., 2010). Mevcut yapılarda korozyon mekanizmasının en önemli kriterleri; yapıda kullanılan malzeme, uygun imalat, inşaat sonrası yeterli koruma ve kür şartlarının yönetmelik esaslarına uygunluğu, yapının yaşı, çevresel ve bölgesel etkenler vb.'dir. Tüm bu kriterlerden en belirleyici olanları elbette ki uygun malzeme seçimi, mineral/kimyasal katkı maddelerinin kullanımı ve yalıtım önlemleridir (Aydın, 2012).

Meydana gelen yıkıcı depremler sonrası yapılan saha incelemeleri, yıkılan veya ağır hasarın raporlandığı yapıların büyük bölümünde donatıların korozyona uğradığını ve beton ile donatı arasındaki aderansın kaybolduğunu göstermektedir (Di Carlo vd., 2017).

Korozyondan etkilenen yapıların hizmet ömrü, donatının beton örtüsünün kaybolması ile karakterize edilmektedir (Yang vd., 2016). Korozyonun başladığı betonarme yapılarda donatı-beton aderansından, beton ve çeliğin mekanik özelliklerinden, donatı en kesit alanından, sargı donatısı etkinliğinden söz etmek ve hatta proje verilerini dikkate almak çok doğru olmamaktadır (Rajput vd., 2019). Ayrıca yapı güvenliği açısından en kritik elemanlardan olan kolonlar içinde korozyon mekanizmalanması ve aderans kaybı kolonların yatay yük altındaki davranışlarını ve alınabilecek önlemleri araştırmak, öncelikle aktif deprem kuşağı içinde yer alan Türkiye gibi birçok ülkede büyük önem arz etmektedir (Doğan, 2009). Yapıda durabilite ve etkili servis ömrü ilişkisi akademik ve ekonomik bir sorun olarak kabul edilmektedir (Doğan ve Akgül, 2020). Öngörülmeden durabilite koşullarına bağlı olarak etkili servis ömrünü tamamlamadan kullanım dışı kalma tehlikesinde olan birçok yapının yıkım, onarım ve yeniden inşa edilmesi inşaat faaliyetlerinin %40'ını oluşturmaktadır (Baradan, 2013; Taşdemir vd., 1999; Şengül, 2011). Yapılarda etkili servis ömrü, ciddi

korozyon hasarları sebebiyle ekonomik ve teknik olarak öngörülenden çok daha erken sona ermektedir (Aydın, 2012; Çizmecioğlu vd., 2010).

Betonarme aderansın da betonun basınç dayanımı, donatı türü ve farklı çevre koşulları değişken birer parametredir. Betonun basınç dayanımı, donatı türü ve kür koşullarının ayrı ayrı ele alındığı farklı çalışmalar olsa da çoklu fonksiyonlar olarak değerlendirildiği çalışma sınırlı sayıdadır. Bu çalışmada beton grubu ve betonarme çeliğinin yanı sıra kür şartları ve korozyon periyodunun aderans üzerindeki etkisinin tespiti amaçlanmıştır. 5 farklı beton grubu, 2 farklı betonarme çeliği ve 2 farklı kür şartlarının esas alındığı 5 farklı hızlandırılmış korozyon periyoduna bağlı aderans deneyleri gerçekleştirilmiş, donatılı ve donatısız beton numunelerden elde edilen fiziksel ve mekanik veriler grafik ve tablolar ile yorumlanmıştır.

2. Materyal ve Method

2.1. Materyal

Çalışma kapsamında donatılı ve donatısız beton numunelerin üretiminde kullanılan CEM I 42.5 R Portland Çimentosu fabrika verileri Tablo 1'de yer almaktadır (TS EN 197-1, 2012).

Tablo 1. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

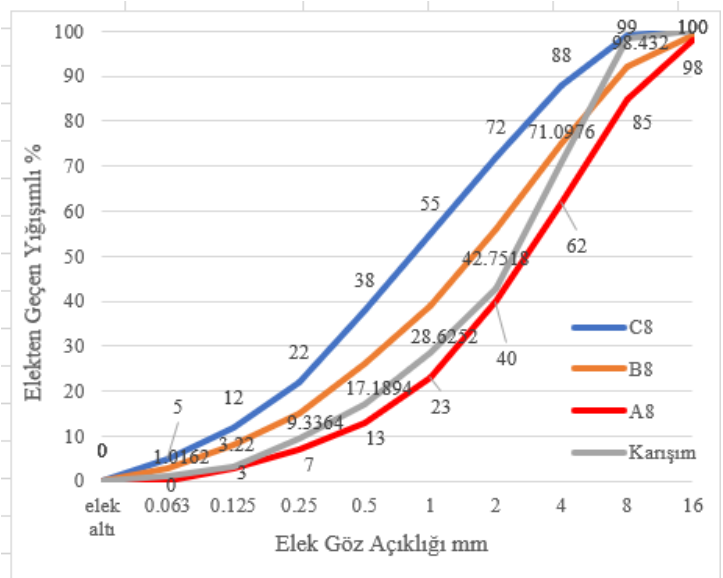
Kimyasal bileşim (%)	SiO ₂	16.95	Fiziksel ve mekanik özellikler	Blaine (cm ² /g)	3572
	Al ₂ O ₃	3.98		Özgül ağırlık (gr/cm ³)	3.12
	Fe ₂ O ₃	3.52		Piriz başı (dakika)	178
	CaO	65.53		Piriz sonu (dakika)	228
	Na ₂ O	0.20		2 günlük dayanım (MPa)	28.1
	SO ₃	2.94		7 günlük dayanım (MPa)	40.1
	K ₂ O	0.95		28 günlük dayanım (MPa)	50.5
	MgO	1.51			
	Cl ⁻	0.02			
	Kızdırma kaybı	4.05			
	Çözünmeyen kalıntı	0.43			

Numunelerin üretiminde kullanılan agrega karışımı; kırma taş 1 (KT1) ve kırma taş 2 (KT2) olmak üzere 2 farklı agregadan hazırlanmıştır. Beton karışımı için agregalar üzerinde agrega uygunluk deneyleri yapılmıştır. Karışımda kullanılan agreganın granülometrik dağılımı Şekil 1'de elek analizi verileri Tablo 2'de verilmiştir. (TS 3526, 1980; TS EN 933-1, 2012).

Karışımda TS 802'ye uygunluk ve standartta belirtilen en büyük tane boyutu (D_{max}) 8,0 mm olan beton için gradasyon eğrisi 3. Bölge (A-B arası) hedeflenmiştir. Agrega tane yoğunluğu KT1 ve KT2 için sırası ile 2.49 ve 2.63 gr/cm³'tür (TS 802, 2016). Çalışmada karışım suyu olarak, Kırıkkale Üniversitesi Merkez Kampüs şebeke suyu kullanılmıştır.

Tablo 2. Agrega Elek Analizi

Elek göz açıklığı (mm)	Elekten Geçen % (Yığışlımlı)	
	KT 1	KT2
16	100.000	100.000
8	100.000	95.100
4	100.000	9.680
2	60.755	4.495
1	40.710	2.945
0.5	24.375	1.920
0.25	13.050	1.445
0.125	4.380	0.755
0.063	1.405	0.190
Toplama Kabı	0.000	0.000



Şekil 1. Karışımda kullanılan agreganın granülometri eğrisi

Donatılı beton numunelerin üretiminde kullanılmak için düz (nervüzsüz) ve nervürlü olmak üzere TSE 708'e uygun Ø8'lik betonarme çeliği temin edilmiştir. Aderans deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanan düz ve nervürlü betonarme çeliği gerekli boyutlarda kesilmiş ve aderans deneylerine uygunluğu sağlanmıştır (Şekil 2) (TS 708, 2016).

Agresif kür ortamı hazırlamak ve donatılı beton numunelerde hızlandırılmış korozyon deneylerinin uygulanmasında kullanılmak üzere %4'lük sanayi tipi NaCl çözeltisi hazırlanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan KT1, KT2, CEM I 42.5R Portland Çimentosu, betonarme çeliği genel görüntüsü Şekil 2'de yer almaktadır.



Şekil 2. KT1, KT2, CEM I 42.5 R portland çimentosu, betonarme çeliği genel görünümü

2.2. Metot

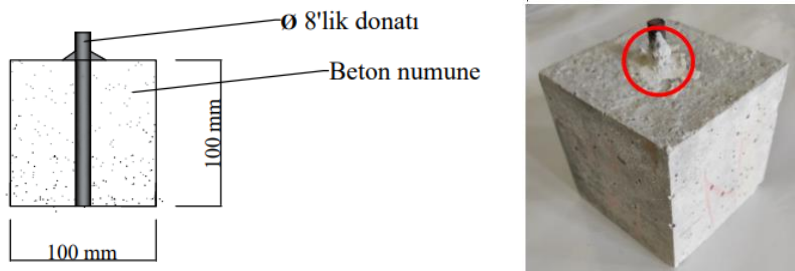
2.2.1. Numune üretimi, kodlaması ve kür şartları

En büyük agrega tane boyutu seçimi; beton işlenebilirlik ve numune boyutları dikkate alınarak D_{max} 8 mm olarak belirlenmiş, tane dağılımı tespitinde TS 802 belirtilen D_{max} 8 mm gradasyon eğrisinde 3 numaralı bölge hedeflenerek KT1 %68, KT2 %32 oranlarında olacak şekilde karışım tasarımı hazırlanmıştır. Su miktarı ve kıvam tayini bu çalışmada donatılı beton numunelerde donatı dikiminin gerçekleştirilecek olmasına bağlı olarak büyük önem arz etmektedir. Su/Çimento oranı; TS 802'de hedeflenen karakteristik silindir basınç dayanımı ($f_{ck, sil}$) ve deneylerin laboratuvar ortamında gerçekleştirileceği göz önüne alınarak hava sürüklenmemiş, katkısız ve artan basınç dayanımına ters orantılı olarak azalan su/çimento (S/Ç) oranı ön çalışmalar ile desteklenerek tayin edilmiştir. Beton karışım hesabında hava miktarı %3 alınmıştır. 5 farklı beton karışımı için 1 m³ beton üretimine esas oluşturan malzeme ve oranları Tablo 3'te yer almaktadır.

Tablo 3. 1 m³ beton için karışım tasarımı (kg/m³)

Beton Grubu	S/Ç	Agrega (kg)		Su (kg)	Çimento (kg)	Toplam (kg)
		KT1 (0-4 mm)	KT1 (4-8 mm)			
A	0.99	1086.14	509.91	263.57	256.57	2116.18
B	0.88	1068.52	501.64	263.42	288.64	2122.21
C	0.79	1050.46	493.16	263.26	321.52	2128.39
D	0.69	1024.86	481.14	263.03	368.12	2137.15
E	0.61	998.34	468.69	262.80	416.39	2146.23

Her beton grubu için üretilen donatılı beton numuneler 100*100*100 mm ayrıtlı olup inşaat çeliğinin (Ø8 düz ve Ø8 nervürlü) 100 mm'lik kısmı betona gömülü olarak şekilde tasarlanmıştır. Korozyon performansının gerçekleşmesi ve tespitinde önemli bir adım olarak kabul edilen ve 28 günlük kür süresinde korozyonun sadece betonun geçirimsizlik özelliğine bağlı olarak ilerlemesi ve sadece beton içinde kalan donatının korozyona uğramasını sağlamak amacı ile beton yüzeyi ve donatı temas bölgesi epoksi ile yalıtılmıştır (Şekil 3). Üretilen küp numunelerde kodlamada; beton grubu, kür şartları, donatı türü ve korozyona uğrama periyodunu temsil edecek şekilde yapılmıştır (Tablo 4).



Şekil 3. Donatılı beton numunelerde donatı tasarımı

Tablo 4. Numune kodlama verileri

Beton Grubu		Kür Koşulları		Betonarme Çeliği		Korozyon Süresi	
Kod	Özellik	Kod	Özellik	Kod	Özellik	Kod	Özellik
A	$f_{ck, sil}$	%4	%4 NaCl	Ød	Ø8 düz	P ₀	0 saat
B	$f_{ck, sil}$	%0	%0 NaCl	Øn	Ø8 nervürlü	P ₆	6 saat
C	$f_{ck, sil}$					P ₁₂	12 saat
D	$f_{ck, sil}$					P ₂₄	24 saat
E	$f_{ck, sil}$					P ₃₆	36 saat
						P ₄₈	48 saat

Donatılı (düz ve nervürlü Ø8) ve donatısız numuneler; 5 farklı beton grubu için her beton grubunda 36 adet (12 adet donatısız, 24 adet donatılı) olmak üzere toplam 180 adet 100*100*100 mm ayrıtlı küp numuneler olarak üretilmiştir. Numunelerin yarısı %4 NaCl içeren agresif su küründe, diğer yarısı 20 ± 2 °C'de kirece doymun su küründe 28. deney gününe kadar kür edilmiştir (Şekil 4) (TS EN 12390-2, 2019).

**Şekil 4.** Donatılı ve donatısız beton numunelerin üretimi ve küri

2.2.2. Deneysel çalışmalar

Donatısız 100*100*100 mm'lik küp numunelerde 28. deney gününde sertleşmiş beton yoğunluğu ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Donatılı küp numunelerde hızlandırılmış korozyon deneyi uygun olarak gerçekleştirilmiş, deney periyodu yapılan ön çalışmalar ışığında; 0 saat (şahit numune), 6, 12, 24, 36 ve 48 saat olacak şekilde uygulanmıştır. Korozyon deneyi sonrası tüm numune setlerinde push-out aderans deneyleri ve gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

Sertleşmiş beton yoğunluğu ve beton basınç dayanımı deneyi

28. deney gününde kür havuzundan alınan numunelerin yüzeyi havlu ile kurutulmuş doymun yüzey kuru ağırlığı, Arşimet terazisi yardımıyla numunenin su içinde asılı ağırlığı, (105 ± 2) °C'de hava dolaşımı etüvde 24 saat aralıklı ard arda ölçümler arası % 0.2'den daha az kütle değişimine kadar bekletilip oda sıcaklığında soğuması sonrası ağırlığı tespit edilmiştir. Sertleşmiş beton yoğunluğu (D), Denklem 1 ve 2 aracılığı ile hesaplanmıştır (TS EN 12390-7, 2019).

$$V = \frac{m_a - [(m_{st} - m_w) - m_{st}]}{P_w} \quad (1)$$

$$D = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Denklem 1 ve 2 için;

V: Numune hacmi, (m³)

m_a: Numunenin havadaki kütlesi, (kg)

m_{st}: Kefenin su içerisindeki görünür kütlesi, (kg)

m_w: Numunenin su içerisindeki görünür kütlesi, (kg)

p_w: Suyun 20°C sıcaklıktaki yoğunluğu, (1000 kg/m³ alınmıştır)

D: Numunenin nem ve hacim tayini metoduna bağlı birim hacim kütlesi, (kg/m³)

28 gün iki farklı kür havuzunda olgunlaşan 100*100*100 mm donatısız küp numunelerin basınç dayanımı verileri TS EN 12390-3'e uygun olarak 300 ton kapasiteli cihaz yardımı ile sabit yükleme altında elde ve Denklem 3 ile hesaplanmıştır. Basınç deneyi ve numune örneklerine dair görseller Şekil 5'te yer almaktadır (TS EN 12390-3, 2003).

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3)$$

Denklem 3 için;

f_c : Deney numunesinin basınç dayanımı, (N/mm²)

F: Kırılma yükü, (N)

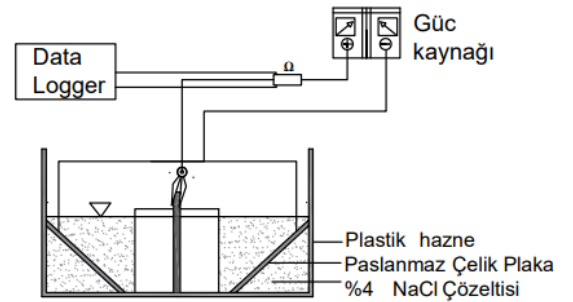
A_c : Uygulama yönüne dik deney numunesi kesit ortalama alanını, (mm²) belirtmektedir.



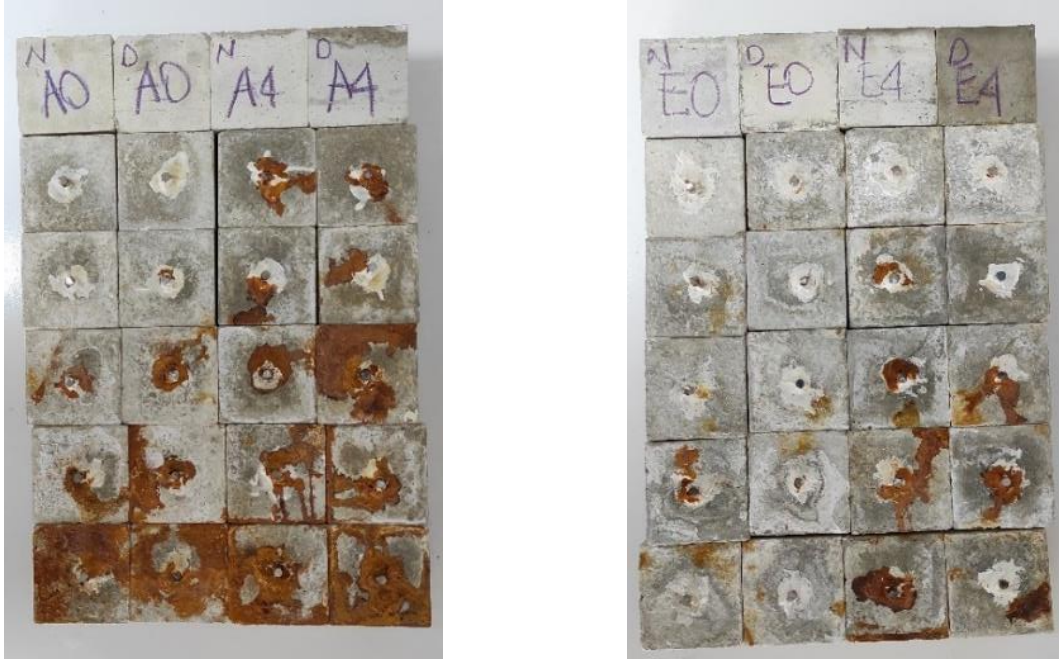
Şekil 5. Basınç deneyi ve numune örnekleri

Hızlandırılmış korozyon ve aderans deneyi

Hızlandırılmış korozyon deneyi betonun geçirimsizlik özelliği hakkında dolaylı olarak bilgi veren bir yöntemdir. Bu deney düzeneği doğru akım kapasiteli bir güç kaynağı, verilerin toplanmasında kullanılan bir data logger, içerisinde % 4'lük NaCl çözeltisi ve iki adet paslanmaz çelik plaka bulunan bir plastik kap ve deney numunesinden oluşmaktadır. Deney düzeneği Şekil 6'da verilmiştir ve benzer çalışmalarda kullanılan deney düzenekleri ile eşdeğer özelliktedir (Topçu ve Boğa, 2007; Al-Zahrani vd., 2002; Güneyisi vd., 2005). Kullanılan devrede donatı çubuğu anot, kullanılan plakalar katodu temsil ederken NaCl çözeltisi de elektrolit olarak kullanılmıştır. Yapılan ön çalışmalar ışığında sistemde sabit 20 volt gerilim kullanımı uygun görülmüştür. Deney düzeneğinde doğru akım güç kaynağına paralel bağlı numunelerde 0, 6, 12, 24, 36 ve 48 saatlik periyotlar izlenerek hızlandırılmış korozyon uygulanmış ve her bir kanaldan geçen korozyon akımı değerleri 2 dakikalık veri sıklığı ile data logger tarafından toplanmıştır (Topçu ve Boğa, 2008). Hızlandırılmış korozyon deneyi sonrası numune genel görünümü Şekil 7'de yer almaktadır.



Şekil 6. Hızlandırılmış korozyon deney düzeneği



A.%0.Øn.P ₀	A.%0.Ød.P ₀	A.%4. Øn.P ₀	A.%4.Ød.P ₀
A.%0.Øn.P ₆	A.%0.Ød.P ₆	A.%4. Øn.P ₆	A.%4.Ød.P ₆
A.%0.Øn.P ₁₂	A.%0.Ød.P ₁₂	A.%4. Øn.P ₁₂	A.%4.Ød.P ₁₂
A.%0.Øn.P ₂₄	A.%0.Ød.P ₂₄	A.%4. Øn.P ₂₄	A.%4.Ød.P ₂₄
A.%0.Øn.P ₃₆	A.%0.Ød.P ₃₆	A.%4. Øn.P ₃₆	A.%4.Ød.P ₃₆
A.%0.Øn.P ₄₈	A.%0.Ød.P ₄₈	A.%4. Øn.P ₄₈	A.%4.Ød.P ₄₈

E.%0.Øn.P ₀	E.%0.Ød.P ₀	E.%4. Øn.P ₀	E.%4.Ød.P ₀
E.%0.Øn.P ₆	E.%0.Ød.P ₆	E.%4. Øn.P ₆	E.%4.Ød.P ₆
E.%0.Øn.P ₁₂	E.%0.Ød.P ₁₂	E.%4. Øn.P ₁₂	E.%4.Ød.P ₁₂
E.%0.Øn.P ₂₄	E.%0.Ød.P ₂₄	E.%4. Øn.P ₂₄	E.%4.Ød.P ₂₄
E.%0.Øn.P ₃₆	E.%0.Ød.P ₃₆	E.%4. Øn.P ₃₆	E.%4.Ød.P ₃₆
E.%0.Øn.P ₄₈	E.%0.Ød.P ₄₈	E.%4. Øn.P ₄₈	E.%4.Ød.P ₄₈

Şekil 7. Hızlandırılmış korozyon deneyi sonrası numune genel görünümü

Hızlandırılmış korozyon deneyleri yapıldıktan sonra tüm numune setlerine aderans deneyleri uygulanmış, deney verileri ile aderans dayanımı hesaplanmıştır (Denklem 4). Hızlandırılmış korozyon sonrası aderans deneyi uygulanan numunelerin genel görünümü ve iç yapısı Şekil 8’de verilmiştir.

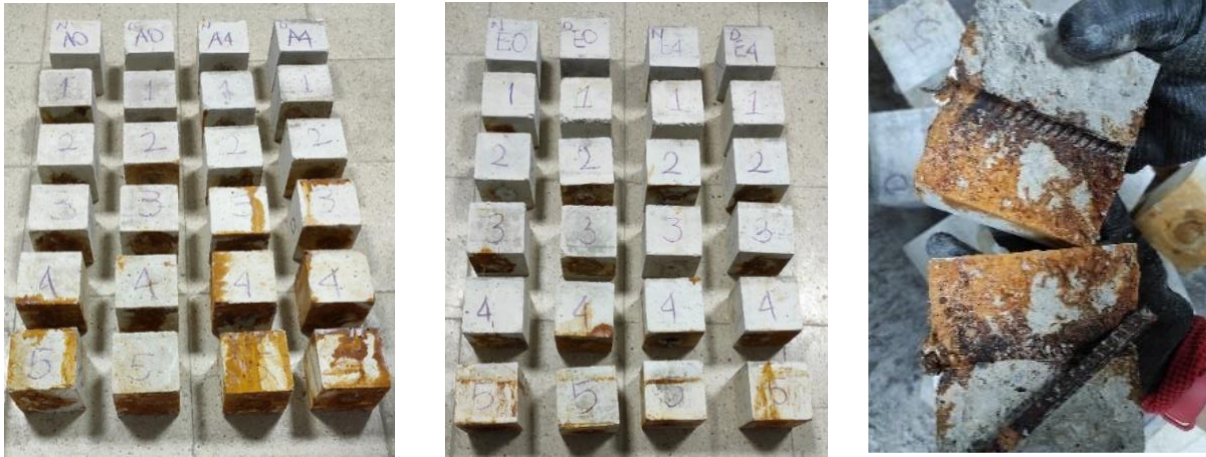
$$\tau = \frac{\text{Aderans Kuvveti}}{\pi \cdot \phi \cdot l} \quad (4)$$

Denklem 4 için;

τ : Aderans dayanımı,

ϕ : Donatı çapı

l : Aderans boyu (betona gömülü donatı uzunluğu)



Şekil 8. Aderans deneyi sonrası numune genel görünümü

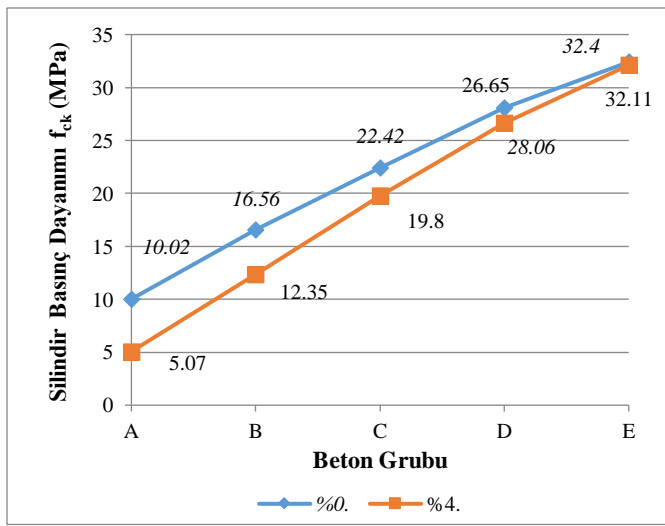
3. Bulgular ve Tartışma

Bu deneysel çalışmada donatılı ve donatısız beton numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

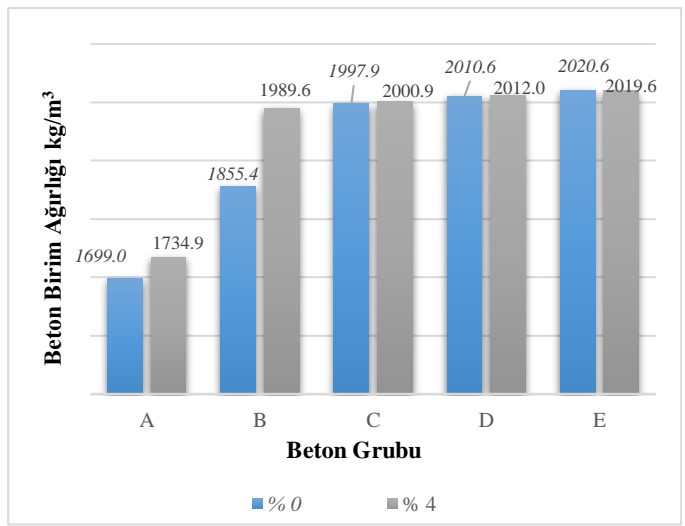
3.1. Sertleşmiş beton birim ağırlık ve basınç dayanımı deneyi sonuçları

5 farklı beton grubu için yapılan 28. gün basınç dayanımı verileri her beton grubu için 6 adet (3 adet standart kür, 3 adet %4 NaCl içeren kür) olarak yapılmıştır. Her grupta elde edilen verilerin ortalaması MPa olarak hesaplanıp Şekil 9'da grafiksel olarak verilmiştir. Tüm beton sınıflarında basınç dayanımı verileri, standart kür edilen numunelerde daha yüksek değerlerde seyretmektedir. Standart kür uygulanan A, B, C, D ve E beton grubu numunelerin kaydedilen basınç dayanımı değerleri, yine aynı grupların %4 NaCl kür ortamında kür edilen numunelerinin basınç dayanımı değerleri ile kendi içlerinde kıyaslandığında; sırasıyla %49.40, %25.42, %11.69, %5.02, %0.89 azalan oranlar ile kaydedilmiştir (Şekil 9).

Sertleşmiş beton birim ağırlığını %4 NaCl etkisi A ve B düşük dayanımlı betonlarda %7.23'lerde artırırken, C, D ve E beton gruplarında ihmal edilecek düzeyde %1'lerde artırdığı görülmektedir. Standart kür edilen numuneler kıyaslandığında A beton grubu ile E beton grubunun beton basınç dayanımı %223.42 artarken sertleşmiş birim ağırlığının %18.92 oranında arttığı görülmektedir. Betonun basınç dayanımının 10.02 MPa'dan 32.40 MPa çıkması ile beton basınç dayanımındaki artış oranının (%223.42) sertleşmiş betonun birim ağırlığındaki artış oranına (%18.92) göre değerlendirmesi yapıldığında (%223.42 / 18.92) kazanımın 11.81 kat olduğu görülmektedir (Şekil 9, 10).



Şekil 9. Farklı beton grubu için standart (%0) ve %4 NaCl kür şartlarına bağlı silindirik basınç dayanımı



Şekil 10. Farklı beton grubu için standart (%0) ve %4 NaCl kür şartlarına bağlı sertleşmiş beton yoğunluğu

3.2. Hızlandırılmış korozyon ve aderans deneyi sonuçları

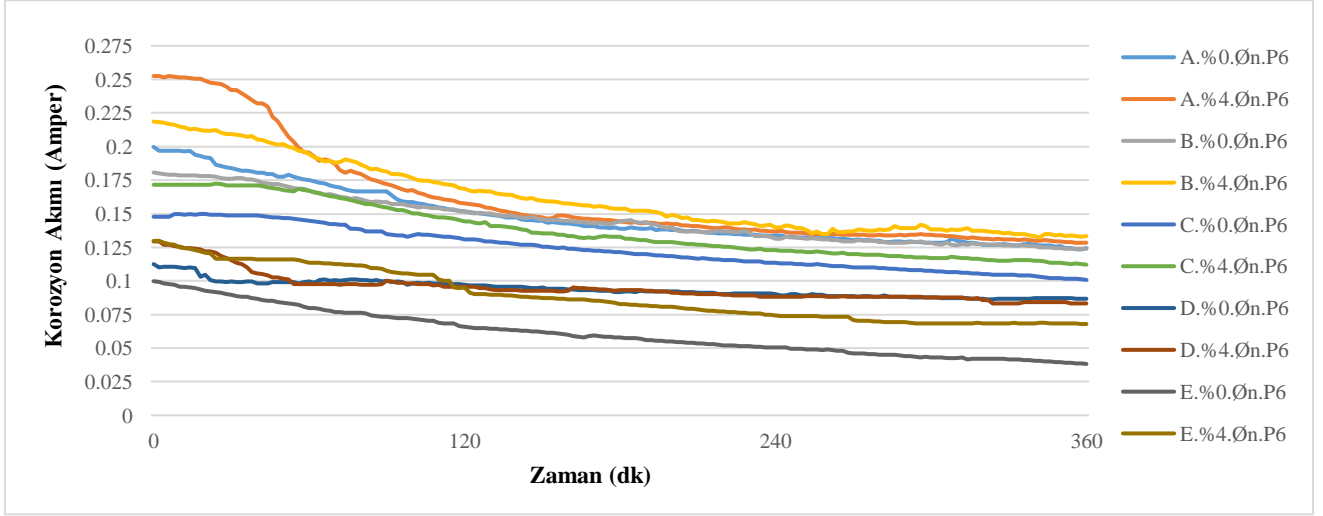
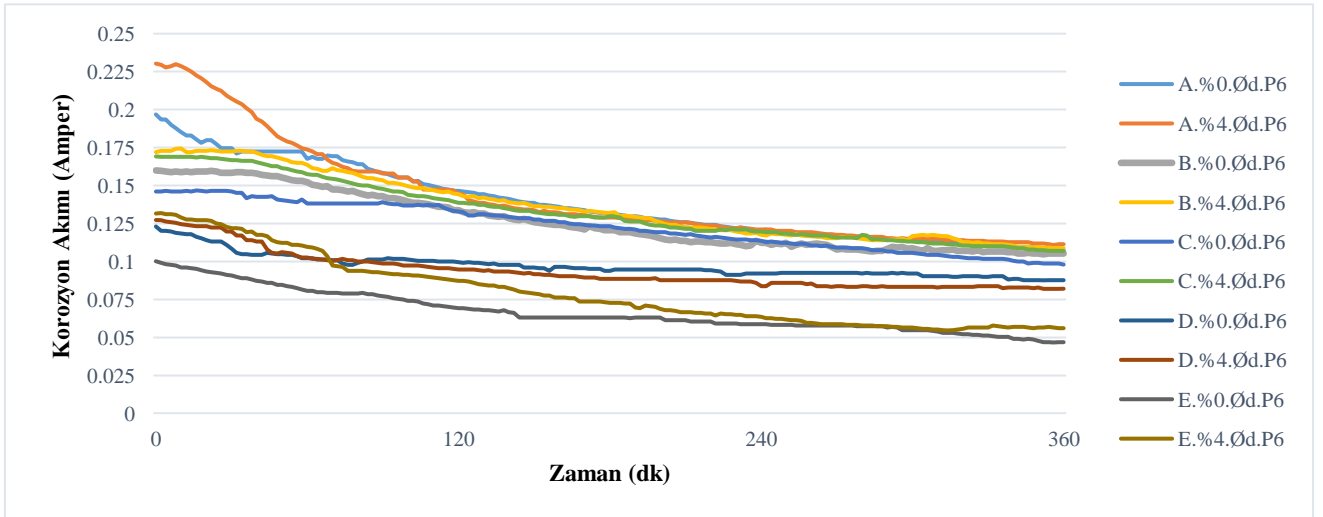
Tüm beton sınıflarına uygulanan hızlandırılmış korozyon deneyi, her grupta şahit numune (0) ve 6, 12, 24, 36 ve 48 saatlik periyotlar ile korozyona uğratılan numunelerin 2 dakika aralıklı verilerinden oluşmaktadır. P₆ (6 saat) periyodunda elde edilen korozyon akımı ve zaman ilişkisi düz ve nervürlü donatılar için Şekil 11 ve 12'de verilmiştir. Beton sınıfları arasında en düşük basınç dayanımlı olan A grubu betonun tüm korozyon periyotlarında korozyona başlangıç akımı en yüksek düzeydedir. Korozyon akımı ve zamanın ilişkilendirildiği grafiklerde %4 NaCl kür ortamındaki numunelere uygulanan korozyona uğratma akım değerleri, aynı gruptaki standart kür (%0) uygulanan numunelere göre daha yüksektir. Korozyon deneyi verilerine bakıldığında, beton basınç dayanımı yüksek olan E grubu beton numunelerinde donatının korozyon başlangıç akım değeri diğer beton gruplarına göre en düşük değerdedir.

%0 kür ortamındaki nervürlü donatılı numunelerin P₆ periyodundaki korozyon başlangıç akım değeri A grubu betonda yaklaşık 0.20, E grubu betonda yaklaşık 0.10 olarak kaydedilmiştir. Bu veriler ışığında sadece beton sınıfının değişmesi ile A ve E beton grubu arasındaki değişim %50.03 oranında azalma ile hesaplanmıştır. Benzer şekilde, %4 kür ortamındaki nervürlü donatılı numunelerin P₆ periyodundaki korozyon başlangıç akım değeri A grubu betonda yaklaşık 0.25, E grubu betonda yaklaşık 0.13'tür. Yani %48.58 oranında azalma söz konusudur.

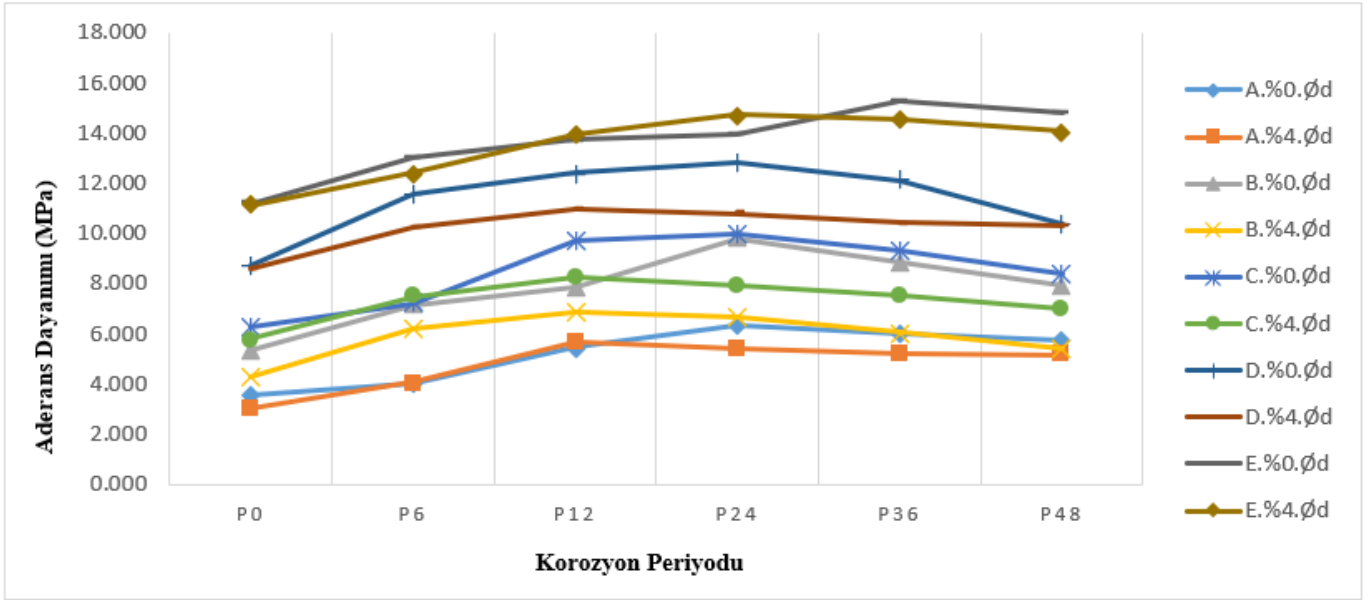
Beton dayanımı az olan beton gruplarında, agresif olmayan ortamlarda dahi korozyon başlangıç akım değerinin yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, tüm beton gruplarında korozyon akım değerinin 6 saat sonrasında yaklaşık 1/2 ile 2/3 oranlarında azaldığı görülmüştür. A, B, C, D ve E grupları için tüm periyotların (P₆, P₁₂, P₂₄, P₃₆, P₄₈) başlangıç akım değerlerinin ortalaması Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Ortalama korozyon başlangıç akım değerler (Amper)

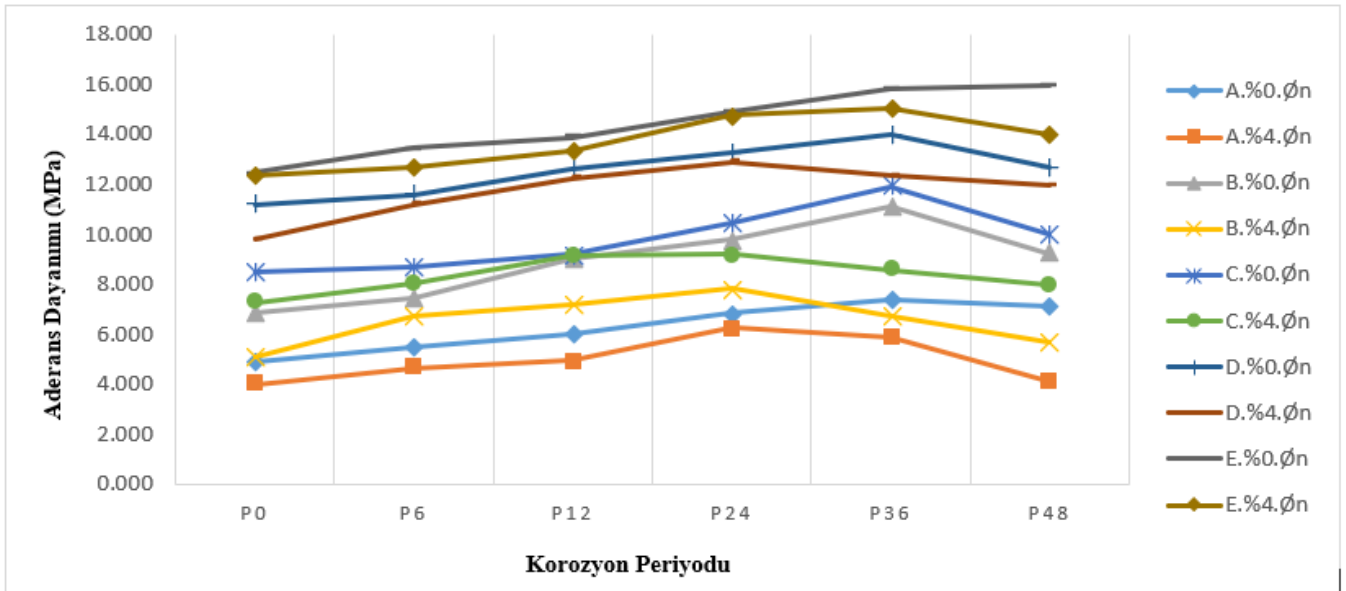
A.%0.Øn	0.1959	B.%0.Øn	0.1850	C.%0.Øn	0.1400	D.%0.Øn	0.1380	E.%0.Øn	0.0993
A.%0.Ød	0.1992	B.%0.Ød	0.1509	C.%0.Ød	0.1398	D.%0.Ød	0.1250	E.%0.Ød	0.0980
A.%4.Øn	0.2463	B.%4.Øn	0.2219	C.%4.Øn	0.1592	D.%4.Øn	0.1467	E.%4.Øn	0.1312
A.%4.Ød	0.2327	B.%4.Ød	0.1794	C.%4.Ød	0.1531	D.%4.Ød	0.1347	E.%4.Ød	0.1283

**Şekil 11.** Nervürlü donatılı numunelerde P₆ periyotlu (6 saat) hızlandırılmış korozyon - zaman ilişkisi**Şekil 12.** Düz donatılı numunelerde P₆ periyotlu (6 saat) hızlandırılmış korozyon - zaman ilişkisi**Korozyona bağlı aderans değişimi**

5 farklı periyotta korozyona uğratan ve hiç korozyona uğratılmayan (şahit) donatılı numuneler üzerinde push-out deneyi ile aderans dayanımı (MPa) verileri elde edilmiş ve Şekil 13 ve 14'te verilmiştir. En yüksek aderans değerleri basınç dayanımı en yüksek olan E grubu betona ait numunelerden elde edilmiştir. Basınç dayanımı en düşük olan A beton grubu için aderans değerleri de tüm periyotlarda en düşük düzeydedir. Aderans verilerinden anlaşılacağı üzere korozyonun her beton grubunda değişmekle birlikte önce artan sonrasında ise azalan bir eğri takip etmesi önemli bir veridir. Bu durum, değişen korozyon periyotlarında korozyona bağlı donatıdaki hacimsel genişlemeye bağlı olarak beton-donatı ara yüzündeki basıncın artması ile aderans dayanımının yükselmesi, zamanla donatı yüzeyinde oluşan pas kalınlığının (ürünlerinin) artmasıyla da aderansın zayıflaması şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 13. Düz donatılı numunelerde korozyon periyodu (P) aderans verileri (MPa)



Şekil 14. Nervürlü donatılı numunelerde korozyon periyodu (P) aderans verileri (MPa)

Şahit numunenin (0 saat, korozyonsuz) başlangıç aderans dayanımı ile (τ_{k0}), diğer numunelerin maksimum (τ_{max}) aderans değerleri arasındaki artış farkı değerlendirilmiştir (Tablo 6). Nervürlü donatılara kıyasla, düz donatılı beton numunelerde, daha düşük olan başlangıç aderansının daha hızlı arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumun aksine, "*" ile işaretlenmiş nervürlü donatılı numunelerde aderans değişiminin daha yüksek olduğu numuneler görülmüştür. P₂₄-P₃₆ aralığında (24-36 saat aralığında) numunelerin aderans dayanımının (τ_{max}) maksimumuna ulaştığı görülmüştür.

Tablo 6. P₀ periyoduna göre aderans değişimi $\Delta\tau$ (%)

Numune Kodu	Max aderans (τ_{\max})'ın periyodu (P _{max})	Aderans artışı % ($\Delta\tau = \frac{\tau_{\max} - \tau_{k0}}{\tau_{k0}} \times 100$)
A.%0.Øn	P ₃₆	50.32
A.%0.Ød	P ₂₄	78.43
A.%4.Øn	P ₂₄	55.92
A.%4.Ød	P ₁₂	86.33
B.%0.Øn	P ₃₆	62.34
B.%0.Ød	P ₂₄	82.40
B.%4.Øn	P ₂₄	53.55
B.%4.Ød	P ₁₂	60.82
C.%0.Øn	P ₃₆	40.36
C.%0.Ød	P ₂₄	59.08
C.%4.Øn	P ₂₄	26.72
C.%4.Ød	P ₁₂	42.21
D.%0.Øn	P ₃₆	24.94
D.%0.Ød	P ₂₄	46.72
D.%4.Øn	P ₂₄	31.46*
D.%4.Ød	P ₁₂	27.20*
E.%0.Øn	P ₄₈	27.66
E.%0.Ød	P ₃₆	36.20
E.%4.Øn	P ₃₆	22.12
E.%4.Ød	P ₃₆	30.68

P_{max}: Aderansın maksimum olduğu (τ_{\max}) korozyona uğratılma periyodu

*: Nervürlü donatılı numunelerde $\Delta\tau$ 'nin, nervürsüz (düz) donatılı numunelerin $\Delta\tau$ değerinden fazla olduğu durumlar.

4. Sonuç

Betonarme yapıların güvenliğini ve servis ömrünü etkileyen en önemli faktörlerden biri betonarme çeliğindeki korozyondur. Betonarme binalarda donatı korozyonu, taşıyıcı elemanları ve yapısal sistemin bütününe olumsuz etkiler. Her ne kadar yeni inşa edilen yapılar için yönetmelik esas ve uygulamaları söz konusu olsa da mevcut betonarme binaların birçoğu düşük performanslı beton kullanımı, yapım ve tasarım hataları nedeniyle deprem yükleri altında düşük yapısal performans göstermektedir. Bu performansta göz ardı edilen gizli parametre, korozyonun yarattığı durabilite sorunudur. Korozyon, donatıdaki kesit kaybı nedeniyle betonarme yapıların stabilitesini olumsuz yönde etkiler.

Bu çalışmanın verilerine göre; betonarmede betonun S/Ç oranı, basınç dayanımı, kür şartları ve kullanılan donatının türü önemli birer parametredir. Farklı beton sınıfları, donatı türleri ve kür şartları değişken alınarak yapılan bu çalışmada, betonarme yapılarda korozyon nedeniyle aderans üzerinde etkili olan, imalat reçetesi, kür şartları ve yapının servis ömrü süresince maruz kalması muhtemel olan zararlı dış etkiler rol model alınmıştır. Hali hazırda Türkiye'de var olan birçok yapıyı temsil etmek amacıyla C5-C30 bandında değişken dayanımlarda beton ile farklı donatı (düz ve nervürlü) kullanılarak gerekli deneysel çalışma ve değerlendirmeler yapılmıştır.

Ülkemizde korozyona maruz kalmış mevcut betonarme yapıların kapsamlı değerlendirilmesine olanak sağlayacak yöntem ve modeller yönetmeliklerde yer almamakla beraber, korozyonun etkisi yalnızca donatı çapındaki azalma olarak değerlendirilmektedir. Birçok korozyon deneyi, donatı ağırlık kaybının donatının tüm yüzeyinde eşit gerçekleşmemesi ve lokal bir kesitinde oluşması durumunda, donatıdaki dayanım kaybının aderans göçmesi yerine donatı kopması şeklinde neticelendirmektedir.

Yapılan bu deneysel çalışmanın sonucunda;

- Standartlara uygun kür edilen 10.02 ve 32.40 MPa aralığındaki 5 grup farklı beton numunelerin basınç dayanımlarının, aynı grupların %4 NaCl kür ortamında kür edilen numunelere kıyasla, basınç dayanımındaki artışın aksine, %49.40-0.89 oranlarında daha yüksek gerçekleştiği, beton dayanımının 32.40 MPa çıkması ile NaCl etkisinin minimize olduğu görülmüştür.

- Düşük dayanımlı A ve B beton gruplarında, %4 NaCl'nin sertleşmiş beton birim ağırlığını %7.23'lerde artırdığı, normal dayanımlı C, D ve E beton gruplarında ihmal edilecek düzeyde %1'lerde olduğu görülmüştür. Standart kür edilen numuneler kıyaslandığında A beton grubu ile E beton grubunun beton basınç dayanımı %223.42 artarken sertleşmiş birim ağırlığının %18.92 oranında arttığı görülmüştür. Betonun basınç dayanımının 10.02 MPa'dan 32.40 MPa çıkması ile artış oranının, sertleşmiş betonun birim ağırlığındaki artış oranına kıyaslandığında kazanımın 11.81 katı olduğu görülmüştür.
- Hızlandırılmış korozyon deneylerinde beton sınıfları arasında 10.02 MPa dayanımlı A grubu betonda, tüm periyotlar için korozyon başlangıç değeri en yüksektir. Korozyon akımı ve zamanın ilişkilendirildiği grafiklerde %4 NaCl kür ortamındaki numunelere uygulanan korozyona uğratma akım değerleri, aynı gruptaki standart kür uygulanan numunelere göre daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Korozyon deneyi verilerine bakıldığında, beton basınç dayanımı 32.40 MPa olan normal dayanımlı beton donatısındaki korozyon başlangıç akım değerinin, daha düşük diğer beton gruplarına göre daha az olduğu görülmüştür. P₆ (6 saat) periyodunda standart kür (%0) uygulanan nervürlü donatıdaki korozyon başlangıç akım değeri A grubu numunelerde yaklaşık 0.20 iken E grubu numunelerde yaklaşık 0.10'a düşerek iki beton sınıfı arasında %50.03 oranında fark oluşturduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, %4 NaCl çözeltide bekletilen A ve E grubu numuneler arasındaki geçişte A grubu için 0.25, E grubu için 0.13 değerini alarak %48.58 oranında bir azalma ile kaydedilmiştir.
- Beton dayanımı az olan beton gruplarında, agresif olmayan ortamlarda dahi korozyon başlangıç akım değerinin yüksek olduğu görülmüştür.
- Aderans deneyi verileri ışığında en yüksek aderans değerleri; 32.40 MPa basınç dayanımına sahip E grubu numunelerden elde edilmiştir. Basınç dayanımı düşük olan beton grupları için aderans değerleri de tüm periyotlarda en düşük düzeydedir. Hızlandırılmış korozyon deneylerinde, aderans ve korozyon değerlerinin her beton grubunda değiştiği, küçük periyotlar için arttığı, ancak periyot süresinin artması ile bu değerlerin düştüğü görülmüştür. Bu durum, değişen korozyon periyotlarında korozyona bağlı donatıdaki hacimsel genleşmeye bağlı olarak beton-donatı ara yüzeyindeki basıncın artması ile aderans dayanımının yükselmesi, zamanla donatı yüzeyinde oluşan pas kalınlığının artmasıyla da aderansın zayıflaması şeklinde yorumlanmıştır.
- Nervürlü donatılara kıyasla, düz donatılı beton numunelerde, daha düşük olan başlangıç aderansının daha hızlı arttığı gözlemlenmiştir. P₂₄-P₃₆ aralığında (24-36 saat aralığında) tüm numunelerin aderans dayanımının maksimuma ulaşmaktadır.

Sonuç olarak, düşük dayanımlı betonlarda korozyona bağlı aderans kaybının yüksek olduğu, %4 NaCl içeren çözeltide bu etkinin daha da arttığı görülürken, beton basınç dayanımının artması ile bu etkilerin azaldığı ve hatta C30 üzeri betonda bu etkilerin ihmal edilir dereceye düştüğü tespit edilmiştir. Bu çalışmalara ek olarak, farklı çözünürlükte ve farklı çözeltilerde farklı dayanımlardaki betonların, kılcal ve kütlice su emme oranları ile beton basınç ve düz ve nervürlü donatılardaki aderans dayanımı değişimlerinin araştırılmasına yönelik yapılacak çalışmalar bu çalışmanın kapsamını ve etkisini mümkün kılacaktır.

Referanslar

Aköz, F., Yüksel, Y., Yüzer, N., Yılmaz, T., Doran, B. (2007). Betonarme deniz yapılarında korozyon hasarının tespiti. 6. Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, 235-242, İzmir, Türkiye.

Aköz, F., Zorbozan, M., Yüzer, N., (2000). Betonarme yapılarda korozyon hasarının tespiti onarım için öneriler. Metal Dünyası, 89, 25-28.

Al-Zahrani, M. M., Al-Dulaijan, S. U., Ibrahim, M., Saricimen, H., Sharif, F. M. (2002). Effect of waterproofing coatings on steel reinforcement corrosion and physical properties of concrete. Cement and Conc. Composite, 24,127-137. ISSN 0958-9465, [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00033-6).

Andrade, C., Alonso, C., Molina, F.J., (1993). Cover Cracking as a Function of Bar Rebar Corrosion: Part I-Experimental Test. Materials and Structures, 26, 453-464.

Aydın, Ö. (2012). Beton yapılarda donatı korozyonunun önlenmesine yönelik tedbirlerin araştırılması. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Baradan, B., Aydın, S. (2013). Betonun Dürabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık), Hazır Beton Yayınları. 54-68.

Çizmecioğlu, Z., Çelik, A., Yıldız, K., Aydın, Ö. (2010). Kentsel dönüşümün en önemli gerekçelerinden biri olan fakat gözardı edilen faktör "korozyon". Mimar ve Mühendis Dergisi, 57, 114.

Çoban, Ö. (2014). Krom ve olivin atıklarının betonda kullanımının durabilite özelliklerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

- Demir, İ. (2009). Aynı oranlarda ikame edilen silis dumani ve uçucu külün betonun mekanik özelliklerine etkisi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 1 (2), 1-7. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/umagd/issue/31543/345668>
- Di Carlo, F., Meda, A., Rinaldi, Z. (2017). Numerical evaluation of the corrosion influence on the cyclic behaviour of RC columns, *Engineering Structures*, 153, 264-278. doi:10.1016/j.engstruct.2017.10.020
- Doğan, M. (2009). Betonarme yapılarıdaki deprem hasarlarına korozyonun etkisi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22 (1), 147-168 . Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ogummf/issue/30154/325411>
- Doğan, O., Akgül, M. (2020). Donatı korozyonunun betonarmenin durabilite ve aderansına etkisi. *Anadolu 5. Uluslararası Uygulamalı Bilimleri Kongresi*, 26 - 27 Aralık, Diyarbakır.
- Doğan, O., Hamidiye, F. (2010). An experimental investigation of binding types of reinforcing steel rebars subjected to aggressive solutions under cathodic protection against corrosion. *International Journal of Physical Sciences* 5(17), 2605-2610
- Ersoy, U., Özcebe, G.(2018). Betonarme. Evrim Yayınevi ve Bilg. Dağıtım. 8. Baskı İstanbul.
- Göksu, C., İlki, A. (2016). Seismic Behavior of Reinforced Concrete Columns with Corroded Deformed Reinforcing Bars, *ACI Structural Journal*, 113 (5), 1053-1064. doi:10.14359/51689030
- Güneyisi, E., Özturan, T., Gesoğlu, M. (2005). A study on reinforcement corrosion and related properties of plain and blended cement concretes under different curing conditions, *Cement and Concrete Composites*, 27(4), 449-461, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.05.006>
- Li, J. B., Gong, J. X., Wang, L. C. (2009). Seismic behavior of corrosion-damaged reinforced concrete columns strengthened using combined carbon fiber-reinforced polymer and steel jacket, *Construction and Building Materials*, 23 (7), 2653-2663. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.01.003
- Özçelik, E., Gelişli, K. (2018). Betonarme yapılarda jeofizik yöntemlerle beton kalitesi ve yapı donatı durumunun araştırılması. *Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi Cilt: 17, No: 1, 2018 (1-11)*
- Pehlivan, H., AYTEKİN, M. (2018). Yumuşak betonarme çeliğinin beton boşluk suyu ve nacl çözeltisi içerisinde korozyon davranışının incelenmesi. *NWSA, Physical Sciences* ISSN: 1308 7304, ID: 2019.14.2.3A0089, <http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2019.14.2.3A0089>
- Rajput, A. S., Sharma, U. K., Engineer, K. (2019). Seismic retrofitting of corroded RC columns using advanced composite materials, *Engineering Structures*, 181, 35-46. doi:10.1016/j.engstruct.2018.12.009
- Sevim, Ö. (2018). Yüksek kompasiteli çimento bağlayıcı sistemler için uçucu kül tane boyut dağılımlarının optimizasyonu. *Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.*
- Şengül, Ö. (2011). Klor iyonu etkisindeki betonarme yapı elemanlarının dayanıklılığı için olasılığa dayalı tasarım. *Teknik Dergi*, 22 (107), 5409-5423. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tekderg/issue/12752/155197>
- Şimşek, O., 2012. *Beton ve Beton Teknolojisi*. Seçkin Yayıncılık, 4. Baskı, Ankara.
- Taşdemir, M.A., Özkul, M.H. ve Atahan, H.N. (1999). Türkiye'deki Son Depremler ve Beton, II. Ulusal Kentsel Altyapı Sempozyumu, 9-20, Adana, Türkiye.
- Topçu, İ.B., Boğa, A.R. (2007). 7. Ulusal Beton Kongresi, 301-311, İstanbul, Türkiye.
- Topçu, İ.B., Boğa, A.R. (2008). Betonarmeye donatı ve beton arasındaki aderansa korozyonun etkisi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi*, .XXI (1), 23-38.
- TS EN 197-1. (2012). Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- TS EN 206+A2 .(2021). Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk.
- TS 3526. (1980). Beton agregalarında özgül ağırlık ve su emme oranı tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- TS EN 933-1. (2012). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.

TS 802. (2016). Beton karışım tasarımı hesap esasları. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.

TS 708. (2016). Çelik - Betonarme için - Donatı çeliği. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.

TS EN 12390-2. (2019). Sertleşmiş betonun test edilmesi Mukavemet testleri için numunelerin yapılması ve kürlenmesi. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.

TS EN 12390-7. (2019). Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7 : Sertleşmiş betonun yoğunluğunun tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.

TS EN 12390-3. (2003). Beton - Sertleşmiş beton deneyleri. Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini.

Xiaojuan, Liu, Huanjun, Jiang, Liusheng, He, (2017). Experimental investigation on seismic performance of corroded reinforced concrete moment-resisting frames, *Engineering Structures*, 153, 639-652, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.034>.

Yamaç, S. (2010). Silis dumanı katkılı betonda klorür etkisinde korozyon oluşumu. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Yang, S. Y., Song, X. B., Jia, H. X., Chen, X. ve Liu, X. L. (2016) Experimental research on hysteretic behaviors of corroded reinforced concrete columns with different maximum amounts of corrosion of rebar, *Construction and Building Materials*, 121, 319-327. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.002

Yeğınobalı, A. (2000). Betonda Çelik Donatı Korozyonu. *Hazır Beton Yayınları*, 41, 54-57.

Yüzer, N., Aköz, F., Özhendekçi, N. (2003). Korozyon nedeni ile beton örtüyü çatlatan donatıdaki kesit kaybının belirlenmesi. *Teknik Dergi*, 14(2):2923-2934.



Orta Gerilim Yer Altı Elektrik Şebekesi İçin Kablo Arıza Tespit Cihazı Tasarımı ve Gerçek Zamanlı Uygulaması

Design and Real-time Implementation of Cable Fault Detector for Medium Voltage Underground Electricity Networks

Ali Rıza Kaleli¹ , Andaç Kılıç² , Mehmet Muğan³ , Mehmet Akif Ak³ , Ertuğrul Çam¹ 

¹Samsun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Samsun, TÜRKİYE

²ADM EDAŞ Ar-Ge Müdürlüğü, Denizli, TÜRKİYE

³Enerpower Ltd. Şti., Çankaya/Ankara, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 30/03/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Bu çalışmada orta gerilimli yer altı kablolu elektrik dağıtım şebekelerinde oluşan arızaları tespit etmek amacıyla yer altı kablo arıza teşhis cihazı tasarlanmıştır. Bu cihazla Darbe Yansıma Metodu kullanılarak 40 kV'a kadar darbe jeneratörü ile arızanın yerini noktasal olarak tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bunun için 0-8 kV, 0-16 kV ve 0-32 kV'luk, aralıklarda, 2000 Joule enerjiye sahip bir darbe jeneratörü tasarlanmıştır. Arızalı fazın tespiti yapıldıktan sonra, arıza noktasının tespiti için Ark Yansıma Metodu (ARM) ile arıza noktasının uzaklığı, metre olarak tespit edilebilmektedir. Arızalı yerin noktasal tespiti için; 0-8 kV, 0-16kV ve 0-32kV'luk ve 2000 Joule enerjiye sahip yerli ve yeni bir darbe jeneratörü, kontrol ünitesi, yazılımları ve kullanıcı arayüzleri bu çalışma kapsamında tasarlanıp gerçekleştirilmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen cihaz, yine proje kapsamında düzenlenen bir araç içerisinde uygun şekilde yerleştirilmiş ve çalıştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Yeraltı kablosu, Orta gerilim, Kablo teşhis cihazı”

Abstract

In this study, an underground cable fault diagnosis device was designed to detect faults in medium voltage underground cable electrical networks. It is aimed to detect the location of the fault with a pulse generator up to 40 kV by using the Pulse Reflection Method with this device. For this purpose, pulse generator with 2000 Joules pulse generator was designed in range of 0-8 kV, 0-16 kV and 0-32 kV. After the faulty phase is detected, the distance of the fault point too can be determined in meters with the Arc Reflection Method (ARM) with the device. For the pinpoint detection of the faulty place, a domestic and new pulse generator with 0-8 kV, 0-16kV and 0-32kV and 2000 Joule energy, control unit, software and user interfaces were designed and implemented within the scope of this study. The device realized in the study has been properly placed and operated in a vehicle arranged within the scope of the project.

Keywords

“Underground cable, Medium voltage, Cable diagnostic device”

1. Giriş

Günümüzde elektrik enerjisi üzerine gerçekleşen teknolojik ilerlemeler enerjinin kesintisiz ve sağlıklı bir şekilde dağıtılması açısından önem taşımaktadır. Toplumların sanayileşme hızı enerjiye makul fiyatlarla ulaşılmasından doğrudan etkilenmektedir. Üretim sektörünün veriminin artması enerji üretim santralinden fabrikaya kadar uzanan yolda enerji iletim/dağıtım hatlarının kalitesine önemli derecede bağlıdır.

Kırsal alanda bulunan enerji nakil hatları dağım santrallerine göre daha az korunaklı bölgelerde bulunmaktadır. Bu bölgelerde kopmalara bağlı olarak oluşabilecek arızalar nedeniyle bu hatların fiziksel olaylardan daha az etkilenmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. 1850’lü yıllarda ilk defa İngiltere ile Fransa arasında deniz altına kablo döşenmiştir (Gürelli, 1979). Günümüzde bazı büyük şehirlerde enerji dağıtım sistemi tümüyle yer altı kabloları aracılığıyla gerçekleştirilmektedir.

Bu kablolama sistemlerinde meydana gelebilecek arızalar için zamanla birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden bir olan Köprü yönteminde ortasında bulunan galvanometrenin bir direnç köprü devresinin dengeli olduğu durumda karşılıklı yer alan dirençlerin oranlarının birbirlerine eşit olması prensibine dayanmaktadır (Clegg, 1993). Daha sonra arıza tespiti alanında yapılan çalışmalar devam ederek farklı tiplerde köprü tasarımları gerçekleştirilmiştir (Bascom et al., 1994).

İlerleyen teknolojiyle birlikte ortaya çıkan RADAR sistemleri yer altı kablolarında oluşan arıza noktasının belirlenmesinde bir dönüm noktası olmuştur. Bu yöntem yer altı kabloları için arızaların tespitinde kullanılmış ve çok başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu yöntemde içerisine kabloya gönderilen sinyalin kablo üzerinde empedansının değiştiği noktalardan yansımaları prensibine dayanmaktadır (Bascom et al., 1994). Dalganın geri dönüşünde geçen sürenin tespit edilmesi ise arızalı bölgenin enerji kaynağına olan uzaklığı sonucunu oluşturmaktadır. Bundan dolayı bu yöntem Darbe Yansıma Ölçüm Yöntemi adı verilmiştir.

İlerleyen yıllarda kablolarda oluşan arıza noktasında ortaya çıkan kıvılcım neticesinde oluşan dalgaların incelenmesi için farklı yöntemler uygulanmıştır. Bu prensibi temel alan yöntemler pasif yöntemler olarak isimlendirilmektedir (Livie et al., 2008). Bu yöntemlerden birisi darbe akımı yöntemidir (Clegg, 1993). Bu yöntemde arızanın olduğu noktada bir darbe jeneratörü tarafından oluşturulan kıvılcımın dalgalarının endüktif kuplaj elemanı üzerinden geçirilerek arızalı bölgenin tespit edilmesi prensibine dayanmaktadır. Darbe Akım Yöntemi arıza noktasının yüksek bir doğrulukla arıza parametrelerinden bağımsız şekilde bulunmasını sağlamıştır. Darbe akımı yöntemi üzerinde yapılan çalışmalar ilerleyen dönemlerde kablo arızalarının tespitinde yazılıma dayalı tespit edilmesini doğru geliştirmiştir. Bu durumun nedeni dalgaların analizinin kişisel tercihlere çok fazla ihtiyaç duyulmasıdır. Bu amaçla yapılan ilk çalışmalardan birisi “Gerçek Zamanlı Uzman Sistem”dir (Real Time Expert System) (Kuan & Warwick, 1992). Sistemin temel çalışma prensibi yansıyan dalgaların ölçümleri bir veri tabanında depolanarak ölçülen darbenin analizini yapılmasına dayanmaktadır.

Darbe yansıma yöntemi, karmaşık hesaplama yükünü ortadan kaldıran ve geleneksel yöntemlerde gereksinim duyulan ek bağlantıların olmadığı etkili bir yöntemdir. Bu yöntemde arızalı kablunun bir tarafından elektriksel darbe gönderilmektedir. Darbe sinyalinin uygulanması sonucunda kablo üzerindeki empedans değişimi incelendiğinde yansımanın kısmen olduğu görülmektedir. Darbenin kablodaki yayılım hızı sabit kabul edildiğinde darbe sinyalinin kaynaktan çıkışı ile dönüşü arasındaki geçen süre, empedansın değiştiği noktanın uzaklığını hesaplamakta kullanılmaktadır. (Clegg, 1993).

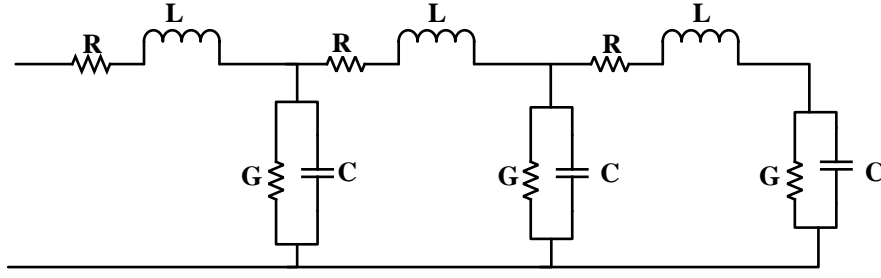
Bu çalışmada tasarlanan kablo arıza tespit cihazı ile orta gerilimli yer altı kablolu elektrik dağıtım şebekelerinde oluşan arıza durumunda Darbe Yansıma Metodu kullanılarak 40 kV’a kadar DC yalıtım testi ile 32 kV’a kadar darbe jeneratörü ile arızanın yerini noktasal olarak tespit edebilmiştir. Kablo Arıza Tespit Cihazı için gerekli olan arızanın noktasal tespiti için; 0-8 kV, 0-16 kV ve 0-32 kV’luk, 2000 Joule enerjiye sahip bir darbe jeneratörü ile arızanın noktasal tespiti yapılmıştır. Çalışma kapsamında 1 adet 4x125µF darbe kondansatörü ile 8, 16 ve 32 kV gerilim seviyelerinde 2000 Joule darbe enerjisini kablo arıza noktası tespiti için test edilecek kabloya manuel ya da 5-15 saniye arasında belirlenen sürelerde test ve darbe jeneratörü ile darbe gerilimi uygulanmıştır. Test ve darbe jeneratörü, ölçüm yapılan kabloya verilen 40 kV DC gerilim seviyesinde test jeneratörü üzerinden bir varyak üzerinden kontrol paneli ile 0-40 kV gerilim aralığında DC yalıtım testi yapılmış ve hangi fazın arızalı olduğu tespit edilebilmiştir.

2. Materyal ve metod

Bu çalışmada tasarlanan kablo arıza tespit cihazı ile yüksek gerilimli yer altı kablolu elektrik dağıtım şebekelerinde oluşan arıza durumunda Darbe Yansıma Metodu kullanılarak tespit edilmiştir. Genel olarak bir enerji dağıtım şebekesi birim değer bazında direnç, hatlar arası kapasite, iletkenlik ve endüktans değeri içermektedir.

2.1. Darbe yansıma metodu

Güç sistemlerindeki Enerji Nakil Hatlarının (ENH) genel olarak modellenmesinde direnç, kondansatör, endüktans ve iletkenlik değeri içermektedir. Bu elemanlar Şekil 1’de gösterildiği gibi bağlanmaktadır.



Şekil 1. Enerji dağıtım hattının elektriksel modeli

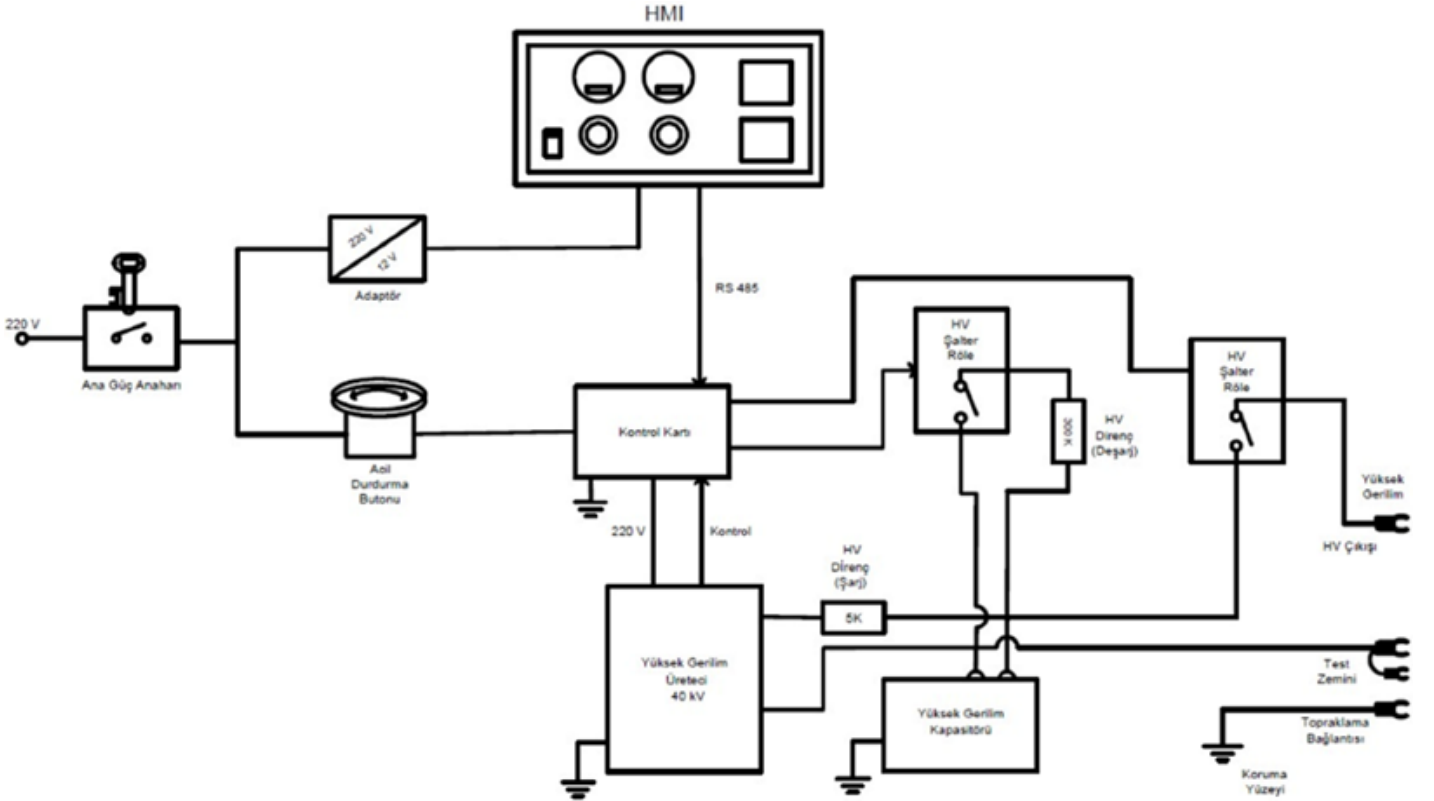
Kablodaki arıza bulunurken darbe yansıma metodunda dalga sinyali kabloya gönderilir. Sonrasında yansıyan sinyalin belirlenen zaman aralığında sayılarak aşağıda ifade edilen denklem kullanılarak arızanın meydana geldiği nokta hesaplanır.

$$l_x = t \cdot \frac{v}{2} = t \cdot \frac{300 \times 10^6}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (I)$$

Burada $l_x(m)$ arızalı noktanın uzaklığını, t dalga sinyalinin hareket süresini (s), v ise dalga sinyalinin kablo içinde yayılma hızını (m/s) ve ϵ_r yalıtkanın bağlı dielektrik sabitini göstermektedir. Yansıyan dalga ile gönderilen dalga sinyallerinin fazları devrenin açık veya kapalı olmasına göre farklılık göstermektedir. Kablonun yapısında oluşan bir farklılık gösteren her nokta, kablonun endüktans ve kapasitenin ve dalganın direncinin değişiklik göstermesine neden olmaktadır. Dalga yansımaları ezilmelerde branşmanlarda ve faz genişimlerinde oluşmaktadır.

2.2. Ark yansıma metodu ile arıza tespiti cihaz tasarımı

Bu çalışmada darbe yansıma metodunu kullanarak kablolarda arızalı noktanın yerinin tespitini yapan dedektör sisteminin blok diyagramı Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Donanım blok diyagramı

Şekil 2’de gösterilen bu mobil sistemde, aküler üzerinden enerjilenerek, DVSR röle vasıtasıyla araç akülerinden ayrılmaktadır. Bu sistemde DC beslemesi, invertör üzerinden AC’ye çevrilir ve izolasyon trafosundan geçmektedir. Test ve Darbe Jeneratörü ve HMI Arayüz Ekranı ana güç anahtarı ile kontrollü olarak enerjilendirilir. HMI Arayüz ekranı 220/12V 3A’lık güç kaynağı üzerinden DC beslenmektedir. Ekranda yer alan güç butonu üzerinden enerjilenen sistemde, Yüksek Gerilim Ayrık/Devrede şalteri ile sistem “Yüksek Gerilim Devrede” moduna alınmakta ve Deşarj Modu komitatörü yardımıyla “DC, Tek Darbe veya Periyot” modlarından birisi

seçilmektedir. Cihaz içinde çeşitli çalışma modları bulunmaktadır. Bu modlardan DC modunda arızalı kabloya sürekli darbe uygulanmakta ve DC izolasyon testi yapılarak arızalı faz bulunmaktadır. “Tek Darbe Modunda” ise “Tek Darbe” butonu yardımıyla kabloya tek darbe gönderilmekte ve son olarak “Periyot Modunda” ise arızalı kabloya 5’er saniyelik periyotlarla ayarlanan DC gerilim darbesi iletilmektedir.

DC modunda arızalı fazın tespiti yapıldıktan sonra, arıza noktasının tespiti için Tek Darbe veya Periyot Modu ile arıza noktasının uzaklığının metre olarak ön tespiti yapılmaktadır. Arızanın noktasal tespiti için; 0-32 kV aralığında DC darbesi sağlayan darbe jeneratörü ile arızanın noktasal tespiti gerçekleştirilmektedir.

3. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmada tasarımı gerçekleştirilen Orta Gerilim Yeraltı Elektrik Şebekesi İçin Kablo Arıza Tespit Cihazı kapsamında öncelikle test ve darbe jeneratörü modülü geliştirilmiştir. Bu modül solenoid çekme bobini ve darbe şalteri, yüksek gerilim üretici, kondansatör ünitesi, soğutma fanı bileşenlerinden oluşmaktadır. Modülün teknik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Test ve Darbe Jeneratörü Özellikleri

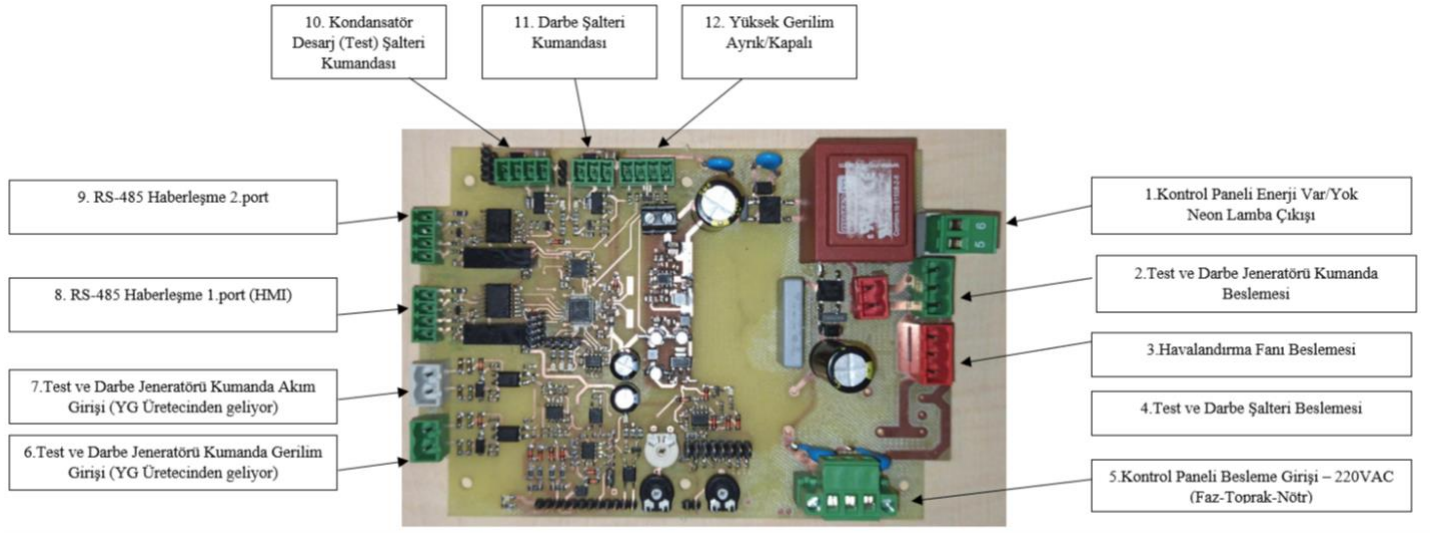
Test ve Darbe Jeneratörü Özellikleri:	
Çıkış Gerilimi	0~35kV (Değişken Adımlı)
Maksimum Güç	2000J
Enerji saklama kapasitesi	2 μ F

Test ve darbe jeneratörü modülü içerisinde bulunan kondansatör ünitesi 8, 16 ve 32 kV gerilim seviyelerinde Yüksek Gerilim Üretici üzerinden şarj edilerek, darbe enerjisini, kablo arıza noktasının tespiti için, test edilecek kabloya; manuel ya da 5 saniye periyotla uygulanmaktadır. Test ve darbe jeneratöründen gelen enerjinin anahtarlama solenoid çekme bobini ve darbe şalteri üzerinden yapılmaktadır. Test ve Darbe jeneratörünün en önemli bileşeni olarak kullanılan solenoid çekme bobini 3kgf’lik itme ve çekme kuvvetini iki yönde uygulayabilir. Solenoid bobinden test ve darbe jeneratöründe birer adet olmak üzere, toplam 2 adet kullanılmıştır. Kondansatörün deşarjı esnasında bu bobinler kontakların birleşme ve çekme işlemlerini darbe şalteri ile yürütmektedir. Solenoid Çekme Bobini ve Darbe Şalterine ait görüntü Şekil 3’te gösterilmiştir. Bunun dışında bu modül içinde yüksek gerilim çıkışını sağlamak için 2 adet 20kV yüksek gerilim üretici kullanılarak 40kV DC gerilim elde edilmiştir.



Şekil 3. Solenoid Çekme Bobini ve Darbe Şalteri

Çalışma kapsamında tüm sistemlerin kontrolünü ve cihazların yönetilmesini sağlanması; kontrol, ölçüm, haberleşme görevlerini yerine getirmesi amacıyla tasarlanmıştır. Karta ait görüntü Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. Kontrol Kartı

Tasarlanan cihaza ait kullanıcı arayüzü ise Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Kontrol paneli (Kullanıcı Arayüzü)

Genel olarak sistemin çalışmasında öncelikle sistem anahtarlı şalter ile fiziki olarak açık hale getirilir, sonrasında arayüz ekranından sistem başlatılır. Ekran üzerinden "Gerilim Seçim Komitatörü" 0 kV'a ayarlanır ve "Yüksek Gerilim" butonuna basılarak sistem yüklenir. Daha sonra "Mod Seçim Komitatörü" yardımıyla Deşarj Modu seçilir ve istenen gerilim seviyesi uygulanarak, yüklenen kondansatör ünitesinin boşalması sağlanır. En sonunda ise gerilim tekrar 0kV konumuna alınarak sistem durdurulur.

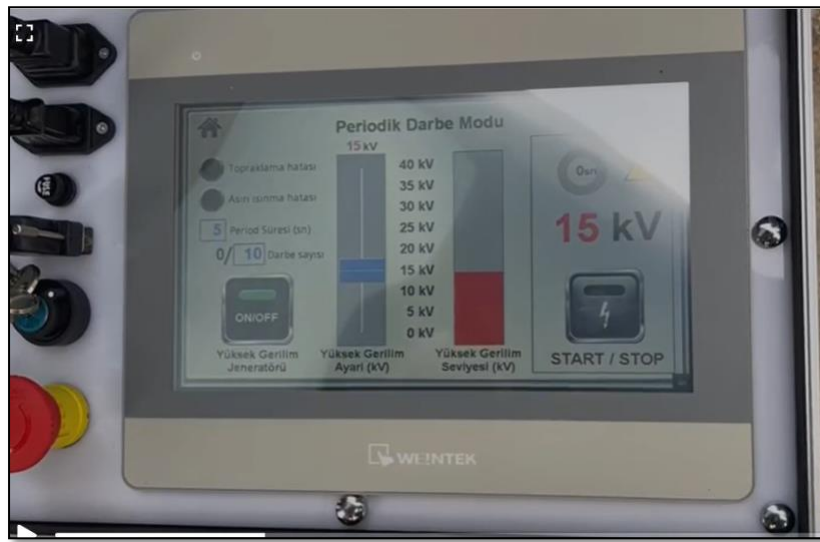
Deşarj Modu komitatörü yardımıyla "DC, Tek Darbe veya Periyot" modlarından birisi seçilmektedir. DC modunda arızalı kabloya sürekli darbe uygulanmakta ve DC izolasyon testi yapılarak arızalı faz bulunmaktadır. Tek Darbe Modunda ise 'Tek Darbe' butonu yardımıyla kabloya tek darbe gönderilmektedir. Sistemin son çalışma şekli olan periyot modunda ise arızalı kabloya 5'er saniyelik periyotlarla ayarlanan DC gerilim darbesi iletilmektedir.

DC modunda arızalı fazın tespiti yapıldıktan sonra, arıza noktasının tespiti için Tek Darbe veya Periyot Modu ile arıza noktasının uzaklığının metre olarak ön tespiti yapılmaktadır. Arızanın noktasal tespiti için; 0-32 kV aralığında DC darbesi sağlayan darbe jeneratörü ile arızanın noktasal tespiti yapılmaktadır.

Şekil 6 ve 7'de bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen testler esnasında alınan ekran görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler gerçek zamanlı olarak elde edilmiş ve ölçüm yapılan kabloya verilen farklı DC gerilim seviyesinde test jeneratörü üzerindeki bir varyak üzerinden kontrol paneli ile 0-40 kV aralığında gerilim referans değerleri uygulanmış ve bu aralıkta DC yalıtım testi yapılmıştır. Bu sayede arızalı fazın yeri tespit edilebilmiştir.



Şekil 6. DC çalışma modu 1kV ve 10kV referans değerleri için elde edilen ekran görüntüleri



Şekil 7. 15 kV değerinde periyot çalışma modu ekran görüntüsü

4. Sonuç

Günümüzde enerji arzının sürekliliğinin ve kalitesinin sağlanması ve korunması, Elektrik Dağıtım Şirketlerinin (EDAŞ) en önemli hedefleri arasındadır. Bilindiği gibi havai hatlarda bu durum için çeşitli scada ve görüntülü ya da bizzat personelin yerinde tespiti şeklinde çeşitli sistemler kullanılmaktadır. Ancak yer altı şebekelerinde bu durum çok zorlaşmaktadır. Özellikle görünmeyen ve yerin kazılmadan bulunma ihtimalinin olmadığı arızaların tespiti, EDAŞ'ları zorlamaktadır. Bu amaçla bu çalışma kapsamında tasarlanan cihaz sayesinde orta gerilimli yer altı kablolu elektrik dağıtım şebekelerinde oluşan arıza durumunda Darbe Yansıma Metodu kullanılarak 40 kV'a kadar DC yalıtım testi ile 32 kV'a kadar darbe jeneratörü ile arızanın yerini noktasal olarak tespit edebilmek üzere yönelik yerli bir cihaz tasarlanması ve uygulamasının gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Sonuçlar irdelendiğinde tasarlanan cihazın hedefine ulaştığı ve artık yer altı şebekelerde arızalı yerin bulunmasında ciddi kolaylık sağlayacağı ortaya konulmuştur. Kablo Arıza Tespit Cihazı için gerekli olan arızanın noktasal tespiti için 0-8 kV, 0-16 kV ve 0-32 kV'luk, 2000 Joule enerjiye sahip bir darbe jeneratörü ile arızanın noktasal tespiti başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Teşekkür

Bu makale AG190703-3 numaralı ve "Orta Gerilim Yer Altı Elektrik Şebekesi İçin Kablo Arıza Tespit Cihazı Geliştirilmesi" isimli, 2020-Ocak dönemi EPDK projesinden desteklenerek yapılan projeye dayanılarak hazırlanmıştır.

Referanslar

Bascom, E. C., Von Dollen, D. W., & Ng, H. W. (1994). Computerized underground cable fault location expertise. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, 376–382. <https://doi.org/10.1109/TDC.1994.328403>

Clegg, B. (1993). *Underground Cable Fault Location*. McGraw-Hill.

Gürelli, D. (1979). *Kablo Testi, Kablo Arızalarında Modern Tespit Yöntemleri, Yağ İzolasyon Testi*. Nurettin Uycan Basımevi.

Kuan, K. K., & Warwick, K. (1992). Real-time expert system for fault location on voltage underground distribution cables. *IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution*, 139(3), 235. <https://doi.org/10.1049/IP-C.1992.0036>

Livie, J., Gale, P., & Wang, A. (2008). The application of on-line travelling wave techniques in the location of intermittent faults on low voltage underground cables. *IET Conference Publications*, 536 CP, 713–718. <https://doi.org/10.1049/CP:20080127>



Rijit Bodrum Perdelerinin TBDY 2018 ile Tasarlanan Az Katlı Yapılardaki Etkisi Üzerine Bir İnceleme

An Investigation on the Effect of Rigid Basement Shear-walls on Low-Rise Buildings Designed with TBDY 2018

Serkan Etlî ¹

¹ Munzur Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Acil Yardım ve Afet Yönetimi Bölümü, Merkez 62000 Tunceli, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 24/03/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Çalışma kapsamında rijit bodrum perdelerinin 6 katlı betonarme bir binanın davranışına etkisi incelenmiştir. İncelenen yapının tasarımı TBDY-2018'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında yapı ilk etapta ZD sınıfı zemin sınıfı koşullarında, bodrum katta rijit bodrum perdeleri ile tasarlanmıştır. Daha sonra bu rijit bodrum perdeleri kaldırılarak ikinci bir yapı elde edilmiştir. Elde edilen bu iki yapının yatay yükler altındaki performansları incelenmiştir. Tasarımı tamamlanan yapı ve yapısal performansa ait değerlendirmeler 3 boyutlu olarak SeismoStruct yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Her iki sistem durumunda da yapılar doğrusal olmayan statik itme analizlerine tabi tutulmuştur. Bu analizler esnasında, modeller, iki farklı yatay yükleme koşulu kullanılarak doğrusal olmayan artımlı statik itme analizi ile analitik olarak değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda, rijit bodrum perde duvarlı ve rijit bodrum perdesi olmayan iki binanın dayanım fazlalığı katsayısı, yapısal dayanım fazlalığı faktörü, süneklik ve rijitlik faktörü gibi performans faktörleri açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Analitik ve parametrik olarak yapılan değerlendirmelerde rijit bodrum perdelerinin özellikle dayanım fazlalığı katsayısı açısından artışa neden olduğu gözlemlendi. Diğer taraftan yapısal dayanım fazlalığı faktörü ile süneklik faktörü üzerinde rijit bodrum perdelerinin etkili olduğu ancak yapı sistem geometrisinin daha etkin bir parametre olduğu değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Rijit bodrum perdesi, TBDY 2018, Statik itme analizi”

Abstract

Within the scope of the study, the effect of rigid basement shear-walls on the behavior of a 6-storey reinforced concrete building was investigated. The design of the examined structure was made in accordance with TBDY-2018. Within the scope of the study, the building was first designed in the basement floor with rigid basement shear-walls and in ZD ground class conditions. Later, these rigid basement shear-walls were removed, and a second structure was obtained. The performances of these two structures under lateral loads were investigated. Evaluations of the completed design and structural performance were carried out in 3D with SeismoStruct software. In both system cases, the structures were subjected to nonlinear static pushover analyses. During these analyses, the models were analytically evaluated by nonlinear incremental static pushover analysis using two different lateral loading conditions. As a result of the analyses, two buildings with and without rigid basement shear-walls were comparatively evaluated in terms of performance factors such as overstrength factor, inherent strength factor, ductility and stiffness factor. In analytical and parametric evaluations, it has been observed that rigid basement shear-walls cause an increase especially in terms of overstrength factor. On the other hand, it has been evaluated that rigid basement shear-walls are effective on the inherent strength factor and ductility factor, but the geometry of the building system is a more effective parameter on these factors.

Key Words

“Rigid basement shear walls, TBDY 2018, Static pushover analysis”

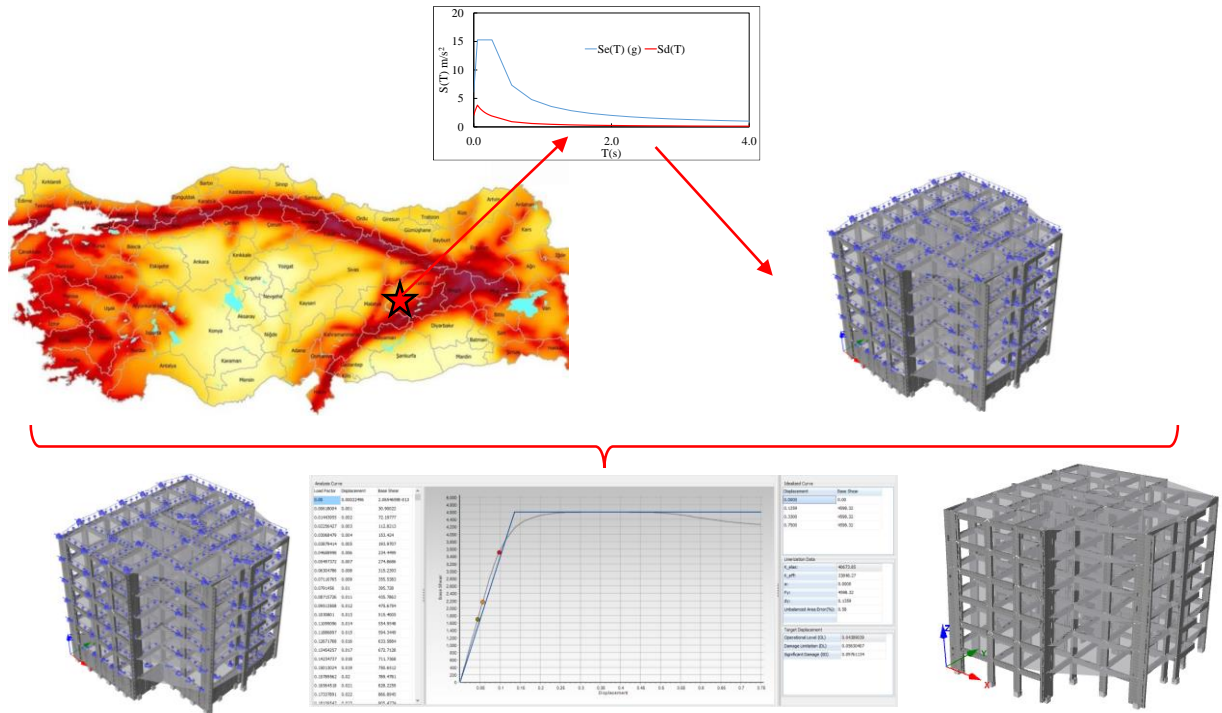
1. Giriş

Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi'nin paylaştığı bilgiler incelendiğinde, dünya çapında meydana gelen sismik olayların 7-7.9 büyüklükte oluşturdukları depremlerin sayısı tahminen yılda 18 iken 6-6.9 arasında değişen büyüklükte ise 120 kadar deprem olduğu bildirilmektedir. Daha küçük boyutta 5-5.9 ve 4-4.9 büyüklüğünde depremler ise sırasıyla 800 ve 6,200 civarında olduğu verilmektedir. Azalan büyüklükte bakıldığında oluşum sıklıkları artmakta ve 3-3.9 büyüklüğü aralığı için ise 49,000 dolayında olduğu tahmin edilmektedir. Ülkemizde ve dünya genelinde sıklıkla yaşanan bu depremler sonucunda önemli can ve mal kayıplarına yol açmaktadır. Dolayısıyla depreme dayanıklı bina tasarımı konusunda çalışmaları oldukça önemli kılmaktadır (Şahan ve Ünsal 2021).

Yatay yük taşıyıcı sistemlerin tasarımları esnasında maruz kalabilecekleri depremler açısından yeterli sismik performanslara sahip olabilmeleri için tasarımcıların temel tasarım kurallarını içeren bir dizi tasarım kurallarına sahip referans bir bilgi birikimine ihtiyaçları vardır. Günümüzde bu durum kurumlar vasıtasıyla bilgi birikimlerinin oluşturulması ile üretilen deprem yönetmelikleri ile sağlanmaktadır. Dünyada ise ulusal ve uluslararası bağlamda çok sayıda örneği mevcuttur. Ülkemizde ise deprem bölgesinde yapılacak yapılar, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı tarafından 2007 yılında yayınlanan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik olarak hazırlanan yönetmeliğin yerine 2018 yılında modernize ve revize olarak bu yönetmeliğin yerini alan yeni deprem yönetmeliği almıştır. 2018 deprem yönetmeliği Afet ve Acil Durum Başkanlığı (AFAD) tarafından 2018 yılında oluşturulmuş ve 01.01.2019 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Dolayısıyla bu yıldan itibaren yapılar deprem etkileri açısından Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği TBDY-2018'e (TBDY, 2018) uygun olarak tasarlanmaktadır. 2019 yılında TBDY-2018'in yürürlüğe girmesiyle deprem bölgesi kavramı yönetmeliklerden kaldırılmış, yapılacak her yeni binaya tasarım esnasında özel tasarım spektrumlarının kullanılabilmesi imkânı sunulmuştur. Sismik yükler ve tasarım ilkelerinin güncellenerek daha kullanışlı ve tasarıma özel spektrum eğrileri sunması, tasarımda farklı kesitlerin kullanılmasına yol açmıştır. Dolayısıyla, TBDY-2018'deki bu yenilikler yapıların sismik performansı üzerinde farklı etkiler oluşturmakla beraber, sonuçların etkileri deneysel ve analitik olarak araştırılması gereği ortaya çıkmaktadır. Bu bulguların ise güncel çalışmalara yeni deprem yönetmeliğine açısından örnek oluşturması önem arz etmektedir (Bozkurt ve Serin 2021).

Literatürde betonarme perde duvar sistemlerin ve perde çerçevesi sistemlerin elemanlarındaki yük dağılımını incelemiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Perdelerin plandaki yerleşiminden ve tasarım esnasında boşluklu ya da boşluksuz yerleşim özelliğine bağlı olarak taşıyıcı sistemlerin, taban kesme kuvvetleri ve doğal titreşim periyotlarını karşılaştırılmıştır (Kasap ve diğ. 2015). Diğer bir çalışmada ise, TBDY-2018'de depreme dayanıklı bina tasarımı esnasında yapının periyot hesabı için verilen ampirik periyot formülü ile yine betonarme yapıların doğal titreşim periyodu için Rayleigh formülünü kullanmış ve sonuçlarını karşılaştırmışlardır (Aksoylu ve Arslan 2019). Bu iki yaklaşıma ait sonuçlar irdelendiğinde hesaplanan periyotların önemli ölçüde farklılık gösterebildiği ve bu sonucun yapıların depremden alacağı taban kesme kuvvetini önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermişlerdir (Şahan ve Ünsal 2021).

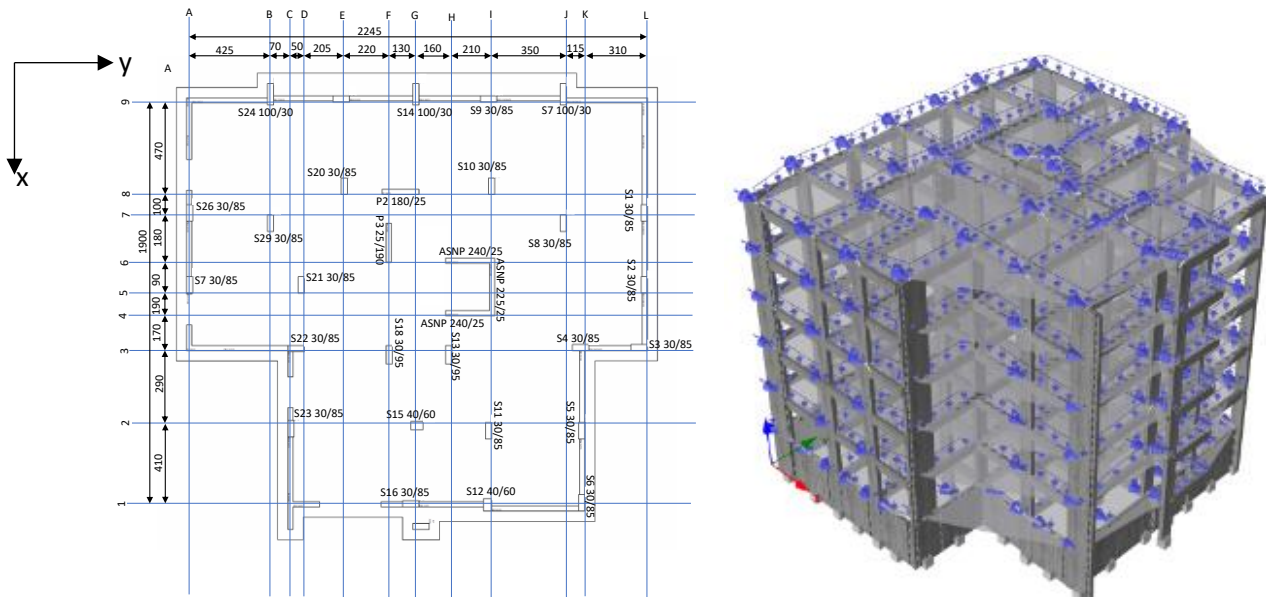
Bu çalışmada kapsamında, enlemi 38.663400° ve boylamı 39.221100° olan Elâzığ'ın merkez lokasyonunda yer alan 6-katlı bir yapı modeli tasarlanmıştır. Yapının tasarımı betonarme sistem olarak TBDY-2018 esaslarına göre tasarlanmış ve detaylandırılmıştır. Yatay yük taşıyıcı sistemi olarak süneklik düzeyi yüksek çerçeveler tercih edilmiştir. Binanın asıl tasarımı yapılırken rijit bodrum perdeleri kullanılarak perdeli-çerçeve sistemler kullanılmıştır. Sonrasında yapı 2 gruba ayrılmıştır. İlk grupta tasarıma esas rijit bodrum perdeli yer alırken, ikinci grupta ise rijit bodrum perdeleri kaldırılmış yapı modeli ele alınmıştır. Çalışma kapsamında rijit bodrum perdelerinin sistem performansına etkisi irdelenmiştir. Tasarlanan binaların performanslarının karşılaştırılabilmesi için SeismoStruct (SeismoSoft 2018) programı kullanılarak toplam 8 adet doğrusal olmayan statik itme analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, performans parametreleri kullanılarak yapıların yatay yük tepkilerinin rijit bodrum perdeleri ile değişimi incelenmiştir. Araştırma metodolojisinin detayı da Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma metodolojisi.

2. Yöntem

Çalışma kapsamında incelenen yapı sistemi 3 boyutlu olarak tasarlanmış ve sonrasında performans parametreleri açısından yine 3 boyutlu olarak analiz edilerek değerlendirildi. Depreme dayanıklı yapı tasarımı esnasında sistemin özellikleri, TBDY 2018 tasarım koşulları dikkate alınarak tamamlandı. Tasarım esnasında, yüksek süneklilik sınıfı koşulunu sağlayan malzeme, eleman kesitleri ve sistem yapısal özellikleri ile tasarıma ait modeller tamamlandı. Ayrıca tasarıma ait diğer özelliklerden olan kullanım amacı konut olarak belirlenmiş ve yapısal sistemi ise betonarme perde ve kolonlardan oluşan çerçeveler olarak modelde detaylandırıldı. Binaya ait sismik tasarım spektrumuna ait özelliklerin belirlenmesinde, tasarım depremi koşulları için DD-2 sismik tehlike seviyesi baz alınırken ve yapı inşaatının sahasına ait Yerel Zemin Sınıfı ise ZD olarak belirlendi. Tasarlanan yapının plan görünümüne ait bilgiler Şekil 2'de gösterilmektedir. 1 Bodrum + Zemin + 4 Normal Kat olarak modellenen binanın kat yüksekliği 3.2 m olup, taban alanı 390 m², toplam inşaat alanı ise 2540 m²'dir.



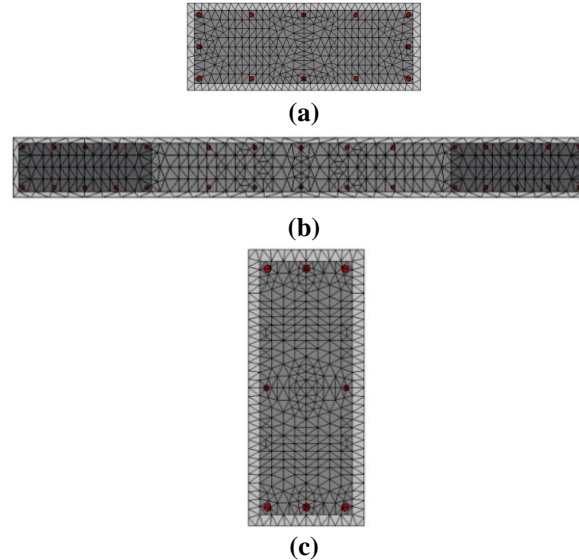
Şekil 2. Bina özellikleri: (a) Plan, (b) Yükseklik görünüşü.

Yerçekimi yükleri altında yapılan analizler sonucunda, bina modeli, yeterli dayanıma sahip en kesit özellikleri ile önceden modellendi. Daha sonra ön boyutlandırma ile üretilen bina TBDY-2018 (TBDY 2018) koşullarında deprem yük etkileri açısından değerlendirilerek tasarımlara son şekli verildi. Ayrıca, binanın modal analizi için spektrumlarında DD-2 (Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2) ve interaktif deprem haritasından alınan konuma bağlı parametreler kullanılarak spektrumlar üretildi. Zemin sınıfı olarak ZD kullanıldı. Ayrıca yapıların sünekliği de dikkate alınarak süneklik sınıfına uygun eleman kesitlerinin kullanılmasına özen gösterildi. TBDY-2018 (TBDY 2018) de bu tip sistemler için verilen R (Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı) ve D (Dayanım Fazlalığı Katsayısı) katsayıları kullanıldı. Süneklik düzeyi yüksek taşıyıcı sistemler olarak modellenen yapıda R ve D katsayısı sırasıyla 7 ve 2.5 olarak alınmıştır. Bina kullanım amacı konut olmakla birlikte bina önem katsayısı 1 olarak hesaplara dahil edilmiştir.

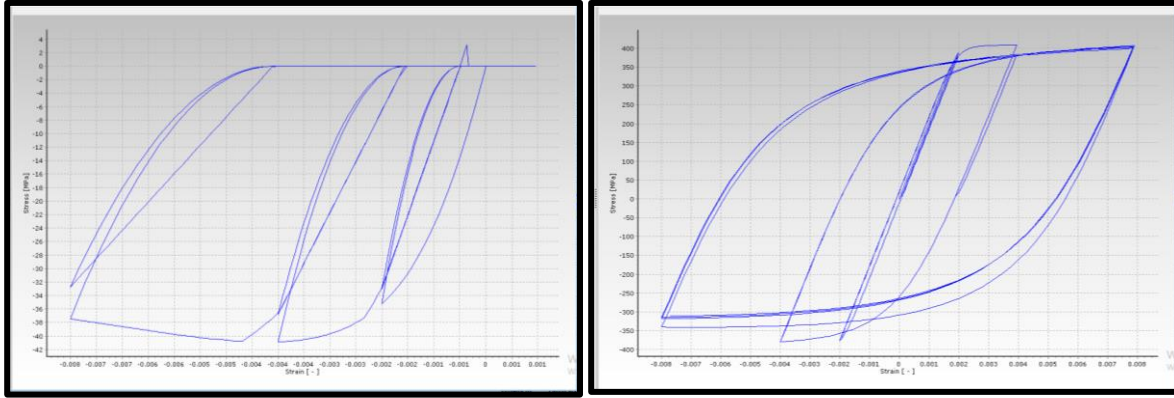
Çalışma kapsamında TBDY-2018 ile tasarımı yapılan yapıda planda düzensizlik olan A1 (burulma düzensizliği), A2 (döşeme süreksizlikleri) ve A3 (planda çıkıntılar bulunması) ile düşeyde düzensizlik olan B1 (komşu katlar arası dayanım düzensizliği), B2 (komşu katlar arası rijitlik düzensizliği) ve B3 (taşıyıcı sistemin düşey elemanlarının süreksizliği) değerlendirilmiştir. A1 düzensizliğinde elde edilen katsayı değerleri bodrum, zemin ve çatı katında 1.2'den küçük olmakla birlikte gözlemlenmemiştir. Ancak, 1, 2 ve 3'üncü katta ise A1 düzensizliği bulunmakla birlikte ilgili katsayı 1.22-1.29 değerlerini almaktadır. A2, A3 ve B3 düzensizlikleri bulunmamaktadır. B1 düzensizliğinin belirlenmesinde kullanılan katsayı ise 0.8'den büyük olmakla birlikte 0.91 ile 1.67 değerleri arasındadır. Dolayısıyla B1 düzensizliğinde gözlemlenmedi. Ayrıca, B2 düzensizliğine ait katsayı değerleri 2'den küçük olmakla birlikte 0.77 ile 1.31 arasında değişmektedir. Sonuç olarak bu düzensizlikte yapıda bulunmamaktadır.

SeismoStruct (SeismoSoft 2018) yazılımı, fiber elemanlarla modellenen betonarme kolon, perde ve kiriş kesitleri (Şekil 3) ile tasarlanan binanın doğrusal olmayan analizini yapmak için kullanıldı. Binada kullanılan beton sınıfı C25, donatı çeliği ise B420C olarak seçilmiştir. Eleman modellerinde kullanılan malzemelerin çelik elastisite modülü (E_s), Poisson oranı (ν) ve sertleşme katsayısı (μ) değerleri sırasıyla 210×10^3 N/mm², 0.3 ve 0.5 olarak alınmıştır.

Bina modeli TBDY 2018 açısından tasarımı tamamlandıktan sonra yapı statik itme analizleri için yeniden modellenmiştir. Bu esnada yapıdaki elemanların modellemeleri SeismoStruct yazılımında yer alan kuvvet tabanlı eleman modelleri kullanarak yeniden güncellenmiş ve nonlinear malzeme modelleri atanmıştır. Ayrıca CFST perd, kolon ve kirişlerin malzeme modelleri beton ve çelik için sırasıyla "con_ma" ve "stl_mn" olarak seçilmiştir. "con_ma" Martinez-Rueda ve Elnashai (Martinez-Rueda ve Elnashai 1997) geliştirilmiştir ve "stl_mn" modeli Monti ve ark. (Monti ve Nuti 1992) tarafından geliştirilmiştir. Her iki model de tekrarlı yüklem durumu için geliştirilmiştir. Beton malzeme oluşturan model görüntüsü Şekil 4(a)'da, modelin çelik malzeme oluşturan model görüntüsü ise Şekil 4(b)'de verilmiştir.



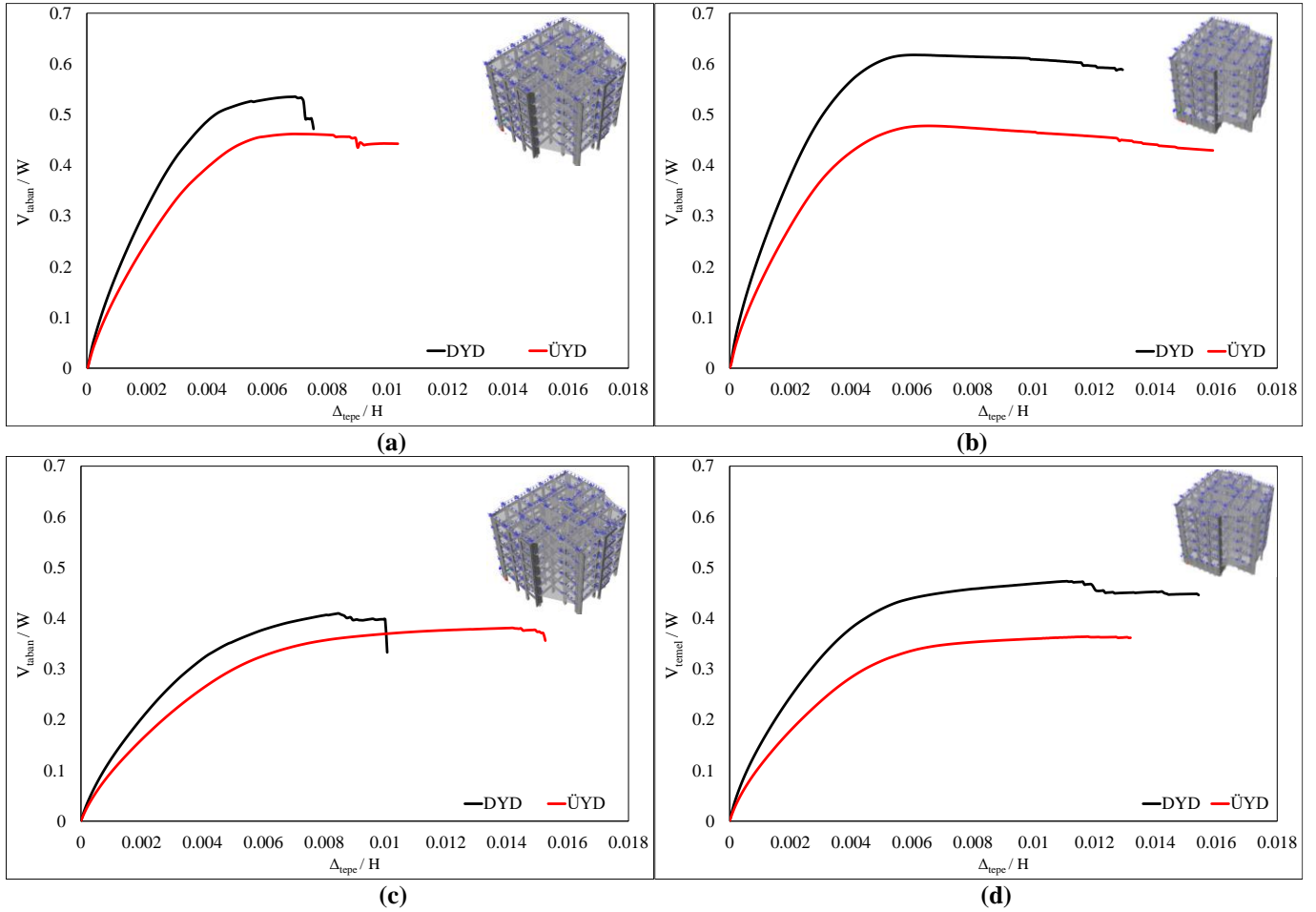
Şekil 3. Örnek fiber kesitli elemanlara ait yazılım görüntüsü: (a) Kolon, (b) Perde ve (c) Kiriş



Şekil 4. (a) Beton ve (b) çelik modeline ait örnek gösterim

3. Veri

Çalışma kapsamında uygulanan statik itme analizlerinde yatay yüklemeler iki düzen kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan yatay yükleme durumu düzgün yayılı yatay yükleme (DYD) ve üçgensel yayılı yükleme durumu (ÜYD) olarak tanımlanmıştır. DYD ve ÜYD ile yapılan analizler sonucunda elde edilen doğrusal olmayan statik itme analizi sonucunda binaların x ve y doğrultularına ait sonuçlar Şekil 5'te gösterilmektedir. Yatay eksen tepe deplasmanı deplasmanın bina yüksekliğine oranını, dikey eksen ise taban kesme kuvvetinin yapı ağırlığına oranını göstermektedir.



Şekil 5. Bina statik itme sonuçları: (a) bodrum perdesiz x-yönü, (b) bodrum perdeli x-yönü, (c) bodrum perdesiz y-yönü ve (d) bodrum perdeli y-yönü

4. Bulgular

4.1. Dayanım Fazlalığı Faktörü

Moment aktaran çerçeve sistemlerde yer alan kolondaki güç tükenmesi veya kırışlerde gevrek kesme kırılmasına bağlı olarak dayanım fazlalığı faktörü nedeniyle çökme mekanizması oluşabilir. Yapısal olmayan elemanlardan dolayı kolonların kesme göçmesi veya yumuşak kat göçmesi gözlemlenebilir. Ayrıca yapının periyodu, tasarım düzeyi, sismik etki dışındaki yük durumları, yapı sistemi, tasarımda kullanılan süneklik düzeyi ve yukarıda belirtilen diğer parametreler Ω_d faktörlerini etkileyen etkili anahtar parametrelerdir (Park 1996, Elnashai ve Di Sarno 2015). Ω_d olarak sembolize edilen ve dayanım fazlalığı faktörü olarak ifade edilen faktörün hesabına ilişkin 1 no'lu eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$\Omega_d = \frac{V_y}{V_d} \quad (1)$$

(1) no'lu eşitlikte akma ve tasarım taban kesme kuvveti değerleri sırasıyla V_y ve V_d olarak verilmiştir. DYD ve ÜYD sonucunda elde edilen Ω_d faktörlerini değerlendirdiğimizde, DYD ile yapılan nonlinear statik itme analizleri sonucunda x ve y doğrultusunda bodrum perdelerinin mevcudiyeti durumunda sırasıyla 4.72 ve 2.28 olarak hesaplanmıştır. ÜYD ile yapılan nonlinear statik itme analizleri sonucunda ise x ve y doğrultusunda bodrum perdelerinin mevcudiyeti durumunda 3.65 ve 1.75 olarak hesaplanmaktadır. Bodrum perdesiz durumda ise, DYD ile yapılan nonlinear statik itme analizleri sonucunda x ve y doğrultusunda sırasıyla 3.21 ve 2.52 olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan, ÜYD ile yapılan nonlinear statik itme analizleri sonucunda x ve y doğrultusunda sırasıyla 2.77 ve 2.35 olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen veriler değerlendirildiğinde x doğrultusunda rijit bodrum perdeli yapıların rijit bodrum perdesiz yapılara göre daha yüksek Ω_d faktörlerini gösterdiği ancak doğrultusunda bu durumun aksine rijit bodrum perdesiz yapılarda Ω_d faktörlerinde bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun temel sebebi sistemde yer alan elemanların kesit ataletlerinin her iki doğrultuda farklı değerlere ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Hesaplamalarda yer alan doğal titreşim periyotlarına bakıldığında rijit bodrum perdeli yapıların x ve y doğrultusunda sırasıyla 0.56 ve 0.65 s olarak hesaplanmıştır. Hesaplama eşitliği olan 1'nolu eşitlikte bu değer doğrudan etkimektedir. Dolayısıyla V_d değeri bu parametreden direk etkilenmektedir. Ayrıca düzenli olarak tasarlanan yapısal sistemlerde rijit bodrum perdelerinin yapıya Ω_d faktörü açısından olan artış etkisi önceki çalışmalarda da benzer olarak etkimıştır. Bu çalışmalar incelendiğinde elde edilen yapıya Ω_d faktörü %25 civarına kadar daha büyük olarak elde edilebilmektedir (Özuygur ve Dilsiz 2021).

4.2. Doğal Dayanım Fazlalığı Faktörü

Önerilen tepki ölçüsü Ω_i , diğer doğal dayanım fazlalığı faktörü tasarım depremi altında yapının rezerv gücünü ve beklenen davranışını yansıtır. Açıkça, $\Omega_i \geq 1.0$ durumunda, yapının yüksek aşırı mukavemetini nedeniyle yapının davranışı tasarım depremi altında neredeyse elastik olacaktır. $\Omega_i < 1.0$ ise yapının tasarım depremini inelastik davranışlarla atlatacağını göstermektedir (Elnashai ve Di Sarno 2015). Ω_i faktörünü hesabına ilişkin (2) no'lu eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$\Omega_i = \frac{V_y}{V_e} \quad (2)$$

(2) no'lu eşitlikte akma ve elastik taban kesme kuvveti değerleri sırasıyla V_y ve V_e olarak verilmiştir. Bodrumda rijit perde sistemine sahip yapılarda x doğrultusunda Ω_i faktörleri, DYD ve ÜYD ile yapılan nonlinear statik itme analizleri sonucunda sırasıyla 0.77 ve 0.59 olarak hesaplanmıştır. Rijit bodrum perdelerinin kaldırılması durumunda DYD ve ÜYD ile yapılan nonlinear statik itme analizleri sonucunda yapıda Ω_i faktörlerinin değerleri x doğrultusunda, sırasıyla %16 ve %7 azaldığı hesaplanmıştır. Aynı yapıların performanslarının hesaplandığı ikinci performans hesap doğrultusu olan Y doğrultusunda ise, Ω_i faktörlerinin değerleri DYD ve ÜYD ile yapılan nonlinear statik itme analizlerinde sırasıyla 0.34 ve 0.26 olarak hesaplanmıştır. Ω_i faktörleri DYD ve ÜYD ile yapılan nonlinear statik itme analizleri sonucunda rijit bodrum perdelerinin kaldırıldığı yapı için sırasıyla %33 ve %60 daha büyük olarak elde edilmiştir.

DYD ve ÜYD ile yapılan analizler sonucunda hesaplanan Ω_i faktörleri değerleri rijit bodrum perdeli yapılarda x doğrultusunda rijit bodrum perdesiz yapılara göre daha yüksek değerlerde elde edilirken, y doğrultusunda bu durumun aksine rijit bodrum perdesiz yapılarda daha yüksek Ω_i faktörleri değerleri elde edilmektedir. Tasarım esnasında hesaplana V_e değerleri y doğrultusunda daha düşük olarak hesaplanırken, x doğrultusunda daha yüksektir. Ayrıca etkin kesit ataletlerinin de y-doğrultusunda daha yüksek olduğu dikkate alındığında bu durumun temel nedenini oluşturduğu söylenebilir. Diğer taraftan rijit bodrum perdeli ve perdesiz sisteme ait doğal titreşim periyotlarında yer alan değişime bakıldığında y doğrultusu için sırasıyla 0.65 ve 0.50 s olarak hesaplanmıştır. elde edilen bu değerler tasarım spektrumundan elde edilen ivme değerleri ile karşılaştırıldığında yapısal sistemin davranışında yüksek mod katkısının önceki çalışmalarda da (Etili ve Güneysisi 2021, 2020a, 2020b) belirtildiği gibi önemli bir etkisi olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir.

4.3. Süneklik faktörü

Depreme dayanıklı tasarımın yaygın olarak uygulanmasında, plastik deformasyonlar yoluyla dağılabilen sismik enerji miktarını göstererek yapıların performansını değerlendirmek için süneklik terimi kullanılır. Süneklik kavramının kullanılması, sismik tasarım

kuvvetlerinin azaltılmasına ve güçlü depremler durumunda bina içinde kontrollü bir hasar üretilmesine izin verir. Yapıların sismik tasarımında plastik özellikleri dikkate alınarak süneklik kapasitesi önemli bir faktördür. Bir yapının esnekliği, yapının nihai kapasitesini tahmin etmemizi sağlar. Bu, yapıların geleneksel yükler altında tasarımı için önemli bir kriterdir (Victor ve Federico 2002). Süneklik faktörü, μ hesabına ilişkin (3) no'lu eşitlik aşağıda verilmiştir.

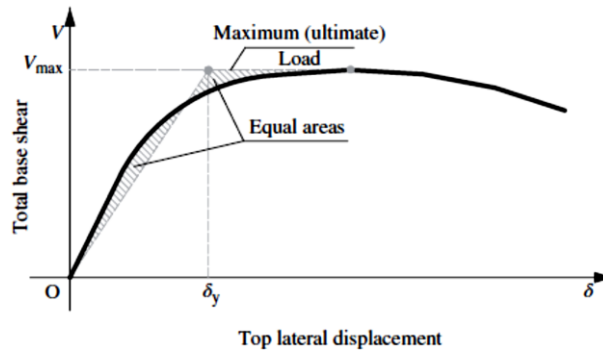
$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (3)$$

(3) no'lu eşitlikte akma ve maksimum yük altındaki tepe deplasmanı değeri sırasıyla Δ_y ve Δ_u olarak verilmiştir. Tasarımı yapılan bodrumda rijit perde yer alan yapı için DYD ve ÜYD ile yapılan nonlinear statik itme analizleri sonucunda hesaplanan μ faktörleri x doğrultusunda, sırasıyla 1.67 ve 1.69 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca bodrumda rijit perde yer alan yapı için, Y doğrultusunda ise, μ faktörlerini DYD ve ÜYD ile yapılan nonlinear statik itme analizleri sonucunda sırasıyla 2.23 ve 2.25 olarak hesaplanmıştır. Rijit bodrum perdelerinin kaldırılması ile elde edilen yapıda ise μ faktörleri DYD ve ÜYD ile yapılan nonlinear statik itme analizleri sonucunda elde edilen değerler ile kıyaslandığında x doğrultusunda DYD sonucunda %8 artarken ÜYD sonucunda %4 azalmıştır. Diğer taraftan rijit bodrum perdelerinin kaldırıldığı yapıda, y doğrultusunda μ faktörlerinin değerleri DYD ve ÜYD ile yapılan nonlinear statik itme analizleri sonucunda bodrum perdelerinin kaldırılması sonucunda %26 ve %3 azalma olarak elde edilmiştir.

μ değerine ait sonuçlar incelendiğinde sadece x doğrultusunda DYD analizi ile elde edilen sonuçlarda rijit bodrum perdeli yapıların rijit bodrum perdesiz yapılara göre daha düşük değerlerde kalmaktadır. Diğer taraftan kalan kısımlara ait sonuçlarda, DYD ve ÜYD ile yapılan analizler sonucunda hesaplanan μ faktörleri değerleri rijit bodrum perdeli yapılarda x ve y doğrultusunda rijit bodrum perdesiz yapılara göre daha yüksek değerlerde elde edilmiştir. DYD ile yapılan hesaplarda literatürde yer alan çalışmalar değerlendirildiğinde oluşan plastik mafsallaşmaların yoğunluğundan sistem davranışına etki edeceği bilinmektedir (Etili ve Güneysi 2021, 2020a, 2020b). Dolayısıyla yapısal rijitliğin önemli derecede değişmesinin yüksek modların katkısını artırarak sistem davranışına etkidiği düşünülmektedir. Diğer taraftan literatürde yapılan perdelerin sisteme olan etkilerinin incelendiği çalışmalarda (Ayşe ve Kaya 2019; Özüyüğü ve Dilsiz 2021) perde sistemlerin akma dayanımına ait deplasmanları azalttığı ve ayrıca elde edilen tepe deplasman değerlerinde de yapının doğal titreşimine bağlı olarak artışlara yol açtığı gözlemlenmektedir. Bu durum özellikle ÜYD sistemlerde sınırlı değerlerde gözlemlenebilmektedir.

4.4. Rijitlik faktörü

Yapıların sismik performansını belirlemek için, doğrusal olmayan statik ve dinamik analizden bazı anahtar parametreler elde edilir. Bu parametreler, yapının çökme ve akma durumuna erişimi için tanımlanan sınır durumlarıdır. Taban kesme kuvveti-Tepe deplasmanı eğrisinden elde edilen akma noktasının değerlendirilmesi için farklı tanımlar verilmiştir. Rijitlik, bir yapının ve bileşenlerinin hareketleri ve deformasyonları arasındaki ilişkiyi tanımlar. Eleman rijitliği, kesit özellikleri, uzunluk ve sınır koşullarının bir fonksiyonudur ve sistem rijitliği, moment aktaran çerçeveler, desteklenen çerçeveler, duvarlar veya dual sistemler gibi kullanılan yanıl direnç mekanizmalarının bir fonksiyonudur. Geometri, mekanik özellikler, hareketler ve deformasyonlar arasındaki ilişkiler, mekanik prensiplerinden türetilebilir. Karmaşıklıkları kullanılan yapı malzemesine bağlıdır. Moment aktaran çerçeve sistemlerden oluşan yapılar için, sertlik, akma noktasına veya taban kesme kuvveti-tepe deplasman eğrisinde seçilen herhangi bir başka noktaya sekant olarak alınabilir. Bu noktayı tanımlamak için kullanılan bazı yöntemler aşağıdaki gibi deformasyona karşılık gelen şekilde uygulanmıştır; (a) ilk akma, (b) gerçek sistemle aynı elastik rijitlik ve nihai yüke sahip eşdeğer bir elasto-plastik sistemin akma noktası, (c) aynı elastikliğe sahip eşdeğer bir elasto-plastik sistemin akma noktasına gerçek sistem olarak enerji absorpsiyonu ve (d) gerçek sistemin nihai yanıl yükünün %75'inde sekant sertliği olarak hesaplanan azaltılmış sertliğe sahip eşdeğer bir elasto-plastik sistemin akma noktası (Park 1988, Whittaker, Hart ve Rojahn 1999, Thermou ve diğ. 2004).



Şekil 6. Akma noktası hesabı (Elnashai ve Di Sarno 2015).

Bu çalışma kapsamında akma noktasının hesabında Şekil 6'da verilen grafik kullanılmıştır. Dolayısıyla nihai yanıl yükünün sekant sertliği noktasındaki yüke oranına % olarak ifadesini rijitlik faktörü olarak değerlendirilmesi mümkündür. DYD ve ÜYD sonucunda elde rijitlik faktörlerini değerlendirdiğimizde, DYD ile yapılan nonlinear statik itme analizleri sonucunda x ve y doğrultusunda bodrum

perdelerrinin mevcudiyeti durumunda srasıyla %88.3 ve %88.1 olarak hesaplanmıştır. ÜYD ile yapılan nonlinear statik itme analizleri sonucunda ise x ve y doğrultusunda bodrum perdelerinin mevcudiyeti durumunda %87.9 ve %88.3 olarak hesaplanmaktadır. Bodrum perdesiz durumda ise, DYD ile yapılan nonlinear statik itme analizleri sonucunda x ve y doğrultusunda srasıyla %88.8 ve %86.8 olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan, ÜYD ile yapılan nonlinear statik itme analizleri sonucunda x ve y doğrultusunda srasıyla %88.6 ve %88.1 olarak hesaplanmıştır.

5. Sonuçlar

Bu çalışmanın sonuçları aşağıdaki gibi:

- Rijit bodrum perdesi ile tasarlanan bina için x-yönü için DYD ve ÜYD ile yapılan nonlinear artımsal statik itme analizleri sonucunda elde edilen Ω_d sonuçlarının, rijit bodrum perdesi kaldırılanlardan ortalama %28 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durumun temelinde yapının doğal titreşim periyotlarındaki değişimin önem arz ettiği öngörölmektedir.
- DYD ve ÜYD ile yapılan nonlinear artımsal statik itme analizleri sonucunda rijit bodrum perdesi ile tasarlanan bina için y-yönü için elde edilen Ω_d sonuçlarının, rijit bodrum perdesi kaldırılanlardan ortalama %22 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Yapısal sistem planında eleman yerleşiminde seçilen yerleşim doğrultusunun yapının doğal titreşim periyodunda meydana getirdiği artış sonucunun bir etkisi olarak değerlendirilmektedir.
- μ faktörlerinin y- yönü için DYD ve ÜYD ile yapılan nonlinear artımsal statik itme analizleri sonucunda rijit bodrum perdesi ile tasarlanan binada rijit bodrum perdesi kaldırılanlardan yapıya göre ortalama olarak %14 daha büyüktür. ereve sistemine eklenen rijit bodrum perdesinin kullanılmasının sünekliliğe olan pozitif etkisinin gözleendiği öngörölmektedir.
- ÜYD ile yapılan nonlinear artımsal statik itme analizleri sonucunda hesaplanan μ faktörü x- yönü için rijit bodrum perdesi ile tasarlanan binada rijit bodrum perdesi kaldırılması durumunda ortalama olarak %4 daha büyüktür. Diğer taraftan DYD sonucunda ise için rijit bodrum perdesi ile tasarlanan binada rijit bodrum perdesi kaldırılması durumunda ortalama olarak %8 daha küçüktür.
- Rijit bodrum perdesi ile tasarlanan bina için DYD ve ÜYD ile yapılan nonlinear artımsal statik itme analizleri sonucunda x-yönü için elde edilen Ω_i sonuçlarının, rijit bodrum perdesi kaldırılanlardan ortalama olarak %12 daha yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan y-yönü için DYD ve ÜYD ile yapılan nonlinear artımsal statik itme analizleri sonucunda elde edilen Ω_i sonuçlarının, rijit bodrum perdesi olanların rijit bodrum perdesi kaldırılanlardan %46 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Oluşan bu farklılığın temelinde tasarım aşamasında kullanılan yapısal taşıyıcı sistem geometrik yerleşimleri etkin rol oynamaktadır.

Referanslar

- Aksoylu, C., & Arslan, M.H. (2019). ereve+ Perde Türü Betonarme Binaların Periyod Hesaplarının Tbdy-2019 Yönetmeliğine Göre Ampirik Olarak Değerlendirilmesi. *Uludağ University Journal Of The Faculty Of Engineering*, 365–382. <https://doi.org/10.17482/Uumfd.603437>
- Ayşe, Ö.Ö., & Kaya, G. (2019). Perde Ve ereveli Betonarme Yapılarda Perde Konumunun Planda Düzenlenmesi Ve Yapısal Davranışa Etkisi. *Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, 7, 7–17. <https://doi.org/10.21923/Jesd.429880>
- Bozkurt, M.B., & Serin, B. (2021). Dbybhy-2007 Ve Tbdy-2018 Esas Alınarak Boyutlandırılan Mçç’lerin Deprem Performanslarının Karşılaştırılması. *Teknik Dergi*. <https://doi.org/10.18400/Tekderg.620816>
- Elnashai, A.S., & Di Sarno, L. (2015). *Fundamentals Of Earthquake Engineering: From Source To Fragility*, 2nd Edition. John Wiley & Sons.
- Etili, S., & Güneyisi, E.M. (2021). Assessment Of Seismic Behavior Factor Of Code-Designed Steel–Concrete Composite Buildings. *Arabian Journal For Science And Engineering*, 46, 4271–4292. <https://doi.org/10.1007/S13369-020-04913-9>
- Etili, S., & Güneyisi, E.M. (2020a). Response Of Steel Buildings Under Near And Far Field Earthquakes. *Civil Engineering Beyond Limits*, 3, 8–14. <https://doi.org/10.36937/Cebel.2020.002.004>
- Etili, S., & Güneyisi, E.M. (2020b). Seismic Performance Evaluation Of Regular And İrregular Composite Moment Resisting Frames. *Latin American Journal Of Solids And Structures*, 17, 1–22. <https://doi.org/10.1590/1679-78255969>
- Kasap, H., Mert, N., Sevim, E., & şeber, B. (2015). Perdeli-ereveli Taşıyıcı Sistemli Binalarda Taşıyıcı Sistem Seiminin Yapı Davranışı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. *Academic Platform Journal Of Engineering And Science*, 3, 48–55.
- Martinez-Rueda, J.E., & Elnashai, A.S. (1997). Confined Concrete Model Under Cyclic Load. *Materials And Structures*, 30, 139–147.
- Monti, G., & Nuti, C., 1992. Nonlinear Cyclic Behavior Of Reinforcing Bars İncluding Buckling. *Journal Of Structural Engineering (United States)*, 118, 3268–3284. [https://doi.org/10.1061/\(Asce\)0733-9445\(1992\)118:12\(3268\)](https://doi.org/10.1061/(Asce)0733-9445(1992)118:12(3268))

- Özuygur, A.R., & Dilsiz, A. (2021). A Discussion On The Design Of Buildings With Rigid Basement According To Tbsc 2018. *Uluslararası Mühendislik Arastırma Ve Gelistirme Dergisi*, 13, 243–249. <https://doi.org/10.29137/umagd.807186>
- Park, R. (1996). Explicit Incorporation Of Element And Structure Overstrength In The Design Process. *Proceedings Of The 11th Wcee. Iae, Acapulco, Mexico*.
- Park, R. (1988). Ductility Evaluation From Laboratory And Analytical Testing, In: *Proceedings Of The 9th World Conference On Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan*. Pp. 605–616.
- Şahan, M.F., & Ünsal, İ. (2021). TBDY 2018 Yönetmeliğinde Verilen Süneklik Düzeyi Yüksek Betonarme Taşıyıcı Sistemler İçin Maliyet Ve Deprem Performansı Bakımından Bir Karşılaştırma. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 509–522. <https://doi.org/10.21605/Cukurovaumfd.982837>
- Seismosoft (2018). *Seismostruct: A Computer Software For Static And Dynamic Nonlinear Analysis Of Framed Structures*.
- TBDY-2018 (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318m1-2-1.pdf>, 416. TBDY, 2018. *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği* 416.
- Thermou, G.E., Elnashai, A.S., Plumier, A., & Done, C. (2004). Seismic Design And Performance Of Composite Frames. *Journal Of Constructional Steel Research*, 60, 31–57. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2003.08.006>
- Victor, G., & Federico, M.M. (2002). *Ductility Of Seismic Resistant Steel Structures*-Spon Press.
- Whittaker, A., Hart, G., & Rojahn, C. (1999). Seismic Response Modification Factors. *Journal Of Structural Engineering*, 125, 438–444.



An Improved Deep CNN For an Early and Accurate Skin Cancer Detection and Diagnosis System

Zafer Civelek¹ , Mohammed Hani Shakir Kfashi² 

¹Çankırı Karatekin University, Department of Electrical and Electronic Engineering, Çankırı, TURKEY

²Al-amriya, 10011 Baghdad, IRAQ

Başvuru/Received: 13/05/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Abstract

Skin cancer is considered to be the most common and dangerous type of cancer. Information technology techniques are required to detect and diagnose skin cancer. Therefore, there is a need for an early and accurate skin cancer diagnosis and detection by employing an efficient deep learning technique. This research work proposes automatic diagnosis of skin cancer by employing Deep Convolution Neural Network (DCNN). The distinguishing feature of this research is it employs DCNN with 12 nested processing layers increasing the diagnosis and detection of skin cancer accuracy. Beside neural network, machine learning techniques of naïve Bayes and random forest are also utilized to detect skin cancer. This research work results concluded that the deep learning technique are more effective than machine learning in terms of skin cancer detection. By applying Naïve Bayesian on the proposed system accuracy of 96% were achieved, similarly for Random Forest method, an accuracy of 97% were achieved. The accuracy of 99.5% were achieved by applying Deep CNN network. The performance of proposed system has been compared with other research work and it is concluded that it shows the higher performance compared to all conventional systems.

Key Words

“Skin Cancer, Machine Learning, Deep learning and Detection, Diagnosis”

1. Introduction

Cancer is common terminology for a variety of diseases that affect the human body. Cancer is basically an abnormal cells growth that attacks adjoining cells and spreads to organs of the body the process is known as metastasizing. Metastasizing cause's death and cancer is second leading cause of deaths internationally, approximately 9.6 million people die or one in sixth death is caused by cancer (Bray et al., 2018).

Skin cancer is greatest common and hazardous form of cancer diagnosed in human in recent years. It is found in various forms like melanoma, squamous and basal out of which melanoma is unpredictable to diagnosis. The occurrence of non-melanoma, and melanoma skin cancers has expanded over the last decades. Nowadays 132,000 melanoma skin cancer and between 2 and 3 million non-melanoma skin globally occur every year. Rendering to the records of Skin Cancer Foundation Statistic (SCFS) one out of five Americans have skin cancer. The 19th most common cancer in men and woman are Melanoma. Approximately in 2018 there were 300,000 cases of skin cancer. The 5th common cancer is non-melanoma cancer which effect 1 million people both male and female worldwide (Nahata & Singh, 2020). Furthermore, detection and diagnosis cancer disease are the most challenge to the doctors because of its resemblance. Skin cancer can't be detected with naked eye as it appears like a small mole in initial stages (Kadampur & Al Riyae, 2020).

Information technology IT plays a huge role in diagnosis of diseases. Information technology improvement offers advancement in health care in terms of diagnosis, management, and support of the diseases. The physicians also get aids in diagnostic process due to improved decision support systems incorporated with evidence base medicines (Krive et al., 2015).

Many well studies have been established in skin cancer detection and diagnosis by using information technology. Some of them applied the machine knowledge methods for example Naive Bayes, Random Forest, Agent technology and Neural Network (Mahesh, 2020). Whereas, the best results in skin cancer detection and diagnosis have been observed with Deep learning techniques such as probabilistic neural network (PNN), Artificial Neural Network (ANN), and Convolution Neural Network (CNN). (Salvi, Acharya, Molinari, & Meiburger, 2021).

The conventional method of image classification needs protruding structures representation feed to the training classifier. The features structures can be color, shape, texture, or color images, while in skin cancer scenario, extraction of features and categorizing them on image base is difficult job to be done. The researcher's consideration has been drawn to use the CNNs to extract the structure features. Recent research has shown that CNNs abstraction capacity of layers has the capacity to excerpt together little level and high-level features (Kadampur & Al Riyae, 2020). However, it is concluded from researches that CNNs will give best result in detection and diagnosis of skin cancer.

A skin cancer early detection and diagnostic automatic system is proposed in this research study. The proposed system constitutes two subsystems, first is machine learning and second is deep learning, the second one is the contribution of this research work. This work is segmented into seven sections, starting with the introduction. In section 2, the most effective and related previous work have been discussed. Whereas, the architecture of the proposed system is illustrated in section 4. Furthermore, section 5 presents the implementation and results of the proposed system. The analysis and discussion of the work is demonstrated in section 6. Lastly, section seven concludes the work.

2. Related Work

Numerous research studies have been established to detect and diagnosis, in this section, the most effective and related to our work were presented and discussed in detail. In the prior work of Dagherir et al. (Dagherir, Tlig, Bouchouicha, & Sayadi, 2020), melanoma skin cancer hybrid method has been introduced to analyses doubtful lesion. The proposed system depends on three methods for prediction purpose which are CNN and two machine classifiers. The machine learning classifier are trained based on color, borders and texture of skin lesion. Then, these approaches are joint to recover their presentations usage majority voting. The evaluation of functioning of the proposed system, the International Skin Imaging Collaboration (ISIC) dataset has been used and contains 640 images. According to the obtained results, the highest accuracy level of 88.4% is achieved using these three methods altogether.

Ulzii et al. (Dorj, Lee, Choi, & Lee, 2018), studied that the rapid and intelligent classification system for skin cancer is CNN. Also, the emphasize on the skin cancer classification using error-correcting output coding (ECOC), support vector machine (SVM). Evaluation of performance was done color RGB color mode (red, green, blue) format images of the skin cancers are collected from KAGGLE is used to test. Specific collection of images has noise in term of other organs and tools. The better results are obtained by cropping these images. Total of 3753 images were tested on proposed algorithms containing four types of skin cancers. The implementation results shows that the maximum average accuracy values are 95.1%.

Zhang et al. (L. Zhang, Gao, Zhang, & Badami, 2019), uses CNN classifier optimized with a meta-heuristic for trained network models to visualize dataset for skin cancer classification. Optimization of the neural networks are done through different steps; a little literature is available for deep learning base neural networks and its requests. In current study a novel method of monster optimization procedure is used for CNN model weight and biases optimization. The proposed technique comparison has been performed with ten general classifiers on two dataset of skin cancer counting Demurest Database and Dermi S Digital Database. An accuracy of 91 % is achieved while utilizing this method in comparison with conventional algorithms.

Kumar et al. (Kumar, Alshehri, AlGhamdi, Sharma, & Deep, 2020). proposed an upgraded tactic to notice three types of skin cancers in the initial stages. By using the proposed method, the input in skin cancer lesion, the classifier would distinguish between cancerous and non-cancerous type skin. The homogenous image region is separated by utilizing fuzzy C means in image segmentation. Different types of filters are used for preprocessing enhancing the attributes to images, while other features assessed by locale binary pattern (LBP), gray-level co-occurrence matrix (GLCM) and RGB color space. The false neural network is trained on difference development algorithms for further classification. Accuracy estimation are achieved for various features of skin cancer data set namely PH2 and HAM10000. The results from simulation result reals that the proposed method detect skin cancer effectively with a precision of 97.4%.

In former work of Boman and Volminger, (Boman & Volminger, 2018). attempts to implement the technique providing in the Stanford report and assess the performance of the CNN during the classification of skin lesion comparisons not tested in their research. Melanoma vs. solar lentigo and melanoma versus seborrheic keratosis are two previously unknown binary classification use cases. Inception v3 was trained for diverse skin lesions using transfer learning. A total of 16 training classes were used to prepare the CNN. During the CNN's validation, a 3-way classification attained an accuracy of 68.3 percent. With the same comparisons as the Stanford study, melanoma against nevus had a 71 percent accuracy rate, while seborrheic keratosis versus basal and squamous cell carcinoma had a 91 percent accuracy rate. For seborrheic keratosis vs melanoma, the accuracy rate was 84 percent, and for solar lentigo versus melanoma, it was 83 percent. Andre et al. (Pacheco, Ali, & Trappenberg, 2019). have developed a system that uses photos and meta-data to detect and diagnose skin cancer. The suggested system's performance was tested and evaluated using the ISIC 2019 dataset. Moreover, there are nine lessons in the dataset, yet, one of them is an outlier and is not current on it. To address the problem, we employ an collaborative of classifiers that includes 13 convolutional neural networks (CNNs), two ways for dealing with outliers, and a simple method for using meta-data with images. The findings achieved are consistent with the prior challenges, and the methods for detecting the outlier class and dealing with meta-data appear to be effective. The proposed system achieves an excellent result with an correctness of 91%.

3. Research Methods and Materials

In this section, the research and methods which have been used in this work are summarized as follows:

3.1 Testing dataset

The International Skin Imaging Collaboration (ISIC) was utilized to test and assess the proposed system's performance. It's a collaboration between academics and business aimed at making it easier to use digital pores and skin imaging to help lessen melanoma mortality. Melanoma is easily treatable when detected and preserved in its early phases (Daghrir et al., 2020),(Boman & Volminger, 2018). Through tele-dermatology, clinical decision support, and automated diagnosis, digital photographs of skin lesions may be utilized to instruct experts and general public about melanoma detection and also directly help in melanoma diagnosis. SIC works to achieve its goals through the development and promotion of standards for digital skin imaging and by engaging the dermatology and computer science communities toward improved diagnostics (Pacheco et al., 2019). ISIC is developing proposed standards to enhance the quality, privacy, and interoperability (that is capability to circulate images among clinical platforms and technologies) of digital skin images. Moreover, figure. 1shows a example of Melanoma and Benign cells.

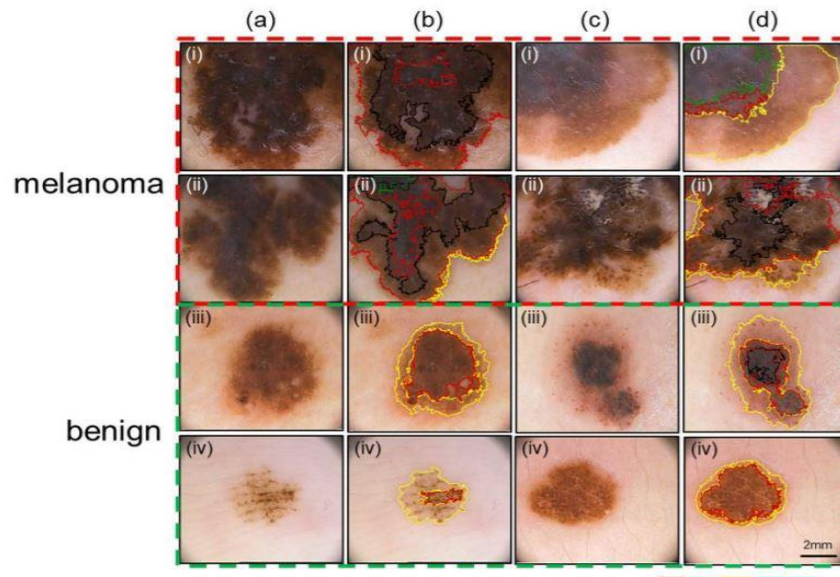


Figure. 1. Sample of Melanoma and Benign cells in different cases

3.2 Preprocessing stage

Preprocessing is an important stage and its first stage in the classification system that was used before the application of any type of classification technique. The dataset is containing a number of images, these images may obtain noise, shadow, and unimportant detail. This may result in misleading results. Therefore, preprocessing main goal is to detect Region of Interest ROI and eliminate noise. Several techniques have been employed to do the functionality of preprocessing stage, the preprocessing techniques which have been used in this work are summarized as the following:

3.2.1 Fastest gaussian blur

The goal of employing the quickest Gaussian blur filter is to reduce noise from the contribution photos so that a Gaussian function can blur the image. When blurring a picture, the color shift from one facet of an image's edge to the other will be smooth somewhat than abrupt (Ku, Harakeh, & Waslander, 2018). The result is that fast fluctuations in pixel intensity are averaged out (Brekhna, Mahmood, Zhou, & Zhang, 2017). It is a convolution operation between Gaussian filter kernel and input images, Gaussian Blur can be calculated as in Eq. 1,

$$f * g[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f[m].g[n - m] \quad (1)$$

and,

$$f(x, y) = A. e^{-1\left(\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right)} \quad (2)$$

3.2.2 YCbCr color space

After applying the quickest Gaussian blur output to the dataset's RGB color image, transform the image's color space from RGB to YCbCr in this stage to make the ROI (diseases region) more evident in infected and healthy images (Ku et al., 2018),(Yang, Zou, Zhou, & Shi, 2020). The luminance and chrominance in a picture are separated of YCbCr color space. The image's brightness is saved in the Y-channel. Cr and Cb channels store in red and blue direction chrominance values accordingly.

3.2.3 Fast fourier transform (FFT)

The application channel for image space is far faster than for images in iteration areas (Grigoryan & Agaian, 2020), to convert copy from spatial copy space to repetition part and FFT technique is employed. This stage seeks to improve and make more features of the image visible in a shorter amount of time, therefore the images inverse and forward transformation they will be required in frequency domain to apply FFT technique to the YCbCr images.

3.3 Classification stage

- *Naive bayes*

The most frequent classification algorithms are naive Bayes approaches, which are based on Bayesian probability theory (Mahesh, 2020),(Pranckevičius & Marcinkevičius, 2017). The number got by dividing the number of instances A by the entire number of proceedings is the likelihood of an event A. it is well know that probability value lies between 0 and 1 it is represented in percent here. For instance, the probability of picking a letter C, D, E, F, G, or H at chance is $p(\text{sound}) = 1/6$, or roughly 16.67 percent. Because they have no influence on one other, the probability principle has two independent events.

$$P(B | A) = p(A). (B) / P(A) \quad (3)$$

Thomas Bayes' understanding of the Bayesian technique was a major influence on the Bayesian notion. In 1763 after his demise, his idea was printed in the Philosophical Transactions of the Royal Society of London in an article titled "On the Problem about the Opportunity" (Lewis, 1998). Bayesian statistics is apprehensive with calculating the likelihood of a specific pattern (sample) X assumed for a large number of comments. The probability of the posterior (i.e., the pattern of specific class probability I providing its pragmatic values) or the hypothesis of a class is determined in the following equations for pattern X.

$$h, P(h|X), \text{ is as indicated } P(h|X) = \frac{P(X|h)P(h)}{P(X)}, \quad (4)$$

Here P(h) value is associated from likelihood of h (such that N and |h| are pattern number in h class and total number accordingly, moreover assuming all theories equal probability). The provisional likelihood of term X is represented by P(X|h) depends on h; ant previous probability of X is P(X). Maximum Posterior Hypothesis MAP is utilized to denote the optimum $P_h = \left(\frac{|h|}{N}\right)$

$$P_{\frac{h}{x}} \text{ h. class.} \tag{5}$$

$$h_{MAP} \equiv \arg \max_{h \in H} = \arg \max_{h \in H} P(X|h)P(h) \tag{6}$$

Set of assumptions is represented by H.

The efficiency of Bayesian classifier can be improved in term of least error rate due to likelihood of data probity. The predicted loss of a choice which is also known as conditional risk value is smallest in this case. This statistically optimal categorization criterion serves as an agreed-upon standard for the output comparison of various rating algorithms (Pranckevičius & Marcinkevičius, 2017).

That is a well-known probabilistic classifier that is utilized in a variety of requests. The Bayes classifier is founded on the Bayes theorem whereas naive adjective is generated by considering mutually independent characteristics of the data set. In other words, exercise instances features are supposed to be independent of one another in the class setting (Gedraite & Hadad, 2011). The NB classifier signifies all patterns X as an n-dimensional course representing features values of [a1, a2... and] assuming that it is c1, c2... Etc. When and only when class C I assigns an unknown pattern X, the classificatory expects it to drop to the class with the peak post-conditional probability, as shown in equation. 7, 8.

$$P(C_i|X) > P(C_j|X) \tag{7}$$

and,

$$P(C_i|X) = \frac{P(X|C_i)P(C_i)}{P(X)} \tag{8}$$

However, to minimize the required computing costs, the classifier marks the naïve or simplistic supposing that the attributes (with total number is given by n) are independent provisionally from all other. The independency of the class-conditional i can be demonstrated as follows:

$$P(X|C_i) = \prod_{j=1}^n P(f_j|C_i). \tag{9}$$

Because P(X) represent each class constant value and $P(C_i) = \frac{|C_i|}{N}$, the NB classification must maximize just P(X|C_i). Since it counts class distribution, this drastically reduces the cost of calculation. Bayesian classification is simple, using a unity data scan to offer a great level of precision (Pranckevičius & Marcinkevičius, 2017).

- *Random forest classifier*

The classifier random forest is false of a series of tree classifiers {h(x, θ_k) = 1, 2. where k is a distributed unequally scattering vector so all tree chooses a component for the shared category at the input x [20]. A tree selection is shaped by Random Forest Arbitration. To make each and every tree in a Random Forest technique, Breiman utilized the ensuing procedures: This is a bootstrap test; if N is prep set size, N files are provided precisely, but by dividing it from the original data. This demonstration will act as a warm-up for the tree's growth (Krive et al., 2015). If M input rudiments and the number M is set with the goalmouth of picking m rudiments in M at random at all location, with the finest allocation of these m components being to detach the midpoint. The assessment of m's circumstantial arena expansion is preserved (Speiser, Miller, Tooze, & Ip, 2019). Equation 10 may be used to calculate it.

$$RE^* = f_{xy}(mg(X.Y)) < 0 \tag{10}$$

Margin function can be signified as follows

$$mg(X.Y) = av_k I(h_k(x) = Y) - \max_{j \neq Y} av_k(h_k(X) = j) \tag{11}$$

The margin function determines how far the average quantity of votes for the right magnificence exceeds the average vote for some other elegance at (X, Y) (Speiser et al., 2019). The Random Forest's strength is expressed in terms of the predicted value of the boundary purpose as,

$$S = E_{X,Y}(mg(X.Y)) \tag{12}$$

If ρ is the imply cost of the correlation between base trees, an top sure for generalization error is given by,

$$PE^* \leq P(1 - S^2) / S^2 \tag{13}$$

- Convolutional neural networks (CNN)

CNN is a sort of feed-forward false neural network that constitutes many convolutional layers preceded by one or additional completely linked layers, analogous to a typical multi-Layer perceptron (Mahesh, 2020). CNN is a feed-forward neural network, as seen in figure. 2. The indication is handled straight here, with no loops or cycles. This is signified as (N. Zhang et al., 2020):

$$G(x) = gn(gn - 1 (... (g_1(x)))) \tag{14}$$

Here N signifies the hidden layers count, input signal is X, and gn represents the purpose conforming to layer N. A convolutional layer in a simple CNN model contains a purpose g with several convolutional kernels (h1, ... hk-1, hk). Each hk represents a linear purpose in the kth seed, as seen in (Munir, Elahi, Ayub, Frezza, & Rizzi, 2019):

$$h_k(x, y) = \sum_{s=-m}^m \sum_{t=-v}^n \sum_{v=-d}^w v_k(s, t, v)x(x - s, y - t, z - v) \tag{15}$$

where (x, y, z) is the pixel location of the input X, m is the tallness, n is the width, w is the filter depth, and v k is the weight of the kth kernel (Munir et al., 2019).

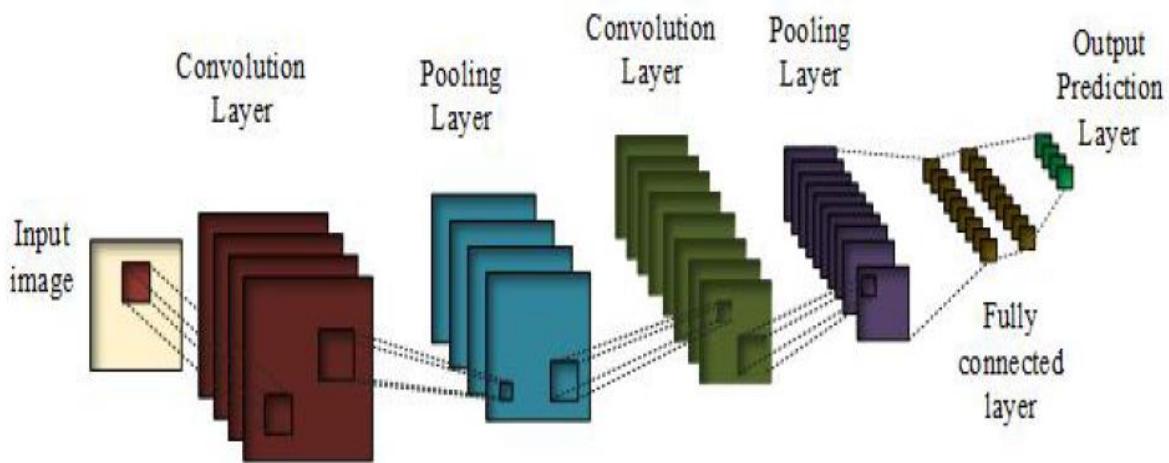


Figure. 2 The architecture of CNN

The primary reason for grouping in CNN is to benefit from down sampling, which enumerates surrounding pixels and substitutes it in display in a region of summary attributes. Pooling lowers dimensionality while maintaining the immutability of rotational, and interpretative modifications. One of the most well-known polar capacities (N. Zhang et al., 2020). is max pooling, wherever efficacy is the best approximation of area in pixel of rectangular order. The display undertakes the typical worth of the rectangle zone in normal grouping mode. Normal weighting is another type that is dependent on the right focus pixel routes. Grouping aids in making the depiction immutable for slight variations in information interpretation. In all circumstances, the following condition provides Atrous Convolution: Eqs. (Grigoryan & Aгаian, 2020), (Pranckevičius & Marcinkevičius, 2017), (N. Zhang et al., 2020). provide the Atrous Convolution:

$$y[i] = \sum_{k=1}^k x[i + r.k]w[k] \tag{16}$$

here x[i] is one-dimensional contribution sign w[k] would be the k-length sieve, and r would be the input signal sampling stride rate. y[i] is the outcome of the Atrous difficulty. Atrous difficulty is done at each position I on the production y, and also a sieve w by the Atrous degree r, which correlates to the pace degree. Bottomless remaining learning is usage to solve the performance squalor, which occurs when bottomless networks collide, increasing depths, precision, and degradation saturate. Layers that are clearly layered can reside in residual map as an alternative of the required basic map. Experimental data reveals, residual network optimization is fairly simple, and precision may be attained with a substantial depth increment. In deep neural networks, good connections assist information to transcend (Speiser et al., 2019). Going through too many levels might result in the disappearance trend, which is a progressive loss of information. Escape connections offers benefit of lower-level information further lowering, creating minute features easier to identify. Over-polling activities have resulted in the loss of some local information, whereas escape connections allow extra information of final layer to be obtained in order to improve ranking accuracy (N. Zhang et al., 2020).

Numerous activation function can be used in the activation layer (Daghrir et al., 2020):

- i. Equation (17) gives sigmoid activation function (Gedraite & Hadad, 2011).

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \tag{17}$$

The above equation is nonlinear as a consequence the combination is nonlinear function allowing us to create layers. It has an x-axis range of -2 to 2 and a y-axis range of fairly vertical, signifying dramatic variations in the values of y in response to tiny variations in x values.

- ii. the activation function also has a property that its output remains in range of (0, and 1)

- iii. Tanh function can be explained as (Rey-Barroso et al., 2021).

$$f(x) = \tanh(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \tag{18}$$

known as scaled sigmoid function

$$\tanh(x) = 2sigmoid(2x) - 1 \tag{19}$$

The range stretch between -1 to 1 and tanh has much stronger gradient than sigmoid purpose.

- iv. Rectified linear unit (ReLU) is popular employed activation function (Rey-Barroso et al., 2021), such that g indicates a nonlinear pixel-wise function. If x is positive, it returns x; else, it returns 0 (Wang, Zhang, & Wei, 2019).

$$g(x) = mx(0.x) \tag{20}$$

ReLU is intrinsically nonlinear as a result its multiple is nonlinear as well, allowing multiple levels to be layered together. It has a range of 0 to infinity, which means it can also explode up activation. G lowers the size of the characteristics for the polling layer, though the bottom liner performs conferring layer. 1 * 1 confessional kernel is present in the fully enclosed layer. A soft mix in the prediction layer forecasts the likelihood of Xj belonging to a distinct class (Pranckevičius & Marcinkevičius, 2017), (N. Zhang et al., 2020).

4. The Proposed System Architecture

In this work, an Automatic Skin Cancer detection and diagnosis System has been proposed; it is founded on deep learning by employing the Deep CNN and machine learning by employing the Naive Bayes, and Random Forest. The proposed system has the ability to detect and diagnose Skin cancer in early stage. figure. 3 displays the building of the proposed system; it is consisting of several main steps as following:

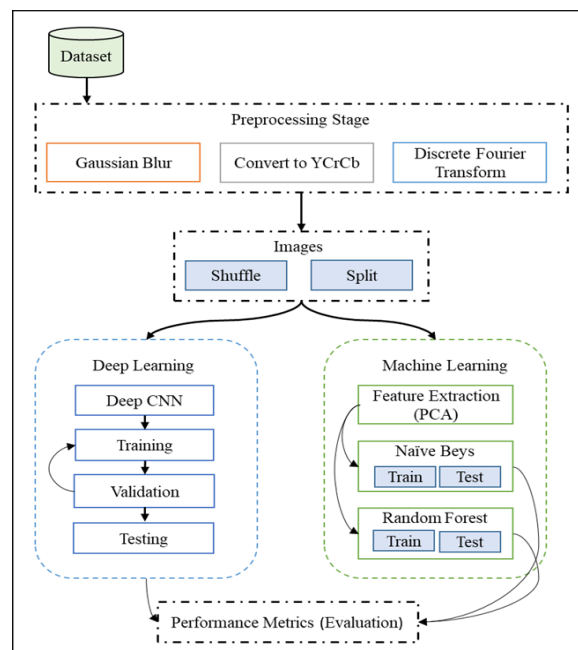


Figure. 3. The architecture of the proposed system.

ISIC is creating resources for the dermatology and computer science communities; Goals include a huge and growing open-source public access archive of skin pictures. This repository is a public picture resource for education, research, and the development and testing of diagnostic artificial intelligence systems. ISIC is engaging the stakeholder communities through meetings, publications, conferences, and the hosting of artificial intelligence Grand Challenges. In this work, the data contains 3297 images and two classes which are benign and malignant in different cases. The dataset is originally segmented in two training and testing. Furthermore, a total of 2637 images is used for exercise and a total of 660 imageries have been used for challenging and evaluation the performance of the proposed system.

The most critical stage in classification systems is preprocessing. This stage is divided into four major sub-stages, as indicated in figure. 4, and elucidates as follows:

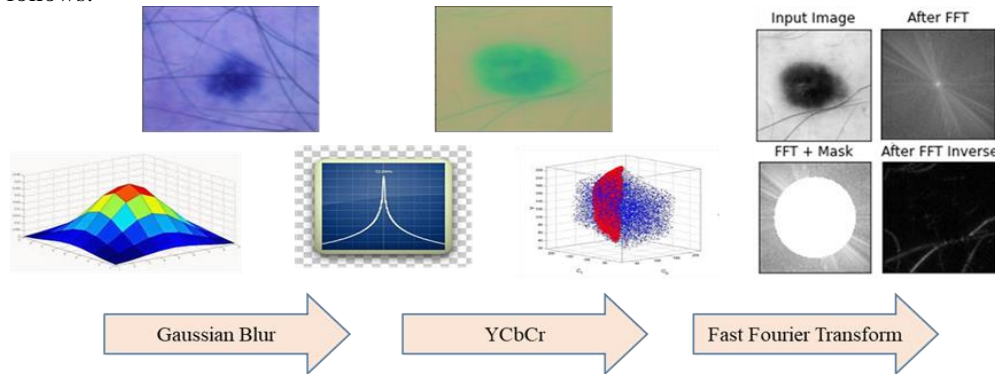


Figure. 4. The preprocessing Stage

Gaussian blur is a process of convolution among two input pictures and filter kernel. However, this phase demonstrates the information of the quickest Gaussian blur, since the algorithm's inputs are Skin cancer photos and the radius indicates "sigma" or "standard deviation." Also, this stage, 2D functions will be denoted as value matrices, and the weight is referred as kernel. The regular, i.e., the total of function quantity about I j], increased by a heaviness, is the value of convolution at I j]. figure 5 demonstrations of the output of the quickest Gaussian blur stage.

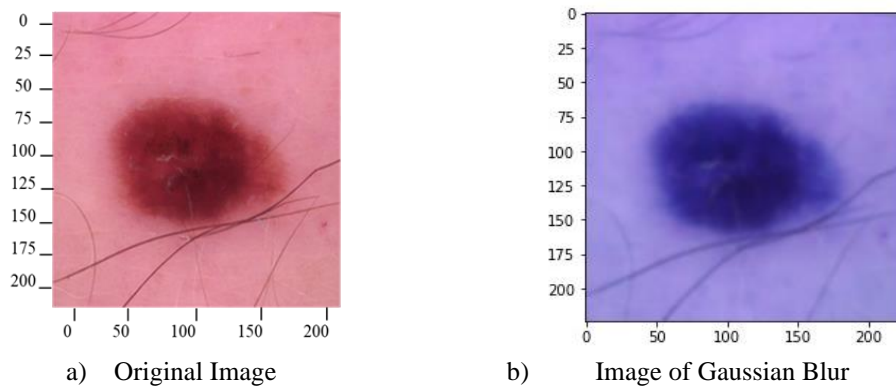


Figure. 5. Fastest Gaussian blur algorithm output example

The green component has the biggest impact on the Y-channel, as seen in figure. 6, since natural eyes perceive green, next to red and blue sections. When R, G, and B are all in the variety of 0... 255, Y is also in the range of 0... 255, whereas Cb and Cr are in the range of - 128... 127. The number 128 is usually allocated to channels Cb and Cr to consider them component of an unregistered byte data kind.

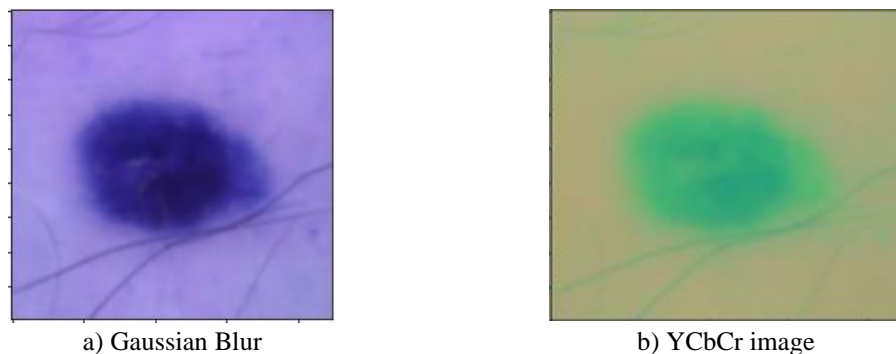


Figure. 6. An Example of convert color image from Gaussian to Ycbr

The FFT procedures outlined in (6) are applied to the anthracnose picture shown in Figs. (6) The sign falloffs into broken sections to generate frequencies. The picture goes from space region to reproduction area after the FFT. Each point in the first figure refers to a certain repeat. When FFT is applied the picture is altered for DC section F (0, 0), represents illumination, is presented in image's midpoint. Furthermore, the white region in the intermission picture in Fig (3.6), exhibited afterward the FFT, demonstrates the extraordinary intensity of repetition. low frequency ranges are at the corner of images. Hence when two points are joined together, strong frequencies are gained at low frequencies at angle white region. common for greatest imageries. The FFT Cover 2-D FFT shown in figure. 7 can be interpreted and inverted, allowing it to be relocated devoid of behind data components. The zero-repetition portion is shifted to the area's midpoint, creating the picture more apparent to people. Furthermore, this analysis can assist us in running the High / Low Pass channel without issue. Finally, the opposite Fourier Transform was used in Fig. 7 to get the first picture deprived of little incidences.

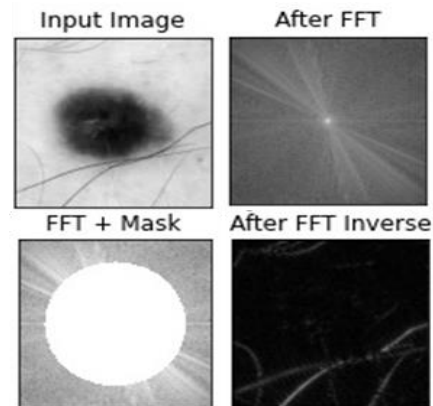


Figure. 7. Fast Fourier transform (FFT) steps

The morphological gray dilation operation is the final stage in preprocessing. The Gray image obtained in the previous step has strong and weak pixels, hence the motivation of this section is to improve the visibility of weak pixels, to fill in objects small holes, and eliminate small regions on the resulting image that are considered unimportant areas or noise, while keeping the useful areas for processing in the following steps. By adding pixels to the object bounds, an operation of dilation stretches the pixels of a copy and extends the limits of an thing. More specifically, the output pixel worth equals the greatest value of all the neighboring pixels. However, as the above discussion, the proposed system is segmented into two subsystems. One is system getting to know and second is deep mastering. Moreover, because the dataset is sorted by class there is a need for shuffling in the case of machine knowledge. Whereas, in the case of deep knowledge there is a need to riven the dataset to exercise and testing to evaluate the obtained results and then compare with the related work. The dataset is divided into two sections, the first of which contains 70% of the data used to train the proposed system. The second half, on the other hand, contains of 30%, which has been utilized for performance test of the suggested system. This segmentation was carried out in accordance with the relevant study, which they compared to our suggested model. To acquire the gray pictures in preprocessing phase, the dataset was scuffled and separated as shown underneath:

- *Shuffling dataset:* Python's "random. Shuffled" function was used to reorder the data collection. This is a request based on arbitrary number generation for computational restructuring The picture query, formerly in sequential sequence, is now intermingled entire database after application.
- *Splitting dataset:* Associated project portion is known as database; the 30 percent of the whole dataset is presented as test set and the residual data is displayed in same 70/30 form. The remaining funds are utilized to train the algorithm. Approval and preparation of sets are performed for developing algorithm, whereas test set is employed afterward classifier makes predictions.

5. Implementation And Results

There are several types of disease could affect the skin, the most common and dangers one is the cancer. Therefore, an early and accurate skin cancer Detection and diagnosis system is required. Subsequently, in this section, a set of experiments are conducted to test the hypothesis and determine if it is efficient to detect and diagnose the Skin cancer disease.

5.1 Implementation environment

- Implementation environment is explained which is separated into two parts: hardware and software implementation as shown below.
- Software: Python and Windows 10 were used in this study. Python also has a plethora of libraries, classes, and functions at its disposal. However, because it completely supported the planned system environment, this study primarily employed the Graphic User Interface (GUI) library to develop simulation. In addition, python supports standard image processing tasks like as picture display, simple manipulations such as cropping, rotating, flipping, and so on, copy division, and attributes removals, copy restoration, and copy recognition. Python is an excellent tool for copy dispensation workloads. Python is gaining admiration as a

technical programming linguistic, as well as the unrestricted accessibility of numerous cutting-edge copy dispensation gears in its bionetwork.

- Hardware: The imitation is run on a single laptop with an Intel (R) Core (TM) i7-5500U CPU running at 2.40GHz and 16 GB of RAM.

5.2 Performance of the proposed system

The performance of the proposed system is analyzed by dividing it into two subsystems, which utilize the different classification algorithms and follow same steps of preprocessing dataset. the first system shows skin cancer diagnosis through machine learning Random Forest, and naïve Bayesian algorithms. The second subsystem provides skin cancer illness analysis founded on deep knowledge utilizing a DCNN. Finally, based on accuracy measures, the acquired findings for both systems were compared to determine the optimal performance of each subsystem in diagnosing skin cancer illness. As a result, the outcomes of the proposed system each stage are depicted in the subsections below.

5.2.1 The results of preprocessing stage

The proposed system's initial stage is to import images from the ISIC dataset. Furthermore, as seen in the table, the dataset has two distinct classifications (1).

Table 1. Skin cancer Dataset Classes

#	Class	Label
1	Malignant	C1
2	Benign	C2

Furthermore, because the dataset is so large, five picture samples were chosen for each class. Figure 8 depicted the picture examples for all lesson along with their histograms. The histogram is crucial in this case to display the pixel distribution in the original picture so that the influence of the processes conducted on the images of every class can be determined by relating the outcomes of each operation to fundamental histogram In. Moreover, the sample of inputted images for two classes is shown in figure. 8, the Benign represents C1 and Malignant represents C2.

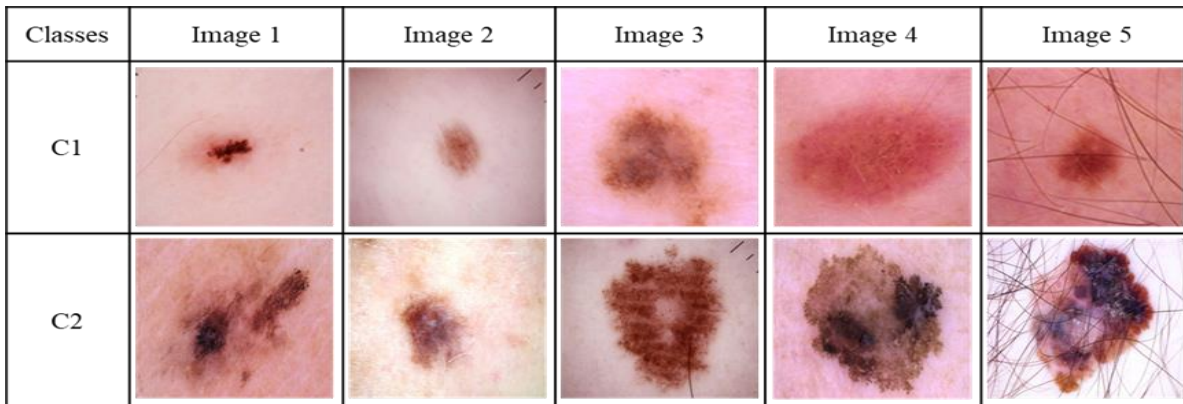


Figure. 8. Sample of Benign and Malignant Cells Images.

However, several steps have been done in the preprocessing stage to eradicate the noise and to notice the area of attention (ROI). Also, to make the image readable by the applied algorithms. Whereas, the output of preprocessing stage is illustrated in the bellow figure. 9a and 9b.

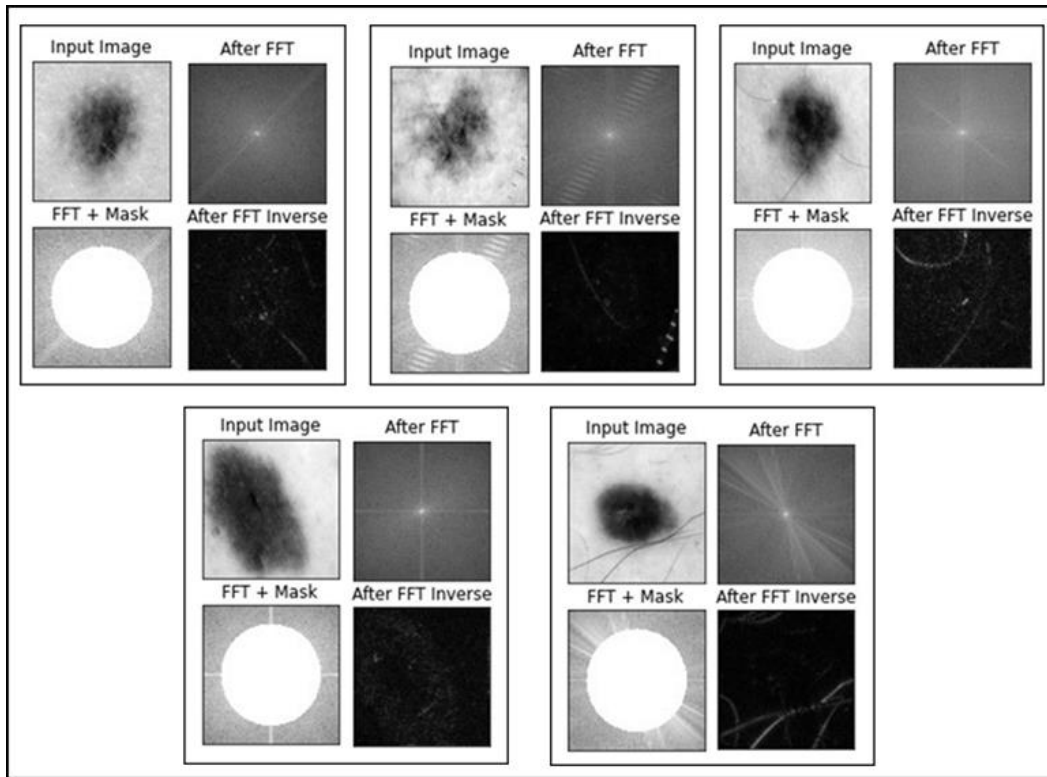


Figure. 9a. The output of Class 1 in preprocessing stage.

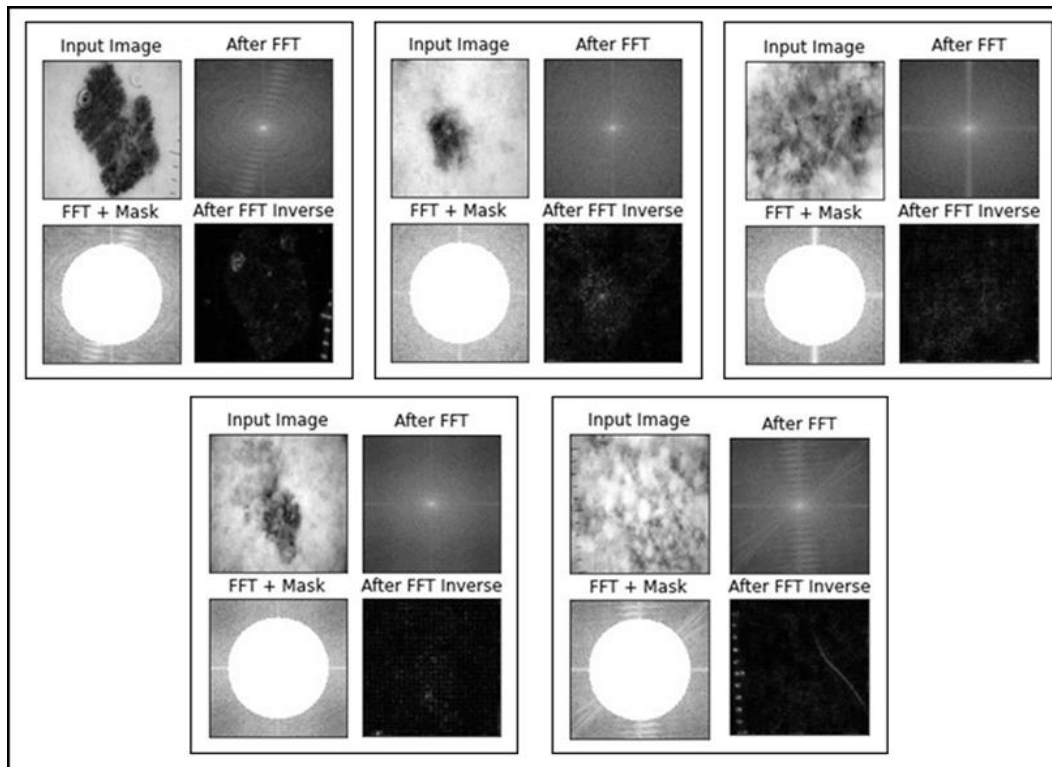


Figure. 9b. The output of Class 2 in preprocessing stage.

5.2.2 The results of classification stage

In this sup unit, the consequences of the future system in classification stage for both of machine and deep learning have been presented as the following:

- *Machine learning algorithms*

The system is divided to two steps characteristic extraction the use of PCA algorithm and use the RF, and NB for classification. The first subsystem is the classification stage first subsystem is, which is built on a machine machine-learning algorithm and employs two of the most prevalent algorithms, Random Forest (RF), and Nave Bayesian (NB). The PCA algorithm is employed to extract the features at the first stage of classification as discussed above. However, the values the mean vectors for two classes of skin cancer images is shown in figure. 10.

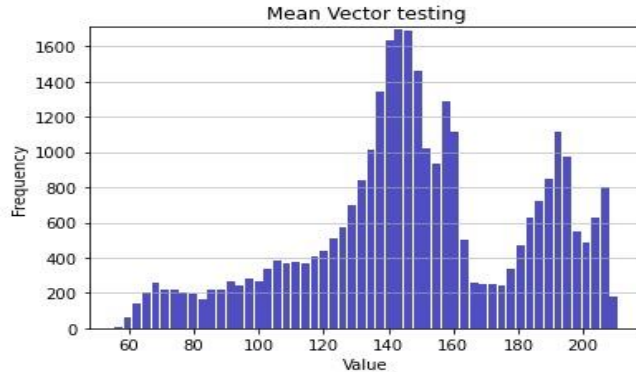


Figure. 10. The mean vectors of skin cancer images for two classes.

Moreover, the results of applied algorithms were calculated according to the confusion matrix. Subsequently, the Naïve Bayesian achieved a satisfactory result in Skin cancer detection with accuracy of 96% tested with amount images of 660. Whereas, the Random Forest have been attained an correctness of 97% with the same amount of testing images.

- *Deep learning algorithm*

The suggested DCNN system is the second subsystem, and it is classified based on a deep learning method that employs a CNN algorithm. After dividing the dataset in to training, testing, and validation, with 200 epochs and the CNN algorithm runs for every epoch 230 times. The epoch step results are training in seconds, training accuracy, validation accuracy, validation loss, and training loss. The validation and training histograms are depicted in figure.11 a, b shown histogram of training and validation accuracy. However, based on the results, Deep CNN produced the greatest results with an accuracy of 99.5 percent when compared to the two machine learning algorithms and the associated work.

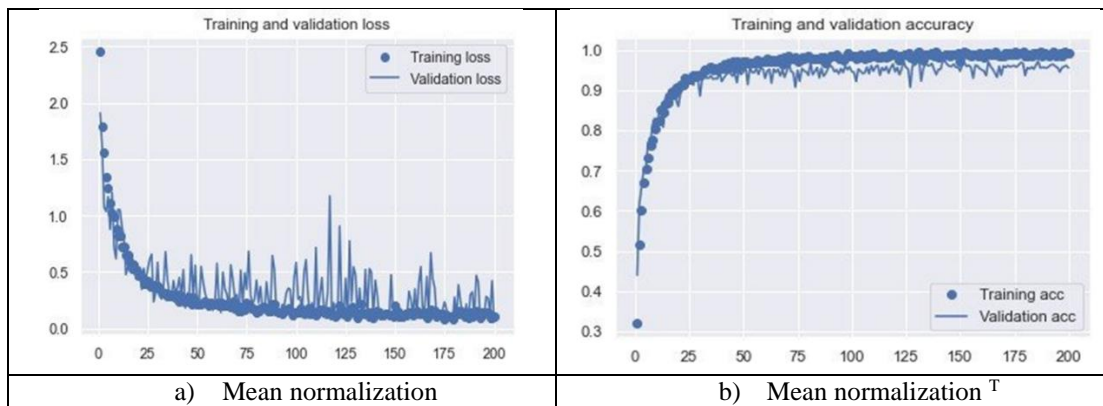


Figure. 11. Histogram of training and validation Accuracy.

6. Analysis And Discussion

Skin cancer detection has long been a hot topic since it is exposed to the outside environment and is very susceptible to illness. Normally, precise and quick illness detection plays an essential role in managing skin cancer disease, because helpful protective measures are frequently undertaken following proper diagnosis. To identify and diagnose skin cancer disorders, several strategies have been proposed, developed, and deployed. The majority of these are incapable of detecting and diagnosing planets' diseases with high precision. This study suggested, implemented, assessed, and compared an autonomous method for detecting and diagnosing early skin cancer disorders. Deep Conventional Neural Network is used to power the system. However, the results demonstrated that the suggested approach is effective for detecting and diagnosing early skin cancer disorders. The majority of approaches in the literature indicate classification accuracies ranging from 50% to 90%. When additional cases of skin cancer are added, such approaches may not perform as well.

Furthermore, as discussed in the preceding chapters, two aspects had been proposed first one is improving detection and accuracy by enhanced DCNN, second one is machine learning technique and its implementation, testing, evaluation and design to detect and diagnose skin cancer. These are the Naive Bayes and Random Forest algorithms. Furthermore, the ISIS dataset was utilized to test and assess the performance of both subsystems, with 70% of the data being usage for exercise and 30% for testing.

Following that, it is seen that the DCNN acquired the highest results when compared to the other feature of machine learning and the frequent work of Daghrrir et al. (Daghrrir et al., 2020), Kumar1 et al. (Kumar et al., 2020), and Boman and Volminger (Boman & Volminger, 2018). Table (2) compares the outcomes of DCNN with machine learning (Random Forest, and Naive Bayes) and related work.

Table 2. Proposed Model Results Comparison with Past Literature Work

Model	Techniques	Dataset	Accuracy%
Daghrrir et al.	CNN	ISIC	88.4%
Kumar1 et al.	ANN	HAM10000	97.4%
Boman and Volminger,	CNN	ISIC	91%
Machin learning	NB	ISIS	96%
	RF	ISIS	97%
Our proposed system	DCNN	ISIS	99.5%

7. Conclusion

Nowadays, detecting and diagnosing skin cancer disorders at an early degree is a challenging chore that women may face. Furthermore, technology performs a crucial position in the identification and diagnosis of skin cancer. In this work, the greatest common of Deep and machine learning algorithms have been employed for an early and accurate skin cancer diagnosis. Furthermore, based on the findings obtained, it is seen that the proposed system delivered the best outcomes when compared to the related work. Using the ISIS dataset, the proposed system was analyzed and tested. The suggested system can be used at a hospital, a health care facility, or anywhere else required. For future work, it is optional to test the proposed system with different dataset and different deep learning algorithms.

Reference

- Boman, J., & Volminger, A. (2018). Evaluating a deep convolutional neural network for classification of skin cancer. In.
- Bray, F., Ferlay, J., Soerjomataram, I., Siegel, R. L., Torre, L. A., & Jemal, A. (2018). Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: a cancer journal for clinicians*, 68(6), 394-424 .
- Brekhna, B., Mahmood, A., Zhou, Y., & Zhang, C. (2017). Robustness analysis of superpixel algorithms to image blur, additive Gaussian noise, and impulse noise. *Journal of Electronic Imaging*, 26(6), 061604 .
- Daghrrir, J., Tlig, L., Bouchouicha, M., & Sayadi, M. (2020). *Melanoma skin cancer detection using deep learning and classical machine learning techniques: A hybrid approach* .Paper presented at the 2020 5th international conference on advanced technologies for signal and image processing (ATSIP).
- Dorj, U.-O., Lee, K.-K., Choi, J.-Y., & Lee, M. (2018). The skin cancer classification using deep convolutional neural network. *Multimedia Tools and Applications*, 77(8), 9909-9924 .
- Gedraite, E. S., & Hadad, M. (2011). *Investigation on the effect of a Gaussian Blur in image filtering and segmentation*. Paper presented at the Proceedings ELMAR-2011.
- Grigoryan, A. M., & Aghaian, S. S. (2020). New look on quantum representation of images: Fourier transform representation. *Quantum Information Processing*, 19(5), 1-26 .
- Kadampur, M. A., & Al Riyaaee, S. (2020). Skin cancer detection: Applying a deep learning based model driven architecture in the cloud for classifying dermal cell images. *Informatics in Medicine Unlocked*, 18, 100282 .
- Krive, J., Patel, M., Gehm, L., Mackey, M., Kulstad, E., Lussier, Y. A., & Boyd, A. D. (2015). The complexity and challenges of the international classification of diseases, ninth revision, clinical modification to international classification of diseases, 10th revision, clinical modification transition in eds. *The American journal of emergency medicine*, 33(5), 713-718 .
- Ku, J., Harakeh, A., & Waslander, S. L. (2018). *In defense of classical image processing: Fast depth completion on the cpu*. Paper presented at the 2018 15th Conference on Computer and Robot Vision (CRV).
- Kumar, M., Alshehri, M., AlGhamdi, R., Sharma, P., & Deep, V. (2020). A de-ann inspired skin cancer detection approach using fuzzy c-means clustering. *Mobile Networks and Applications*, 25(4), 1319-1329 .

- Lewis, D. D. (1998). *Naive (Bayes) at forty: The independence assumption in information retrieval*. Paper presented at the European conference on machine learning.
- Mahesh, B. (2020). Machine learning algorithms-a review. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. [Internet], 9, 381-386 .
- Munir, K., Elahi, H., Ayub, A., Frezza, F., & Rizzi, A. (2019). Cancer diagnosis using deep learning :a bibliographic review. *Cancers*, 11(9), 1235 .
- Nahata, H., & Singh, S. P. (2020). Deep learning solutions for skin cancer detection and diagnosis. In *Machine Learning with Health Care Perspective* (pp. 159-182): Springer.
- Pacheco, A. G., Ali, A.-R., & Trappenberg, T. (2019). Skin cancer detection based on deep learning and entropy to detect outlier samples. *arXiv preprint arXiv:1909.04525* .
- Pranckevičius, T., & Marcinkevičius, V. (2017). Comparison of naive bayes, random forest, decision tree, support vector machines, and logistic regression classifiers for text reviews classification. *Baltic Journal of Modern Computing*, 5(2), 221 .
- Rey-Barroso, L., Peña-Gutiérrez, S., Yáñez, C., Burgos-Fernández, F. J., Vilaseca, M., & Royo, S. (2021). Optical Technologies for the Improvement of Skin Cancer Diagnosis: A Review. *Sensors*, 21(1), 252 .
- Salvi, M., Acharya, U. R., Molinari, F., & Meiburger, K. M. (2021). The impact of pre-and post-image processing techniques on deep learning frameworks: A comprehensive review for digital pathology image analysis. *Computers in Biology and Medicine*, 128, 104129 .
- Speiser, J. L., Miller, M. E., Tooze, J., & Ip, E. (2019). A comparison of random forest variable selection methods for classification prediction modeling. *Expert systems with applications*, 134, 93-101 .
- Wang, A., Zhang, W., & Wei, X. (2019). A review on weed detection using ground-based machine vision and image processing techniques. *Computers and electronics in agriculture*, 158, 226-240 .
- Yang, Y.-G., Zou, L., Zhou, Y.-H., & Shi, W.-M. (2020). Visually meaningful encryption for color images by using Qi hyper-chaotic system and singular value decomposition in YCbCr color space. *Optik*, 213, 164422 .
- Zhang, L., Gao, H. J., Zhang, J., & Badami, B. (2019). Optimization of the convolutional neural networks for automatic detection of skin cancer. *Open Medicine*, 15(1), 27-37 .
- Zhang, N., Cai, Y.-X., Wang, Y.-Y., Tian, Y.-T., Wang, X.-L., & Badami, B. (2020). Skin cancer diagnosis based on optimized convolutional neural network. *Artificial intelligence in medicine*, 102, 101756 .



A New Warning Sphere Design with Side Emitting Optical Fiber Technology on Transmission Lines

Mehmet Güçyetmez¹ , Şekip Esat Hayber² 

¹Department of Electrical-Electronic Engineering, Sivas University of Science and Technology, 58100, Sivas, TURKEY

²Department of Electrical-Electronic Engineering, Bursa Uludağ University, 16059, Nilüfer, Bursa, TURKEY

Başvuru/Received: 13/05/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Abstract

Conventional warning spheres (WSs) on high voltage lines cannot be detected adequately by air or military vehicles in the dark, foggy, closed, or misty weather and environments. This situation causes accidents from time to time. In recent years, fiber optic lighting has become very common, and side-emitting optical fibers (SEOFs), which is a type of fiber optic, have also increased. In this study, conventional high voltage WSs were illuminated using SEOFs with voltage generation based on Ampere's circuital law. The developed system can be mounted on the WSs currently in use, and it also prevents the existing spheres from falling into an idle state, thus not causing economic losses. The system in the study was compared with another warning lamp, which is not based on fiber optic but has similar voltage acquisition, and it was found to be 81% more economical. Since it is fiber optic-based, it is not affected by disturbances such as corrosion and magnetic field. At the same time, the developed WS structure is domestic, and this is another very crucial feature of this system.

Key Words

"High voltage lines, Warning spheres, Side-emitting optical fibers, Fiber optic lighting, Ampere's circuital law"

1. Introduction

The interconnected system consists of three main parts: electricity generation, transmission, and distribution. Electric transmission plays a crucial role in this system with many transmission elements such as poles, transformers, breakers, separators, surge arresters, and transmission lines up to thousands of kilometers in length. In addition to issues such as corona, ice load, and voltage drops in electrical transmission lines, the safety of the lines has become extremely important because it causes both loss of life and economic losses.

A warning sphere (WS) or warning ball is equipment made of aluminum and polyethylene with a diameter of around 60 cm, mostly in red-white or orange-white colors (Gündüz, 2017). Efforts to spread the WSs on the lines continue around the world, so there is a need for a large number of WSs. In one study, it was stated that 3000 new WSs were needed only in the Minas Gerais state of Brazil (Campos et al., 2017). Therefore, WS assembly robots were designed (Campos, et al., 2017; Ruaux, 1995).

The primary purpose of the WSs is to enable vehicles such as low-flying aircraft and helicopters near the transmission line to detect these lines. However, especially in foggy, cloudy weather and at night, the perception of these spheres becomes difficult, resulting in severe aircraft or helicopter crashes. There are different national laws in different countries regarding the use of WSs. In our country, the criteria for the use of WSs were determined in the Electric Power Current Installations Regulation on February 8, 2007 (Resmi Gazete, 2007). Accordingly, it has been made mandatory to use bi-colored (white and orange) WSs every 120 m on lines with a height exceeding 30 m (Resmi Gazete, 2007). However, despite this, a military helicopter crashed into the Uludere-Beytüşşebap high-voltage line in 2017, resulting in the death of 13 soldiers (Habertürk, 2017). In addition, such events continued to occur in the following years (Gazetevatan, 2006). Experienced events show that the visibility of the WSs is not sufficient despite all the precautions taken. For this reason, this problem in transmission lines is tried to be resolved through periodic tenders (Yatırımlar, 2020).

WSs are located in an area of transmission lines that have difficulty accessing and mounting due to their height from the ground and in an environment where current flows due to high voltage and strong electromagnetic fields exist. For this reason, the illumination of these line elements with traditional methods is a complicated method and may cause other problems such as short circuits in the transmission line.

A fiber optic lighting system (FOLS) is the transmission of a light source based on the principle of transporting it over a path that will guide the light. The first studies in this area were started by John Tyndall, an Irish physicist, in 1870 (Tyndall, 1870). The original fiber was first produced for voice communication in the early 1970s, and the first commercial optical fiber telephone system was commissioned in 1983 (Li, 1983). While the applications of fiber optic principles in the field of communication are rapidly becoming widespread, on the other hand, fiberoptic lighting applications have started to be applied in many different areas. Examples of these areas are display and exhibit, water lighting, architectural lighting, ambient lighting, side-emitting optical fibers (SEOFs) applications, signage and visual guidance, tunnel and highway lighting, vehicle and automotive lighting, and decorative lighting (Sikkens and Ansems, 1993). Especially building lighting is among the detailed studies (Ghisi, 2002).

There is no study in the literature about the illumination of WSs to increase their visibility. Although the WS was not directly illuminated (Eldar, 2013), an attempt was made to create a warning system with LEDs using the magnetic field on the line. However, no information was given about the visibility of the system, and it was not specified how the LEDs could work in outdoor conditions such as rain and humidity over time. This study (Eldar, 2013) is presented as a concept study.

Although some warning lamps have been developed commercially (Delta Box, 2021), the main problems with these lamps are:

- Their visibility is low due to their size and shape,
- Low availability due to costs,
- Essentially, they will leave the existing warning spheres on the current transmission lines inactive.

For all these reasons, it does not seem possible for these lamps to become widespread in a short time. Considering that there are approximately 100 thousand WSs in our 67,600 kilometers of energy transmission lines throughout our country as of 2021, but there is a need for 180 thousand more WSs, the replacement of existing warning spheres with these warning lamps will cause severe economic losses (Kamu İktisadi Teşebbüsleri Komisyonu, 2021).

In this study, FOLS has been developed for the WSs already mounted on the transmission line, and a cost comparison with other alternative devices has also been made. Each component of the system has been studied in detail. As a result of the study, it was determined that the recommended WS with added fiber optic lighting system (WS-FOLS) was 81% effective compared to the warning lamps. Thanks to the system we propose, which is created by modifying the existing WSs, it is ensured that the WSs that will become inactive are brought back into the economy.

2. Materials and Methods

2.1. Ampere's circuital law

In Fig. 1, total current I flows through the area enclosed by the C path of radius r . The direction of current flow and the direction of rotation of the C path is determined according to the right-hand rule. Eq. (1) shows Ampere's circuital law. Accordingly, the magnetic flux density \vec{B} expresses that its circulation on any closed path is equal to the product of magnetic permeability (μ), with the total current flowing through the surface bounded by this path.

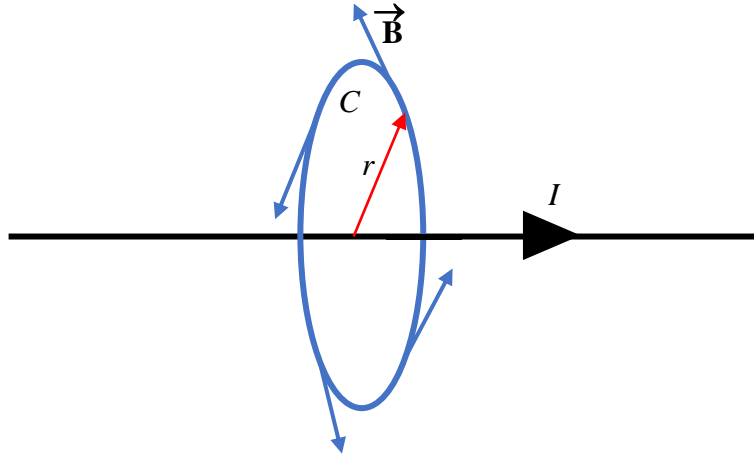


Figure 1. Ampere's circuital law.

In Eq. (1) $d\vec{l}$ line element becomes $d\vec{l} = \hat{\phi}r d\phi$ in cylindrical coordinates. At the same time, depending on the current flow direction, $\vec{B} = \hat{\phi}B_{\phi}$.

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu I \quad (1)$$

As $d\vec{l}$ and \vec{B} substituted in Eq. (1),

$$\oint_C \hat{\phi}B_{\phi} \cdot \hat{\phi}r d\phi = B_{\phi}2\pi r = \mu I \quad (2)$$

The magnetic flux density around the wire due to the current flowing through the wire is obtained as in Eq (3) (Liu et al., 2018),

$$B_{\phi} = \frac{\mu I}{2\pi r} \text{ (Wb/m}^2\text{, T)} \quad (3)$$

where μ is written as magnetic permeability $\mu = \mu_0\mu_r$. Magnetic permeability consists of two components: the magnetic permeability of the cavity, μ_0 ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m), and the relative magnetic conductivity coefficient of the material used in the core, μ_r .

If it is considered that a toroid is placed around the conductor, as in Fig. (2), the magnetic flux that will occur inside the toroid can be given by Eq. (4).

$$\Phi = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \text{ (Wb, T} \cdot \text{m}^2\text{)} \quad (4)$$

According to the cylindrical coordinate system, the solution of Eq. (4) is as in Eq. (5).

$$\Phi = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_S \left(\hat{\phi} \frac{\mu I}{2\pi r} \right) \cdot (\hat{\phi} dr dz) = \frac{\mu I h}{2\pi} \int_a^b \frac{dr}{r} = \frac{\mu I h}{2\pi} \ln(b/a) \quad (5)$$

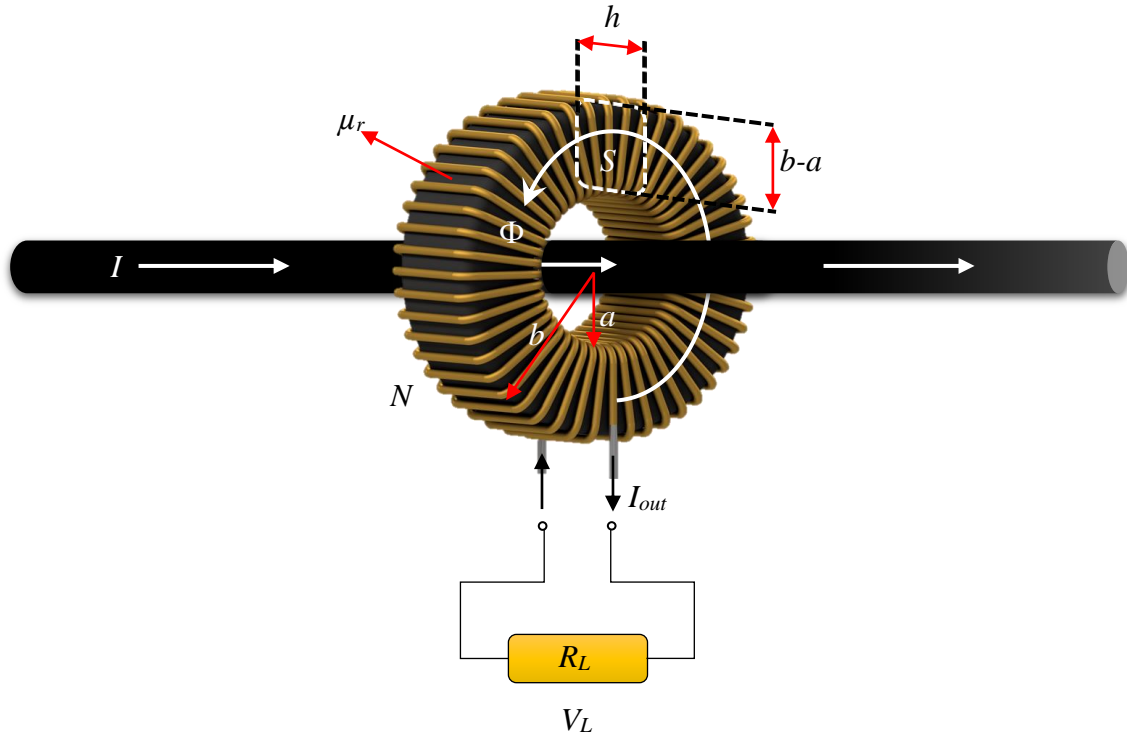


Figure 2. Placing the toroid around the conductor.

The current flowing through the conductor can be expressed as $I = I_m \sin(\omega t)$. From the Faraday's law of induction, the voltage drop on the load to be connected to the output of the toroid can be calculated as in Eq. (6)

$$V_L = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{\mu h}{2\pi} \ln(b/a) \omega I_m \cos(\omega t) \quad (6)$$

2.2. Warning sphere with added fiber optic lighting system (WS-FOLS)

When the development process of fiber optic technology is examined, the first thing that comes to mind is using these structures for communication purposes (Azadeh, 2009). Parallel to the development of optoelectronic systems, they have found an undeniable field of activity in the field of detection, thanks to their superior features such as not being affected by electromagnetic interferences, being light in weight, and enabling almost lossless data transmission (Zuckerwar, 2003). In addition, these structures have started to show themselves in different lighting applications. SEOFs have been used in many different areas, from lighting works of art to medical electronics and security systems, and have been developed (Spigulis, 2005).

The WS-FOLS handles the processes from obtaining the voltage from the current in the high voltage lines and then lighting the SEOF. A schematic representation of that WS-FOLS is given in Fig. 3(a). A classical WS knitted using SEOF is shown in Fig. 3. The typical diameter of WS is 63 cm. As seen in Fig. 3, SEOFs with different step lengths can be fixed on the WS structure. In this study, 20 SEOF fragments were placed in the center of the WS with approximately 20 cm step length. The length of each SEOF piece is 50 cm. Accordingly, the SEOF length used per WS is approximately 10 m with inward turns. The aim of integrating SEOFs into WS is minimum length value but high visibility and perceptibility. Identical designs were made for the upper and lower hemispheres under the standard opening directions of the WSs (Fig. 3 (b)). Thus, a system has been developed that will not interfere with the routine maintenance of the WS.

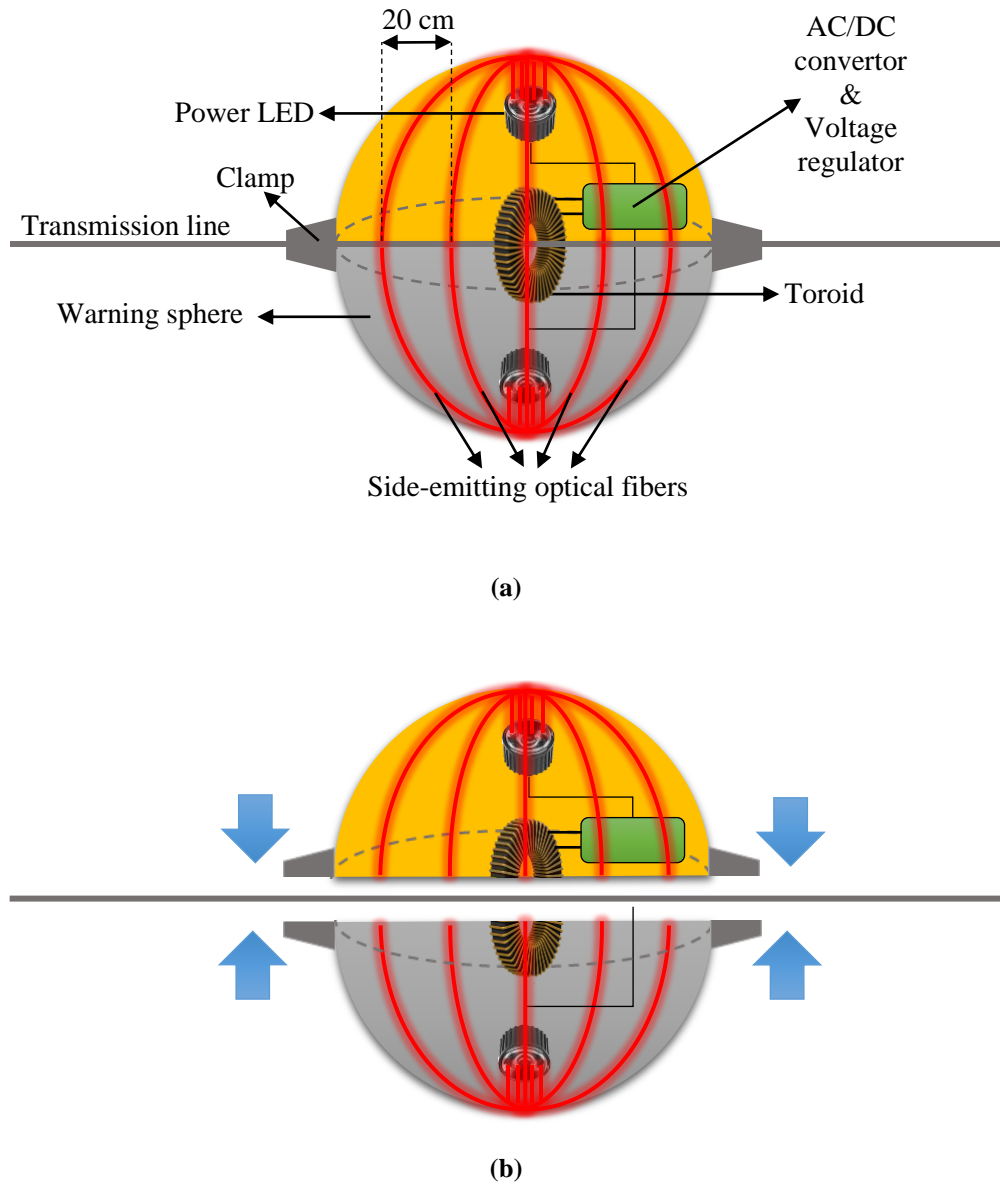


Figure 3. (a) WS-FOLS, (b) Opening demonstration of WS-FOLS.

WS-FOLS generally consists of 6 components. These are shown in Fig.4. The first component is the 154 kV high voltage overhead line conductor. Typically, a current of $I = 100\sqrt{2} \sin(2\pi \times 50 \times t)$ flows through this conductor. The geometric dimensions of the toroid forming the second component are $h=19 \times 10^{-3}$ m, $b=49 \times 10^{-3}$ m, and $a=31.8 \times 10^{-3}$ m. The toroid material is CF197, and the relative permeability value of this material is $\mu_r=7000 \pm 20\%$. It is known that the network frequency value is 50 Hz. Considering these values, the output voltage for a toroid of 50 turns is obtained as $V_L = 25 \cos(2\pi \times 50 \times t)$ using Eq. (6). Voltage drops are inevitable on transmission lines. In addition, changes in μ_r can be observed depending on the temperature. As a result, the toroid output is not stable due to voltage drops in the transmission line and changes in μ_r . For this reason, the fluctuation in voltage may vary between ± 5 V. The third component is the AC/DC converter, which converts the AC voltage at the toroid output to DC voltage. Depending on the fluctuations in the input voltage, changes in the DC value at the output may also be observed. The fourth component is a DC regulator circuit that regulates these DC surges. Regulator circuit output is constant at 12 V. The fifth component is a high-power LED Chip on Board 3W Green. A total of 20 power LEDs, 10 each, were used in each LED driver circuit in the upper and lower hemispheres. An LED illuminates each SEOF part described above. The last component of the system is the SEOF parts. The LEDs in the driver circuits are coupled to the SEOFs with specially designed stabilizers. SEOF parts are fixed to the WS surface with mini clamps.

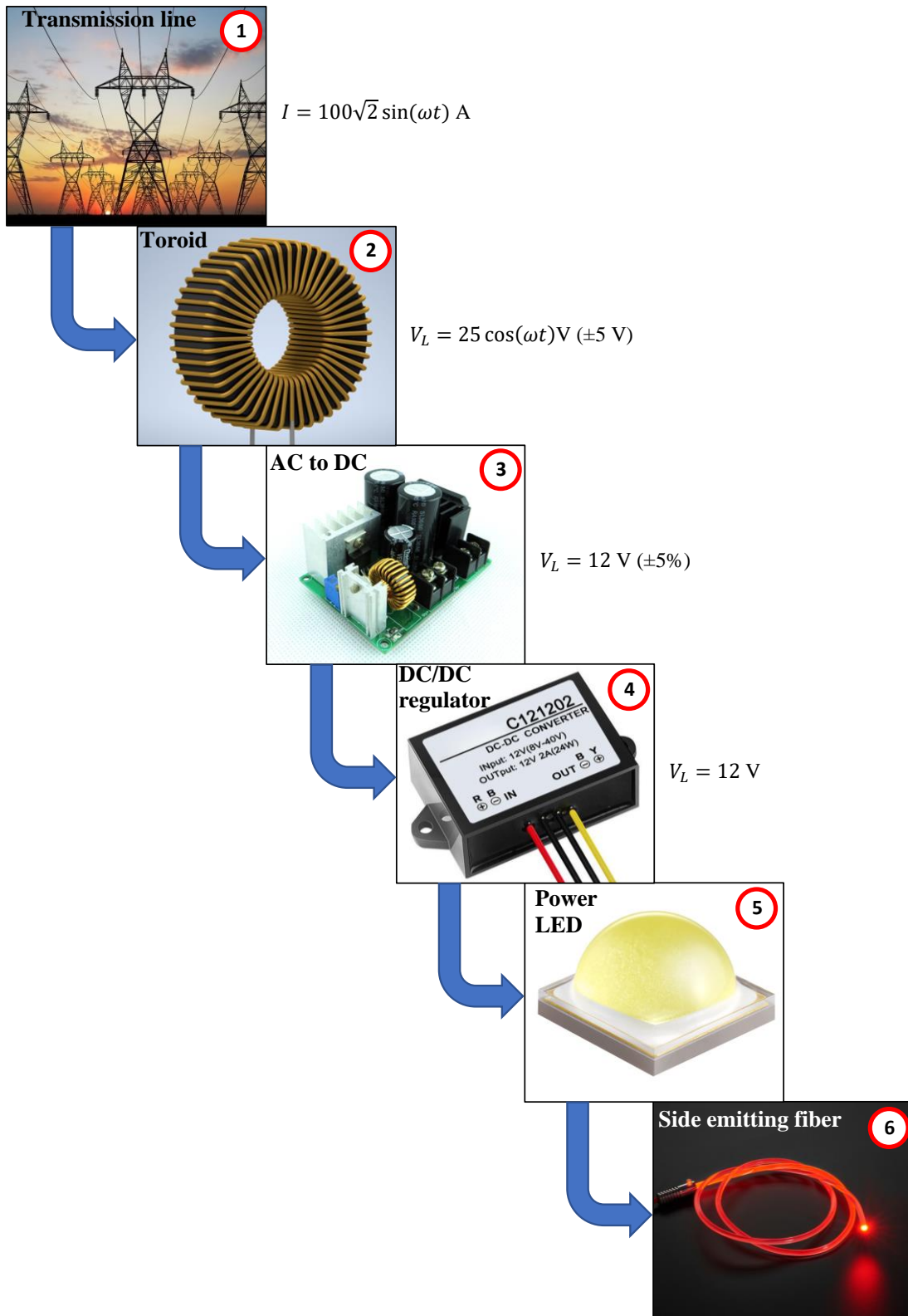


Figure 4. Components of WS-FOLS.

A schematic representation of WS-FOLS formed after production is given in Fig. 5(a). In addition, the control circuit that enables WS-FOLS to activate in the dark is integrated into the system. Fig. 5 (b) consists of a photocell driver circuit that detects light intensity in the environment and activates the system on cloudy days and at night. Thus, the service life is increased since the WS-FOLS is deactivated in bright weather with high visibility.

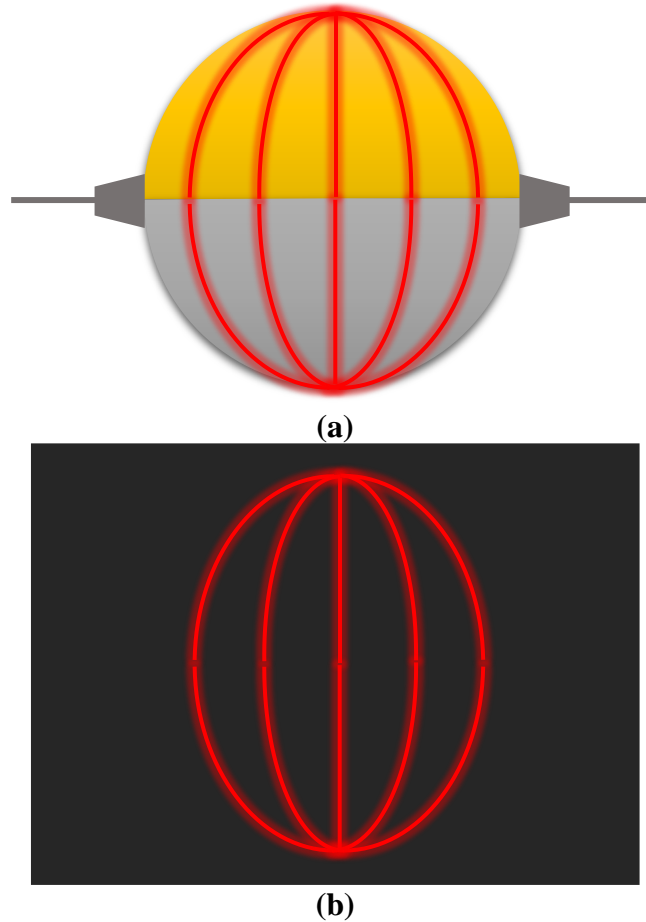


Figure 5. (a) WS-FOLS, (b) The night mode of WS-FOLS.

3. Results and Discussion

The cost of the developed WS-FOLS is given in Table 1. LED warning light for toroid-based high voltage lines, based on the same production method given in [13], costs 880 EUR. Luminous intensity is the most important parameter of this and similar warning systems. There are two types of products in the market, type A and Type B. Of these, the maximum lumen value for Type A at the most suitable angle is 125 lm, and for Type B, this value is 400 lm. These values may be lower depending on the point of view. However, since the developed WS-FOLS has spherical symmetry, the luminous intensity at every viewing angle is equal. Moreover, the light intensity of the system at each point is 600 lm. In a study conducted with a similar method, only the method was explained, and concepts such as light intensity and usability in high voltage lines were not examined (Eldar, 2013).

Table 1. WS-FOLS costs per sphere.

System Components	Component Cost (EUR)
Toroid	1.88
Toroid wire (1mm 50 m)	9.99
AC/DC converter (×2)	41.57
DC/DC regulator (×2)	39.84
Power LED (20 pieces)	13.28
SEF (diameter 2.5 mm length 10 m)	7.97
LED driver circuit (2 pieces)	15.48
Toroid enclosure	8.42
WS	18.54
Other system components	4.83
TOTAL	161.8

Thus, it has been calculated that the developed WS-FOLS can be easily mounted on existing WSs and is 81% cost-effective compared to other LED warning lights.

4. Conclusions

In this article, a warning sphere with added fiber optic lighting system (WS-FOLS) has been proposed and developed in order to ensure the visibility of high voltage transmission lines in the dark. Detailed analyses of all envisaged system components were made, and product performance and cost studies were also carried out. Thus, it is both high-performance and cost-effective compared to its equivalents. In addition, warning spheres (WSs) already in the transmission line are used in the study to impose no additional cost on the electrical system provider. The advantage of the infinite symmetry of the WSs in the system contributed to the visibility of this study, and it was ensured that the aircraft saw an equal light intensity from every point of view. Thus, the blind spot problem is also eliminated.

Acknowledgment

This work was supported by Kırşehir Ahi Evran University Scientific Research Projects Coordination Unit. Project Number: MMF.A4.22.009.

References

- Azadeh, M. (2009). Fiber optic communications: A review. *Fiber Optics Engineering*, 1-27.
- Campos, M. F., Pereira, G. A., Vale, S. R., Bracarense, A. Q., Pinheiro, G. A., & Oliveira, M. P. (2002). A mobile manipulator for installation and removal of aircraft warning spheres on aerial power transmission lines. In *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cat. No. 02CH37292, 4, 3559-3564. doi: 10.1109/ROBOT.2002.1014261
- Delta Box. (2021). Retrieved from: https://www.delta-box.com/wp-content/uploads/2021/12/DeltaBox_Catalogue_UK_2021.pdf
- Eldar, M. (2013). Led Tabanlı Yüksek Gerilim Hatları İkaz Sistemi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 18(1), 1-10.
- Gazetevatan, (2006). Gündem haberleri: Retrieved from <https://www.gazetevatan.com/gundem/5-yildiz-kaydi-73590>
- Ghisi, E. (2002). The use of fibre optics on energy efficient lighting in buildings (Doctoral dissertation, University of Leeds (School of Civil Engineering)).
- Gündüz, H. A., & Yapıcı, K. (2017) Uçuş Güvenliği ve İkaz Küreleri. EMO İzmir Şubesi Yayınları, 33
- Habertürk. (2017). Gündem: Retrieved from <https://www.haberturk.com/gundem/haber/1515006-sirnakta-tskya-ait-helikopter-dustu-valilik-aciklama-yapti>
- Kamu İktisadi Teşebbüsleri Komisyonu. (2021). Retrieved from: <https://www.tbmm.gov.tr/Milletvekilleri/UyeKomisyonKonusmaTutanakDetay?tutanakId=40874>
- Li, T. (1983). Advances in optical fiber communications: An historical perspective. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1(3), 356-372.
- Liu, L., Ding, C., Lu, S., Ge, T., Yan, Y., Mei, Y., ... & Lu, G. Q. (2018). Design and additive manufacturing of multipermeability magnetic cores. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(4), 3541-3547.
- Resmi Gazete. (2007). Eskiler: Retrieved from <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/02/20070208-4.htm#:~:text=Yeni%20tesis%20edilecek%20enerji%20iletim,beyaz%20renkli%20ikaz%20k%C3%BCreleri%20tak%C4%B1%C4%B1r>
- Ruau, P. (1995). Mechanisation of the installation of aircraft warning spheres on overhead lines. In *Proceedings of ESMO'95-1995 IEEE 7th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance* (pp. 125-131). IEEE.
- Sikkens, M., & Ansems, J. P. M. (1993). Remote-source lighting: A two-part look at light guides—Part 1: Fibre-optic light guides. *International Lighting Review*, 44(3), 84-91. Lighting Research Center, <http://www.lrc.rpi.edu/programs/Futures/LFRremoteSource/index.asp>
- Spigulis, J. (2005). Side-emitting fibers brighten our world. *Optics and photonics news*, 16(10), 34-39.
- Tyndall, J. (1870). On Haze and Dust . *Nature* 1, 339–342. doi: <https://doi.org/10.1038/001339a0>
- Yatırımlar. (2020). İş dünyası: Retrieved from https://www.yatirimlar.com/haber-TEIASIsikli_Ikaz_Kuresi_icin_Ihale_Acti-301233.htm
- Zuckerwar, A. J. (2003). Acoustical Measurement. *Encyclopedia of Physical Science and Technology* (Third Edition), Academic Press, <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00008-9>



Su Altı Araçlarında Servo Motor Kontrolünün PSO ile Optimizasyonu

Optimization of Servo Motor Control in Underwater Vehicles with PSO

Zahide Nur Yılmaz¹, Nuri Alper Metin², Murat Lüy³

¹ Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, TÜRKİYE

² Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Kadirli Meslek Yüksekokulu, Osmaniye, TÜRKİYE

³ Kırıkkale Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 02/03/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

İnsansız yüzeysel araçları (USV) günümüzde, otonom veya yarı otonom robotlar olarak tasarlanmış ve teknolojik unsurlara donatılmış birer su altı robotu şeklinde tanımlanmaktadır. Bu çok yönlü akıllı araçlarda algılama, karar verme ve hareket kabiliyetini kurma becerisi mevcut haldedir. Teknolojik donatılarla güçlendirilmiş USV'ler; deniz yüzeyi ve dip tarama, haritalama, sualtında boru hattı döşemelerini gerçekleştirme, bilimsel araştırmalar ve askeri görevlerde kullanılmaktadırlar. Bununla birlikte, insanlı olarak bilinen denizaltı araçlarına yakıt taşıma veya akü ihtiyaçlarını giderme gibi görevleri de üstlenmektedirler. Bu çalışmada USV yapısının servo motor hız kontrolü PID denetleyici ile MATLAB/ Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. PID denetleyici katsayıları birincil olarak Ziegler Nichols ile hesaplanmıştır. İkincil olarak Parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ile optimize edilmiştir. Sistemde bu yöntemle göre referans hız değerine yaklaşımı, salınımı ve kontrolü incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“İnsansız denizaltı araçları, Matematiksel Model, PID Kontrol, Parçacık Sürü Optimizasyonu”

Abstract

Today, unmanned surface vehicles (USV) are defined as underwater robots designed as autonomous or semi-autonomous robots and equipped with technological elements. These versatile smart vehicles have the ability to detect, make decisions, and set up mobility. USVs strengthened with technological equipment; They are used in sea surface and dredging, mapping, underwater pipeline laying, scientific research and military missions. In addition, they also undertake tasks such as carrying fuel to submarine vehicles known as manned or meeting their battery needs. In this study, the servo motor speed control of the USV structure was carried out with a PID controller in the MATLAB / Simulink environment. PID controller coefficients were calculated primarily with Ziegler Nichols. Secondly, it is optimized with Particle swarm optimization (PSO). According to this method in the system, its approach to the reference speed value, its oscillation and control were examined.

Key Words

“Underwater vehicle, Vehicles, Mathematical model, PID Control, Particle Swarm Optimization”

1. Giriş

Su altı aracı kontrol sisteminin yürütme organı olan servo motor, su altı aracı yelken duruşunu kontrol etmek için direksiyon torku sağlamaktadır. Servo motor, direksiyon milini gereksinimlerine göre döndürmek, dümen sapmasını ayarlamak ve su altı aracının sabit durum kontrolünü tamamlamak için bir kontrol bilgisayarından çıkış direksiyon komutlarını almaktadır (Xu (2001)).

Geleneksel Doğru Akım (DC) motoru iyi hız performansına sahipken, motorun bir komütatöre, fırçalara ve diğer mekanik temas elemanına sahip olması nedeniyle, çalışma sırasında kolayca kıvılcım çıkarabilir ve zayıf güvenilirlik sağlar. Motorun hızı ve çıkış gücü aynı zamanda sınırlıdır. Bununla birlikte, sabit mıknaatıslı, fırçasız DC motor uygulamaları, komütasyon kıvılcımının neden olduğu elektromanyetik parazitini yanı sıra komütatör ve fırçanın olmaması nedeniyle sürtünme torkunu ortadan kaldıran ve motorların bakım maliyetini düşüren problemleri çözmektedir. Ek olarak, fırçasız DC motor, hafif, küçük hacimli, yüksek verimlilik, yüksek tork / ağırlık oranı, yüksek dönen atalet ve yüksek güç faktörü avantajlarına sahiptir. Aynı zamanda yüksek hız, büyük tork ve yüksek güçlü motor haline getirilebilmektedir (Lui vd. (2008)).

Günümüzde İnsansız Yüzey Araçları (USV), otonom veya yarı otonom robotlar olarak tasarlanmış ve teknolojik unsurlarla donatılmış birer su altı robotu şeklinde tanımlanmaktadır. Bu çok yönlü akıllı araçlarda algılama, karar verme ve hareket kabiliyetini kurma becerisi mevcut haldedir (Zhou (1990)). Teknolojik donatılarla güçlendirilmiş İDA'lar; deniz yüzeyi ve dip tarama, haritalama, sualtında boru hattı döşemelerini gerçekleştirme, bilimsel araştırmalar ve askeri görevlerde kullanılmaktadırlar. Bununla birlikte, insanlı olarak bilinen denizaltı araçlarına yakıt taşıma veya akü ihtiyaçlarını giderme gibi görevleri de üstlenmektedirler (Jiang (2013)).

Literatürde yapılan USV çalışmaları yeni nesil denetleyici içeren yapay zekâ, bulanık mantık, kayma kipli denetleyici gibi yöntemler ile kontrol işlemi gerçekleştirilmektedir. Yenilikçi yöntemler, geleneksel yöntemlere göre çok fazla işlem yükü ve konuyla ilgili uzmanlık gerektirmektedir. Buna ilaveten kullanılan sistemlerde maliyet artışı meydana getirmektedir. Literatür çalışmaları sonuçlarına göre yenilikçi denetleyici sistemlerin sonuçları ise geleneksel sistemlerden çok daha iyi olmadığı ancak bir miktar üstünlük sağladığını ortaya koymaktadır. Önerdiğimiz yöntem de ise düşük maliyetli, basit yapıda ve geleneksel olarak iyi derecede bilinen bir kontrolcünün optimizasyon yöntemi ile geliştirilmesidir.

Bu çalışmada su altı aracının servo motor kontrol sistemi değişken yapı kontrol yöntemi ile tasarlanmıştır. Sistem kontrolü geleneksel PID denetleyici ile gerçekleştirilmiştir. Birincil olarak PID denetleyicinin Ziegler Nichols teoremiyle katsayı hesabı işlemi gerçekleştirilmiştir. İkincil olarak PID denetleyicinin katsayıları PSO algoritmasıyla optimize edilmiştir. PSO ile optimize edilen PID katsayı parametreleri Ziegler Nichols teoremine göre kararlı, düşük maliyetli ve sistem parametrelerinden etkilenmeyen bir kontrolcü tasarlayarak literatüre katkı sağlanmıştır.

1.1 Literatür taraması

Grenstedt Vd. ve arkadaşarı, gözetleme ve izleme görevlerine yönelik uygulamaları olan yüksek performanslı İnsansız Yüzey Aracı (Unmanned Surface Vehicle – USV) olan Otonom Lehigh Okyanus Araştırma Gemisi (Lehigh Ocean Research Craft Autonomous'u - LORCA) tanıtmışlardır. Kompakt (1,2 m), hafif (5 kg) ve sağlam (tek parça karbon fiber tasarım) olan LORCA, 80 km/s hıza ulaşabilmektedir. Araştırmacıların sundukları bilgilere göre; tüm deniz bölgelerinde kendi kendini düzeltme yeteneği ile okyanus dalgalarında çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. Araştırmacılar çalışmalarında, ilk olarak LORCA tasarımını ve teknik özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmacılar geliştirdikleri otonom yapının gelecekteki planlı çalışmalar için LORCA'nın güçlü yanlarını ve güçlendirilmesi gereken zayıf yanlarını değerlendirmişlerdir (Grenstedt Vd. (2015)).

Campbell ve arkadaşarı çalışmalarında, Akıllı Çarpışmadan Kaçınma Manevraları ile İnsansız Yüzey Araçlarının Özerkliğinin Geliştirilmesi” adlı araştırmalarında, insansız deniz araçlarının özerklik düzeyini artırmak için ortaya çıkan zorluklar, otomatik engellerden kaçınma ve diğer deniz trafiğinin varlığında seyrederken Yol Kurallarına uyma becerileri yönünden otonom deniz araçlarını değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında, ABD Deniz Kuvvetleri için oluşturulan USV Master Planı çerçevesinde, görev çeşitliliğini artırmak ve denetleyici müdahale miktarını azaltmak amacıyla özerkliği geliştirmek için ortaya konmuş olan hedefler listesini odak noktası olarak benimsemişlerdir (Campbell vd. (2012)).

Liu ve arkadaşarı, USV'nin yörünge takip problemi ele alınmış ve araştırmacılar geliştirdikleri geri adım atma algoritması ile izleme kontrolörünü tasarlamışlardır. Araştırmacıların sunduğu algoritma için sudan kuvvet olarak jet motoru ile çalışan USV'lerde serbestlik derecesi (DOF) hareketsiz manevra hareket modeli oluşturularak uygulamışlardır. Araştırmacılar geliştirdikleri algoritma ile tasarladıkları sistemde kontrolörün hem düz çizgi yörüngesini hem de eğri yörüngesini nispeten yüksek doğrulukla izleyebildiğini gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında, USV sistemi kararlılığını, sınırlı giriş-sınırlı çıkış (BIBO) özellikleri ile kanıtladıklarını ileri sürmüşler ve daha sonra kontrolörün sağlamlığı ile hassas kontrol performansını göstermek için simülasyon deneyleri yaparak ispatlamışlardır (Liu vd. (2016)).

Zhao ve arkadaşarı çalışmalarında, USV'nin güvenilirliğini ve gerçek zaman uyumunu artırmak için USV'nin sistem tasarımı ve uygulaması üzerine yöntem geliştirmişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında VxWorks gerçek zamanlı işletim sistemine göre tasarladıkları kontrol sisteminin donanım mimarisini tanıtarak, tüm parçaların işlevini netleştirmiş, USV'lerin kontrol sistemi için üç katmanlı hiyerarşik mimaride gerçek zamanlı sağlamak için iş birliği katmanı, kontrol katmanı ve işletim katmanını geliştirmeye

çalışmışlardır. Araştırmacılar tasarım sırasında yazılım mimarilerini kullanarak USV modellemesi yapmışlardır. Araştırmacılar ayrıca, gelişmiş kontrol sistemi tasarımında kullanılacak yararlı verileri elde etmek için yön kontrolü ve basit yol takip testleri gibi deneyleri de gerçekleştirmişler ve deney sonucunda gerçek zamana eş olarak başarı elde etmişlerdir (Zhao vd. (2010)).

Mu ve arkadaşları çalışmalarında, bölmeli itiş gücü USV'nin müdahale modelini oluşturarak tanımlamışlardır. Araştırmacılar, USV hızlarının yükseltilmesi için hızlı yakınsamalara ihtiyaç duyulduğunu bunun sağlanabilmesi için ise bir hız kontrolörü önermişlerdir. Araştırmacıların önerdikleri kontrolörde MMG ayrı modelleme fikrini, itme kuvveti ile USV'nin DOF düzlemsel hareket modelini oluşturmak için kullanmış bunun üzerine yapılan çalışma ile USV yanıt alma şekli model üzerinde basitleştirilmiştir. Daha sonra saha deneylerine dayanarak, yanıt modelinin parametreleri sistem tanımlama yöntemi ile elde edilmiştir. Sıradan gemilerin aksine, USV hız kabiliyeti ve küçük boyut avantajlarını da kullanarak artırılmıştır. Araştırmacılar USV'deki hız kabiliyeti artırışında kontrolörün denetimi için de hızlı yakınsama özelliğini güçlendirmek için çok seçmeli kontrol teorisine dayanarak, hızlı ve duraksamasız terminal kayma modu (FNTSM) seyir kontrolörü önermişlerdir. Sistemin hızından kaynaklanan sesi azaltmak için ise, prototip model üzerinde RBF sinir ağı ile kontrol uygulamasını göstermişlerdir. Araştırmacılar geliştirdikleri model üzerinde aynı zamanda, kademeli geçişleri yumuşak hale getirmek için bulanık algoritma kullanmışlardır. Araştırmacılar çalışmaları sonucunda uyguladıkları bulanık algoritmanın ise kademe değiştirildiğinde gereksiz enerji sarfmesini önlediğini ileri sürmüşlerdir. Son olarak, araştırmacıların önerdikleri kontrol yaklaşımının hızlılığı ve sağlamlığı simülasyon çalışmaları ile benzer ürünlerin karşılaştırmasını sunmuşlar ve güçlendirdikleri alanları karşılaştırma tablosunda göstermişlerdir (Mu vd. (2017)).

Xu ve arkadaşları , çoklu USV kooperatif ağında kullanılmayan ağılar için MEMS ve DVL algoritmalarını değerlendirmişler tüm otonom sürecinde aktif olan, bağlantı ilişkilerini kontrol edip kesme kabiliyetine sahip olan MEMS sistem hatalarının gözlemlenebilirliğini artırmayı iki alt bölüme ayırarak incelemişlerdir. Araştırmacılar bu inceleme için önce büyük yanlış hizalama açısını tahmin ederek ardından jiroskop sapmasını hesaplamışlardır. Araştırmacılar, yüksek doğruluk ve göreceli küçük hesaplamaya erişimi olan kübik katman filtre (CKF) algoritmasına dayanarak, çift model filtreleme şemasını kullanmışlardır. Araştırmacılar çalışmaları sonucunda navigasyon ve rotalama becerisinin iyileştirildiğini saptamışlardır. Araştırmacılar, yakınsama hızını etkili bir şekilde artırmak için ise otomun su yüzeyinde ileri ve geri hareket kabiliyetini gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar simülasyon analizi ve deneysel doğrulama yaparak göstermişlerdir. Simülasyon ve deneysel sonuçlardan, araştırmacıların önerdikleri algoritma ile navigasyon performansının etkili bir şekilde iyileştirebileceğini göstermişlerdir (Xu Vd. (2014)).

Alkan çalışmasında elektrik tahrikli itiş sistemlerinde oto denetleyiciler üzerine bir araştırma yapmıştır. Araştırmacı, her tür dinamik debi akış koşulunda, sistemin itme kuvveti isteğinin kabul edilebilir bir ölçüde gerçekleşmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla eksenel su hızını değerlendirebilen yeni bir geri beslemeli itici denetleyicisi tasarlamıştır. Araştırmacı, çalışması sırasında, deniz aracı pervanelerinin dört çeyreklik zaman dilimindeki akış koşullarında verdikleri açık su karakteristiklerini hesaplamıştır. Araştırmacı, daha sonra açık deniz testlerinde elde ettiği verileri boyutlarından bağımsız olarak denetleyicinin itme kuvveti modeline eklemiştir. Dört çeyrekli pervane modeli kullanılarak istenilen itme kuvveti ve ideal pervane shaft hızı arasında bir bağıntı türetmiştir. Araştırmacı çalışmasında açık su koşullarını gerçekleyebilmek için bir deney düzeneği tasarlamıştır. Araştırmacı çalışması sonucunda, önerdiği itişe dayalı sistem denetleyicisinin tüm dört çeyrek akış koşulunda kabul edilebilir sonuçlar verdiğini savunmuştur (Alkan, (2012)).

Beşer, (2018) çalışmasında; denizde can ve mal emniyetine öncelik verilerek, çoklu otonom insansız deniz araçları için kara parçası gibi sabit ve seyir halindeki gemi gibi hareketli engellerin bulunduğu ortamda rota planlanması ve engelden sakınma maksadıyla çeşitli benzetimler gerçekleştirmeyi amaçlamıştır. Araştırmacı çalışmasında, çoklu otonom insansız deniz araçlarına ilişkin benzetimler ile Türk karasuları içerisinde yer alan İstanbul'da bulunan Prens Adaları'nın çevresinde ve İstanbul Boğazı'nda gözlem yapmıştır. Araştırmacı çalışmasında yaptığı gözlemlere dayanarak, rota planlama ve engelden sakınma algoritmalarının yanında ayrıca yapay zeka teknolojileri kullanılarak insansız otonom deniz araçlarının sensörden bağımsız görsel seyrine ilişkin yöntem önermiştir. Araştırmacı ayrıca Elektronik sensörlerin arızalanması veya elektronik aksamlar ile yaratılabilecek suni karıştırmaya maruz kaldığı durumlarda, insansız deniz araçlarının içinde bulunduğu ortamdan etkilenmeden otonom seyrine devam edebilmesini sağlamak üzere European Ship Simulator isimli simülasyon ortamından elden edilen görüntüler ve gerçek gemi görüntülerini kullanarak bir simülasyon çalışması sunmuştur. Araştırmacı çalışmasında ayrıca, uluslararası denizcilik kurallarında insansız araçlarla ilgili herhangi bir hüküm bulunmaması nedeniyle çalışmasında insansız deniz araçlarının mevcut hukuk kurallarına uygun olarak tasarlanmasını önermiştir (Beşer, (2018)).

Altuntaş çalışmasında, İnsansız Deniz Aracı Teknolojileri (İDAT), patent bilgilerini kullanılarak incelemiştir. Regresyon denklemlerinden hareketle teknolojilerin ait oldukları kodu ifade eden IPC kodları arasındaki ilişkiler ortaya çıkarılmıştır. Bu analiz sonuçlarını, okuyucunun daha iyi anlamasını sağlamak amacıyla "Gephi" adlı sosyal ağ analiz yazılımı kullanılarak İDAT'nin teknoloji ağı ve IPC kodlarının stratejik teknoloji kod ağı oluşturmuştur. Araştırmacı çalışması sonucunda, İDAT'in son yıllarda gelişmekte olan bir teknoloji olduğu çalışması kapsamında savunmuştur (Altuntaş, (2017)).

Costanzi ve arkadaşları çalışmalarında; karmaşık denizcilik görevlerini hem yüzeyin üstünde hem de altında geleneksel olarak insanlı yüzey gemileri ve gelişmiş sensör sistemleriyle donatılmış denizaltılar tarafından gerçekleştirmektedir. USV'ler hızlı konuşlanmaları ve kolay ölçeklenebilmeleri sayesinde mevcut deniz yeteneklerini geliştirme potansiyellerini giderek daha fazla göstererek hem operasyonel sürede hem de maliyette azalma sağlar. Ek olarak, personeli riskten uzak ama karar verme döngüsünün içinde bırakarak personel üzerindeki riski azaltırlar. Uzun vadede, insansız sistemler, insan olan operatörler ve eski platformlar arasında net bir birlikte

çalışabilirlik çerçevesi, etkili ortak operasyon planlaması ve uygulaması için çok önemli olacaktır. Ancak, çok alanlı İnsansız Deniz Araçları faaliyetlerindeki mevcut çok satıcılı çoklu protokol çözümlerinin ortak görev kontrol arayüzleri ve iletişim protokol şemaları olmadan birlikte çalıştırılması zordur. Ayrıca su altı alanı, karasal ağlar için geliştirilen çözümlerle tatmin edilemeyecek önemli zorluklar sunmaktadır (Costanzi vd. (2020)).

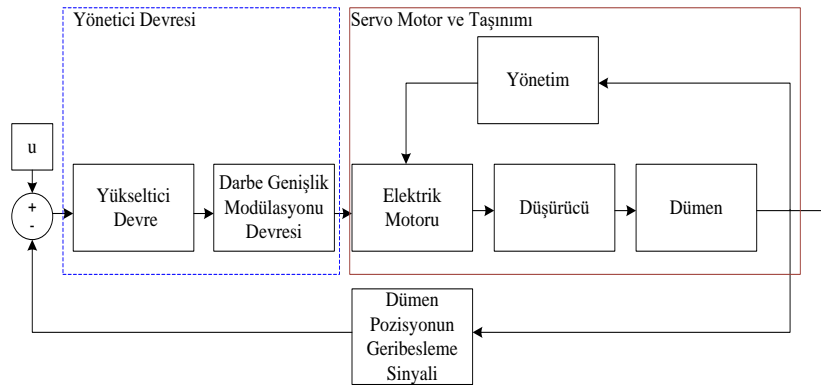
Hu ve arkadaşları çalışmalarında; insansız platformun ve yapay zekanın hızla gelişmesiyle birlikte, artan karmaşıklık ve uzun süreli dayanıklılığa sahip daha fazla deniz hizmeti için Otonom Deniz Araçlarının (AMV'ler) kullanımına olan ilgi artmaktadır. Çoklu AMV'lerin temel teknolojilerinden biri iş birliğine dayalı gezinme ve kontroldür, ancak ağ karmaşıklığı, iletişim gecikmesi ve algoritma geliştirme gibi problemlerden muzdarip olabilir. Zorluğu ele almak için, yüzey için ortak bir gezinme ve kontrol yöntemi. Deniz operasyonlarının performansını iyileştirmek için su altı AMV'leri önerilmektedir. İlk, AMV'lerin su yüzeyinde ve su altında sefer ve kontrol performanslarını iyileştirmek, yüzey-su altı iletişim ağını kurmak akustik iletişim ve konumlandırma sistemi kullanılmaktadır. Daha sonra, tek İnsansız deniz aracı (AUV)'nin sefer performansını iyileştirmek için, yeni bir iş birliğine dayalı seyirüsefer algoritması önerilmektedir. Deneysel sonuçlar, önerilen işbirlikçi navigasyon ve kontrol yöntemimizin, mevcut bir INS kullanan (AUV) ile karşılaştırıldığında, AUV'nin konum ve yörünge izleme sonucu açısından daha doğru çözümler elde edebileceğini göstermektedir. Ayrıca navigasyon ve kontrol sistemi, USV'nin AUV'yi sabit bir bağıl mesafe ve yönelimle dinamik olarak takip etmesi için etkili olduğunu kanıtlıyor. Yüzey-su altı iletişim ağını kurmak için akustik iletişim ve konumlandırma sistemi kullanılır. Daha sonra, tek AUV'nin seyirüsefer performansını iyileştirmek için, yeni bir iş birliğine dayalı seyirüsefer algoritması önerilmektedir. Deneysel sonuçlar, önerilen işbirlikçi navigasyon ve kontrol yöntemimizin, mevcut bir INS kullanan AUV ile karşılaştırıldığında, AUV'nin konum ve yörünge izleme sonucu açısından daha doğru çözümler elde edebileceğini göstermektedir. Ayrıca navigasyon ve kontrol sistemi, USV'nin AUV'yi sabit bir bağıl mesafe ve yönelimle dinamik olarak takip etmesi için etkili olduğunu kanıtlıyor. Yüzey-su altı iletişim ağını kurmak için akustik iletişim ve konumlandırma sistemi kullanılır. Daha sonra, tek AUV'nin sefer performansını iyileştirmek için, yeni bir iş birliğine dayalı sefer algoritması önerilmektedir. Deneysel sonuçlar, önerilen işbirlikçi navigasyon ve kontrol yöntemimizin, mevcut bir INS kullanan AUV ile karşılaştırıldığında, AUV'nin konum ve yörünge izleme sonucu açısından daha doğru çözümler elde edebileceğini göstermektedir. Ayrıca navigasyon ve kontrol sistemi, USV'nin AUV'yi sabit bir bağıl mesafe ve yönelimle dinamik olarak takip etmesi için etkili olduğunu kanıtlıyor. Deneysel sonuçlar, önerilen işbirlikçi navigasyon ve kontrol yöntemimizin, mevcut bir INS kullanan AUV ile karşılaştırıldığında, AUV'nin konum ve yörünge izleme sonucu açısından daha doğru çözümler elde edebileceğini göstermektedir. Ayrıca navigasyon ve kontrol sistemi, USV'nin AUV'yi sabit bir bağıl mesafe ve yönelimle dinamik olarak takip etmesi için etkili olduğunu kanıtlıyor. Deneysel sonuçlar, önerilen işbirlikçi navigasyon ve kontrol yöntemimizin, mevcut bir INS kullanan AUV ile karşılaştırıldığında, AUV'nin konum ve yörünge izleme sonucu açısından daha doğru çözümler elde edebileceğini göstermektedir. Ayrıca navigasyon ve kontrol sistemi, USV'nin AUV'yi sabit bir bağıl mesafe ve yönelimle dinamik olarak takip etmesi için etkili olduğunu kanıtlamışlardır (Hu vd. (2018)).

2. Materyal ve Metod

2.1 Su altı aracının servo motorunun modeli

2.1.1 Su altı aracının servo motorun kontrol modeli

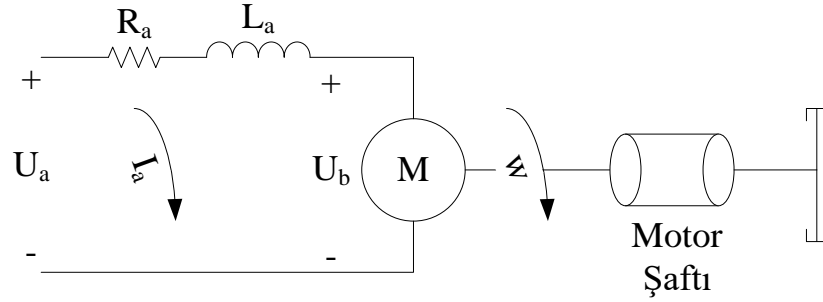
Su altı aracı servo motor kontrol devresi esas olarak fırçasız bir DC motor, redüktör ve bir geri besleme potansiyometresinden oluşmaktadır. Su altı araç kapalı devre servo motor ve aktüatör döngü yapı şeması Şekil 1'de gösterilmiştir (Qiang vd. (2016)).



Şekil 1. Servo ve dümen döngü yapısı diyagramı

2.1.2 Servo motorun elektriksel ve matematiksel modeli

Servo Motorun elektriksel devresi Şekil 2'de gösterilmiştir (Qiang vd. (2016)).



Şekil 2. Servo Motorun Elektriksel Devresi

Şekil 2'ye göre, motor hızı armatür gerilimi u_a tarafından kontrol edilir, devre denklemini yazmak için Kirchhoff teoremi Eşitlik (1)'de verilmiştir.

$$L_a \frac{di_a}{dx} + R_a i_a + u_b = u_a \quad (1)$$

Armatür döndüğünde, armatür kaynaklı gerilim Eşitlik (2)'de verilmiştir.

$$u_b = K_a \omega \quad (2)$$

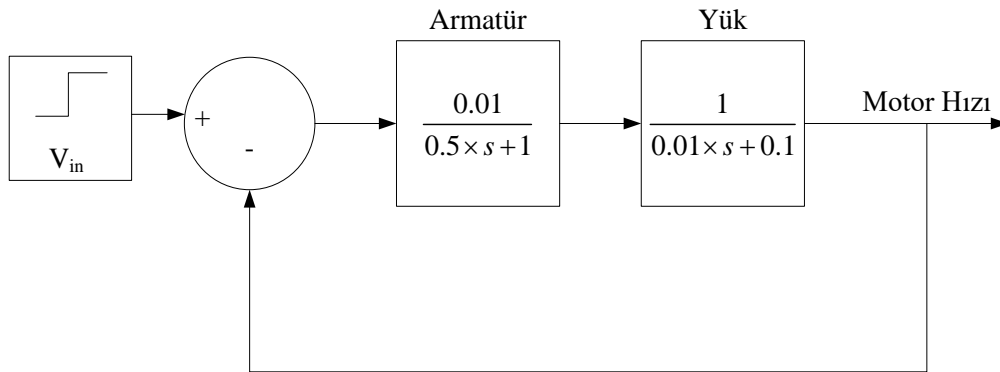
Momentum teoremine göre rotor tork denklemini Eşitlik (3)'te verilmiştir.

$$J \frac{d\omega}{dt} + f\omega + M_{ed} = K_e i_a \quad (3)$$

U_a : Armatür gerilimi (direksiyon talimatı), birimi V, U_b Motor karşı elektromotor kuvveti, birimi V, R_a : Armatür sargı direnci, birimi Ω , L_a : Armatür sargısının endüktansı, birim H, ω : Motor hızı, birim rad / s, f : Viskoz sürtünme katsayısı, birimi $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}$, M : Yük torku, birimi $\text{N} \cdot \text{m}$, K_e — Motor tork sabiti, birimi $\text{N} \cdot \text{m/A}$, K_a : Savaş elektromotor kuvveti sabiti, birimi $\text{V} \cdot \text{s} / \text{rad}$.

2.1.3 Servo motorun benzetim modeli

Gerçek motor viskoz sürtünmesinin küçük olduğu göz önüne alındığında, modelleme sırasında dikkate alınmayacaktır. Eşitlik 1'den 3'e ve motor çalışma prensibine göre Simulink modeli oluşturulmuştur. Servo motorun benzetim modeli Şekil 3'te gösterilmiştir (Qiang vd. (2016)).



Şekil 3. Servo Motorun Benzetim Modeli

2.2 PID denetleyici

PID denetleyici endüstri alanında sıkça kullanılan denetleyici yöntemidir. PID denetleyici çalışma prensibi sistemden alınan değerin referans değere karşılaştırılıp sistemin çıkışının referans değere yaklaştırılmasını sağlamaktır. PID denetleyicide oransal, integral ve türev bileşenlerinin katsayıları ayrı ayrı hesaplanarak toplama işlemi gerçekleştirilir. PID kontrolü, üç terimli denetleyiciye verilen bir isimdir. PID denetleyicide terimler adlarının ilk harflerini ifade eder. Bunlar Orantılı terim için P, integral terim için I ve denetleyicideki türev terim için D olarak tanımlanır. PID'nin en yaygın kullanıldığı yerler endüstriyel alanlardır. Hatta karmaşık endüstriyel kontrol sistemleri, ana kontrol yapı bloğu bir PID denetim modülü olan bir kontrol ağı içerebilir PID denetleyici uzun bir kullanım geçmişine sahiptir ve günümüze kadar gelmiştir. PID denetleyicinin matematiksel denklemi Eşitlik (4)'de verilmiştir ((Yazgan vd. (2019)), Kasım vd. (2021)).

$$U(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (4)$$

Eşitlik (4)'te verilen u(t) ve e(t) sırasıyla denetleyici ve hata sinyallerini verir. K_p , T_i ve T_d denetleyicide tasarlanacak parametrelerdir.

2.3 Ziegler Nichlos teoremi

Bir denetleyicinin referans değere ulaşması için bir denetleyicinin parametrelerin ayarlanması gerekir. Bir denetleyicinin kazanç parametrelerinin uygun olmayan değeri kullanılırsa sistem yanıtı zayıf ve kararsız hale gelir. Bu nedenle, istenen yanıtı almak için denetleyiciyi uygun şekilde ayarlanmalıdır. Sistemim girdi ve çıktı model parametreleri (K , L , T) aynı olmasına rağmen, PID parametrelerinin elde edilmesi yaklaşımları farklılık göstermektedir. Ziegler Nichols geleneksel yöntemlerden biri birincil zaman gecikmeli sistem olarak tanımlanır. Ziegler Nichols teoremi sağlama süresinin (L) ve zaman sabiti (T)'den iki parametrelerinden oluşur. Ziegler Nichols Yöntemin formülasyonu Eşitlik (5)'te verilmiştir ((Yazgan vd. (2019)), Kasım vd. (2021)).

$$G_p = \frac{K e^{-sL}}{Ts+1} \quad (5)$$

2.4 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), belirli bir kalite ölçüsüne göre çözümü yinelemeli olarak iyileştirmeye çalışarak bir sorunu optimize eden bir hesaplama yöntemidir. Bir problemi, burada parçacıklar olarak adlandırılan bir aday çözümler popülasyonuna sahip olarak ve bu parçacıkları arama uzayında basit matematiksel formüle göre parçacığın konumu ve hızı üzerinde hareket ettirerek çözer. Her parçacığın hareketi, yerel olarak en iyi bilinen konumundan etkilenir, ancak aynı zamanda, diğer parçacıklar tarafından daha iyi konumlar bulunduğunda güncellenen arama uzayındaki en iyi bilinen konumlara doğru yönlendirilir. Bunun sürüyü en iyi çözümlere doğru hareket ettirmesi beklenir ((Yazgan vd. (2019)), Solihin vd. (2011)).

PSO'da, genetik operatörler kullanmak yerine, parçacık olarak adlandırılan bireyler, nesiller boyunca kendi aralarındaki iş birliği ve rekabet yoluyla "evrimleşir". Parçacık, bir problemin potansiyel bir çözümünü temsil eder. Her parçacık uçuşunu kendi uçuş deneyimine ve sürüye eşlik eden diğer bireylerin uçuş deneyimine göre ayarlar. Her parçacık D boyutlu uzayda bir nokta olarak ele alınır. i parçacığı $X_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ olarak temsil edilir. Herhangi bir parçacığın önceki en iyi konumu (minimum uygunluk değerini veren) kaydedilir ve $PID=(pid_1, pid_2, \dots, pid_D)$ olarak gösterilir, buna P_{best} denir. Popülasyondaki tüm parçacıklar arasında en iyi parçacığın indeksi, G_{best} olarak adlandırılan g sembolü ile temsil edilir. i parçacığının hızı $VI=(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ olarak temsil edilir. Parçacıklar aşağıdaki Eşitlik (6) ve Eşitlik (7)'ye göre güncellenir ((Yazgan vd. (2019)), Solihin vd. (2011)).

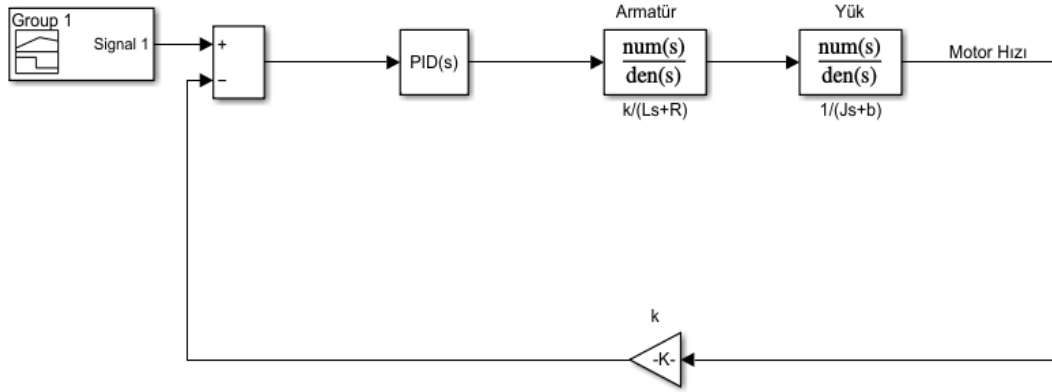
$$v_{id}^{n+1} = w \cdot v_{id}^n + c_1 \cdot rand \cdot (p_{id}^n - x_{id}^n) + c_2 \cdot rand \cdot (p_{gd}^n - x_{id}^n) \quad (6)$$

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1} \quad (7)$$

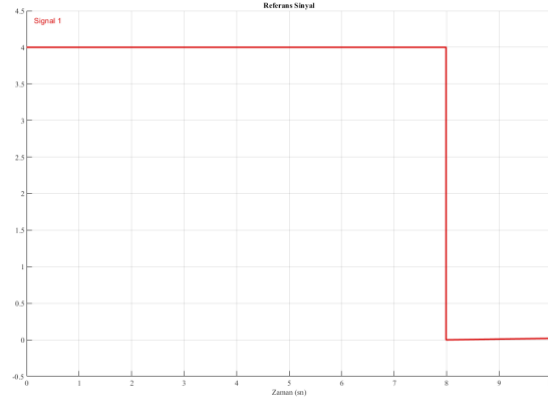
Eşitlik (6)'da verilen c_1 ve c_2 pozitif sabitler $rand$ ise rastgele 0 ile 1 arasında bir sayıdır.

3. Benzetim Sonuçları

Benzetim çalışması yapılırken ilk olarak servo motorun ve uygulanan yükün transfer fonksiyonları elde edilmiştir. Sistemin çıkışından motorun hızı alınarak referans değere karşılaştırılıp hata sinyali elde edilmiştir. Elde edilen hata sinyali PID denetleyiciye iletilmiştir. Sistemin MATLAB/Simulink ortamındaki benzetim şeması ve referans değere Şekil 4'te gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4 a) Servo Motor Kontrol MATLAB/Simulink Devre Şeması b) Referans Sinyal

PID denetleyicinin Ziegler Nichols teoremine hesaplanan katsayıları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: PID Denetleyici Parametreleri (Ziegler Nichols)

Kontrolcü Tipi	K_p	K_i	K_d
PID	10	0.00025	7

PSO (Parçacık sürü optimizasyonu) PID katsayı optimizasyonu için tasarım kriterleri Tablo 2’te verilmiştir.

Tablo 2: PSO parametreleri ve değerleri

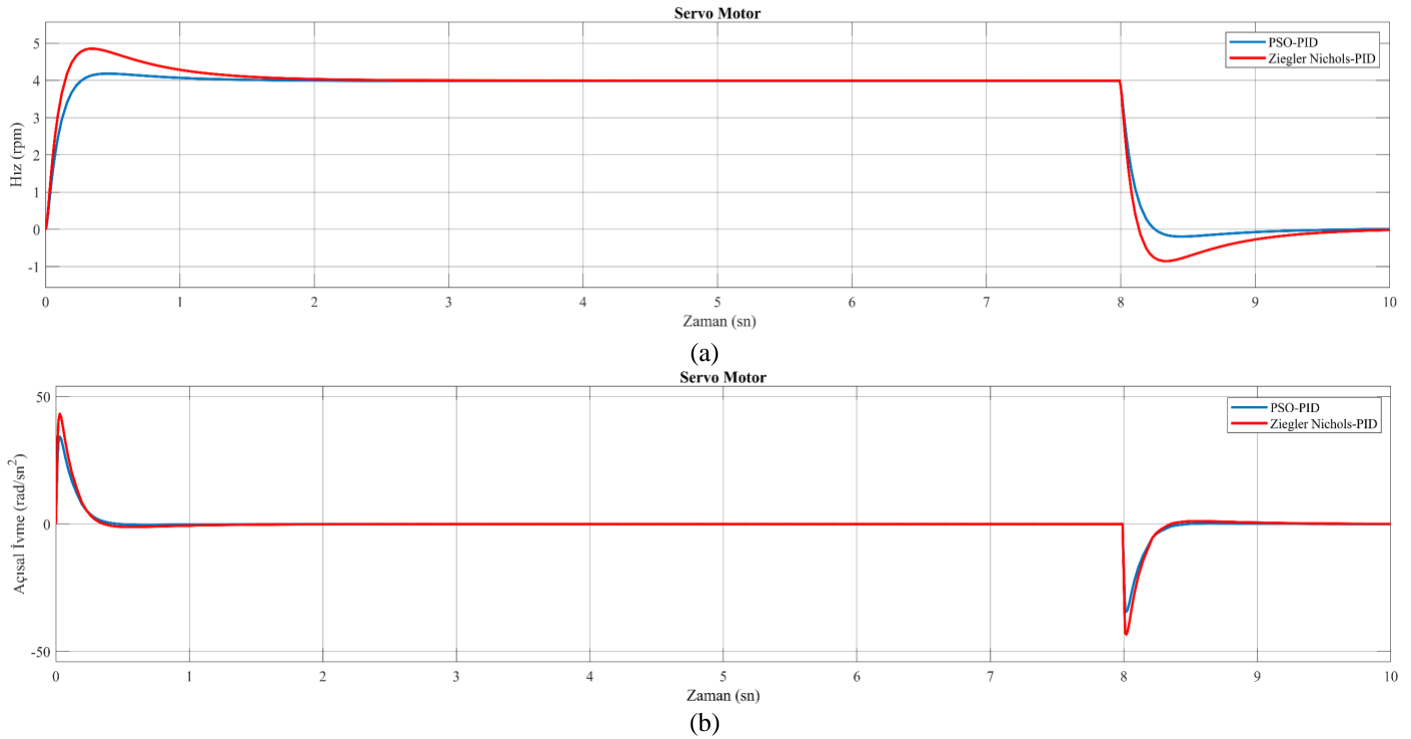
PSO parametreleri	Değerleri
Sürü Sayısı	15
İterasyon Sayısı	200
Maksimum Ağırlık	0.3
Minimum Ağırlık	0.2
c1	1.2
c2	2

PID denetleyicinin PSO algoritmasına göre optimize edilen katsayıları Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3: PID Denetleyici Parametreleri (PSO)

Kontrolcü Tipi	K_p	K_i	K_d
PID	5.2189	$-6.6 \cdot 10^{-7}$	2.8783

Servo motor ve ona uygulanan yük matematiksel olarak tasarlanmıştır. USV modelinde referans değer ile servo motorun çıkışından alınan hız değeri karşılaştırılmıştır. Servo motorun hız değerinin referans değere yaklaştığı gözlemlenmiştir. Açısal ivme hızın türevi alınarak hesaplanır hızın sabit olduğu yerlerde açısal ivme sıfırken hızın değişkenlik gösterdiği yerlerde açısal ivme değer almaktadır. Servo motorun hız, açısal ivme değerleri Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5 a) Servo Motor Hız b) Servo Motor Açısal İvme

4. Sonuç

Bu çalışmada servo motorun hız kontrolünde sıklıkla kullanılan geleneksel PID denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. PID denetleyicide katsayıların ayarlanması sistemin çıkışından alınan değer referans değere yaklaşmasında önemli bir yere sahiptir. PID denetleyici katsayıları Ziegler Nichols teoremiyle hesaplanmış ardından PSO ile optimize edilmiştir. Benzetim çalışmaları sonucunda PSO ile optimize edilen PID katsayıları Ziegler Nichols teoremiyle hesaplanana göre referans değere daha kısa sürede ulaştığı, referans gerilime ulaştığında salınım miktarının daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumlar göz önüne alındığı PSO ile optimize edilen PID katsayılarının daha kararlı, referans değere daha hızlı ulaştığı ve düşük maliyetli olduğu benzetim çalışmasından elde edilmiştir.

Kaynaklar

Alkan, B., (2012). İnsansız deniz araçları için itiş denetleyicisi tasarımı. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.

Altuntaş, F. (2017). Patent analizi ile teknoloji ağlarının oluşturulması: İnsansız deniz aracı teknolojileri üzerine bir uygulama. Bayburt Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı Bayburt.

Beşer, F. (2018). Çoklu otonom insansız deniz araçları için rota planlanması ve engelden kaçınma. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektronik Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

- Campbell, S., Naeem, W., & Irwin, G.W. (2012). A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres. *Annual Reviews in Control*, 36(2), 267-283.
- Costanzi, R., Fenucci, D., Manzari, V., Micheli, M., Morlando, L., Terracciano, D., Tesi, A. (2020) Interoperability Between Unmanned Watercraft: Survey and First Field Experiments. *Frontiers in Robotics and Artificial Intelligence*. Frontiers Media SA.
- De-min Xu, Torpedo automatic control system. [M] Xi'an: Northwestern University Press Inc. 2001. [In Chinese]
- Gang Liu, Zhi-qiang Wang, Jian-cheng Fang, Permanent magnet brushes DC motor control and application [M] Beijing: Mechanical Industry Inc. 2008. [In Chinese]
- Grenestedt, J., Keller, J., Larson, S., Patterson, J., Spletzer, J., Trephan, T., (2015). LORCA: a high performance usv with applications to surveillance and monitoring. 2015 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), West Lafayette, IN, USA.
- Hu, C. Fu, L., & Yang, Y. (2018). Common navigation and control for underwater autonomous vessels. In the 2017 IEEE 2 Conference on Information Technology, Networking, Electronics and Automation Control, ITNEC 2017 Proceedings (Vol.2018-January, pp.589-592). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Ji-jun Jiang, Torpedo Simulation Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Inc. 2013. [In Chinese]
- Jun Zhou, Variable structure control theory in the electric steering system design [J] Northwestern Polytechnical University, 1990, 8 (3): 273-280.
- Kasim, Ö. (2021). Speed Control of DC Motor under Reverse Torque Disturbance with Ant Colony Optimized PID Controller. *Aksaray University Journal of Science and Engineering*, 5(1), 8-19.
- Liu, J., Luo, J., Cui, J. & Peng, Y., (2016). Trajectory tracking control of underactuated usv with model perturbation and external interference. *MATEC Web of Conferences* 77, 09009 (2016), Shanghai, China.
- Long-yan Lin, Qin-nan Zhang, Jian Gao, Variable speed torpedo Adaptive Sliding Mode controlled [C]. Torpedo guidance technology Symposium 2012, 2012, 4-7. [In Chinese]
- Li, Qiang., Zhang, Q. N., Wang, L. W., & Wang, L. (2016), Sliding Mode Control Technology Research About Underwater Vehicle Servo, 6 International Conference on Control and Automation, ISBN: 978-1-60595-329-8.
- Mu, D., Wang, G., Fan, Y., & Zhao, Y. (2017). Modeling and identification of podded propulsion unmanned surface vehicle and its course control research. *Mathematical Problems in Engineering*, School of Information Science and Technology, University of Dalian Maritime, Dalian, Hindawi Published, Liaoning China.
- Solihin, M. I., Tack, L. F., & Kean, M. L. (2011, January). Tuning of PID controller using particle swarm optimization (PSO). In *Proceeding of the international conference on advanced science, engineering and information technology* (Vol. 1, pp. 458-461).
- Xu, B., Xiao, Y. P., Gao, W., Zhang, Y.G., Liu, Y.L., & Liu, Y. (2014). Dual-model reverse ckf algorithm in cooperative navigation for usv. *Mathematical Problems in Engineering*, Harbin Engineering University, Nantong Road, Harbin, China.
- Yazgan, H., Yener, F., Soysal, S., & Ahmet, G. Ü. R. (2019). Comparison Performances of PSO and GA to Tuning PID Controller for the DC Motor. *Sakarya University Journal of Science*, 23(2), 162-174.
- Zhao, J., Yan, W., Gao, J., & Shi, S., (2010)., Design and implement of the control system for unmanned surface vehicle based on the vxworks. 2010 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR 2010), Wuhan China.



Trafik Mikro-Simülasyon Model Kalibrasyonu için Özellik Seçim Algoritmalarının Karşılaştırılması

Comparison of Feature Selection Algorithms for Traffic Micro-Simulation Model Calibration

Erdem Doğan¹

¹Kırıkkale Üniversitesi Yerleşkesi, Mühendislik Fak. İnşaat Müh. Böl., Yahşihan/71450, Kırıkkale, Türkiye

Başvuru/Received: 30/03/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Günümüzde trafik simülasyonlarını gerçekleştirmek için önemli sayıda gelişmiş mikro simülasyon modeli geliştirilmiştir, ancak bu modeller tüm trafik koşullarını modellemek için kalibre edilmesi gereken çok sayıda parametre içermektedir. Tüm bu parametreleri kalibre etmeye çalışmak maliyetli olabilir ve hatta kalibrasyon doğruluğunu azaltabilir. Bu çalışmada, çeşitli Özellik Seçim Algoritmalarının (ÖSA) kalibrasyon doğruluğu üzerindeki etkilerinin bir analizi yapılmış ve uygun ÖSA tipinin belirlenmesi için bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşım kapsamında, SUMO'nun araç tipi, araç takip ve şerit değiştirme model parametrelerinden bir model parametre seti oluşturulmuş ve Latin Hiper Küpü kullanılarak deney seti oluşturulmuştur. Deneyler, yüksek zaman çözünürlüğünde veri toplama yeteneğine sahip detektörlerle donatılmış 9,2 km uzunluğundaki bir karayolu kesimi için gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, ÖSA kullanımının kalibrasyon performansını önemli ölçüde iyileştirebileceği gözlemlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada önerilen kalibrasyon yönteminin trafik simülasyonu uygulayıcıları ve araştırmacılar için fonksiyonel olacaktır.

Anahtar Kelimeler

“Trafik, kalibrasyon, simülasyon, özellik seçimi”

Abstract

A significant number of advanced microsimulation models have now been developed to perform traffic simulations, but these models contain a large number of parameters that must be calibrated to model all traffic conditions. Attempting to calibrate all of these parameters can be costly and even reduce calibration accuracy. In this study, an analysis of the effects of various Feature Selection Algorithms (FSA) on calibration accuracy is conducted and an approach is proposed to determine the appropriate FSA type. As part of the proposed approach, a model parameter set was created from SUMO's vehicle type, car following and lane change model parameters, and an experimental set was created utilizing the Latin Hyper Cube. The experiments were carried out for a 9.2 km long road section equipped with detectors capable of collecting high time resolution data. As a result, it was observed that using FSA can significantly improve the calibration performance. In addition, the calibration method proposed in this study can be functional for traffic simulation practitioners and researchers.

Key Words

“Traffic, calibration, simulation, feature selection”

1. Giriş

Trafik simülasyon modelleri, bir tasarımın değerlendirilmesi, sürüş davranışının incelenmesi, taşıtlar arasındaki etkileşimlerin ve yönetim alternatiflerinin araştırılması için uygun maliyetli ve esnek bir yaklaşım sağlamaktadır (Balakrishna et al., 2007; Rakha et al., 1996). Diğer taraftan, belirli düzeyde faydanın elde edilebilmesi için model sonuçları güvenilir olmalıdır. Simülasyonun güvenilirliği, model parametrelerinin incelenen bölgedeki hâkim koşullara uyarlanmasıyla, yani modelin kalibrasyonu ile mümkündür.

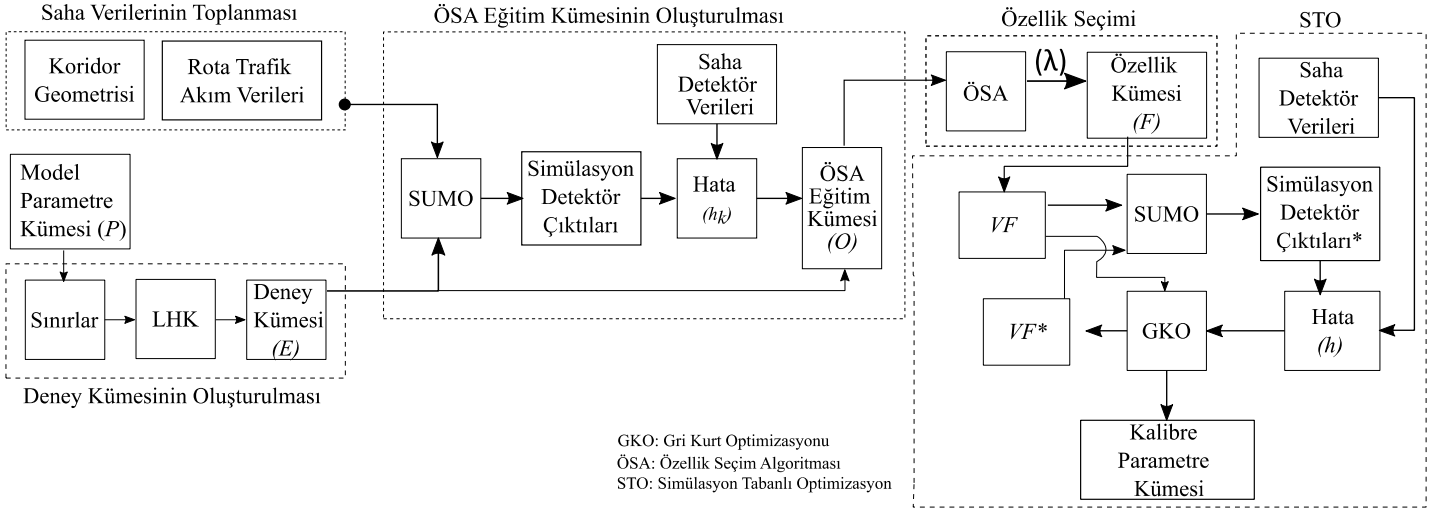
Bir trafik modelinin kalibrasyonu, belirlenen trafik değişkeni için yerel saha ölçümü ile simülasyon değerleri arasındaki farkı kabul edilebilir bir düzeye indirmek için model parametrelerin ayarlanması prosedürüdür. Bir mikro-simülasyon model kalibrasyonu genellikle Simülasyon Tabanlı Optimizasyon (STO) problemi olarak ele alınır, yani amaç fonksiyonun değerlendirilmesi için bir simülasyon modeline ihtiyaç duyulur. Bu nedenle gerekli işlem gücü ve süresi yüksek bir yaklaşımdır, fakat bu durum uygun optimizasyon yönteminin seçilmesiyle hafifletilebilir. Diğer taraftan bir bölgenin detaylı modellenmesi için kullanılan mikro-simülasyon modelleri karmaşık taşıt davranışlarını modelleyebilmek için önemli sayıda parametre barındırmakta ve parametre sayısının artması kalibrasyon işlem süresini katlanarak artırma neden olmaktadır. Sonuç olarak, en son teknoloji sezgisel algoritmalar bile bu geniş arama uzayı nedeniyle uygun çözümü bulmakta zorlanır (Ciuffo et al., 2014). Bu nedenle, ele alınan trafik değişkenine uygun bir alt parametre kümesinin kalibre edilmesi, model güvenliğini artırmak ve aşırı işlem sürelerinden kaçınmak için kullanılabilir.

Özellik Seçim Algoritmaları (ÖSA) model geliştirme aşamasında kullanılan değişen sayısını azaltmak için kullanılan araçlardır. Bu algoritmalar, ölçülen yanıtları en iyi şekilde ifade eden bir parametre/özellik alt kümesi önerirler. Bu alt kümeler modellerin geliştirilmesinde kullanılır. Böylece modeller bir taraftan basitleştirilirken diğer taraftan tahmin performansının iyileştirilmesi sağlanır. Buradan yola çıkarak, kalibrasyon işleminde etkisi yüksek parametrelerden kullanılmasıyla, kalibrasyon etkinliği artırılabilir.

Bu çalışmada, trafik simülasyon model kalibrasyonu isabetini arttırmak ve kullanılan parametre sayısını azaltılmasını sağlayan bir metod geliştirilmesi amaçlandı. İlave olarak, farklı ÖSA yaklaşımlarının bu metodun performansına etkilerinin araştırıldı. Belirlenen amaca ulaşmak için ilk olarak, gerçek bir otoyol kesiminin modeli, açık kaynak kodlu ve ücretsiz bir simülasyon programı olması nedeniyle giderek artan kullanıcı sayısına sahip olan Simulation of Urban Mobility (SUMO) (Lopez et al., 2018) ortamında oluşturuldu. Ardından taşıt takip, şerit değiştirme ve taşıt tipini modellemek için kullanılan parametrelerden, bir parametre ana kümesi (P) belirlendi. Sonraki aşamada, Latin Hiper Küpü (LHK) kullanılarak bir deney kümesi oluşturuldu. Bu deney kümesi ÖSA'ların eğitilmesi için kullanıldı ve ÖSA'ların parametrelere atadıkları ağırlıklar yardımıyla P 'nin bir alt kümesi olan özellik kümesi (F) oluşturuldu. Son aşamada, F elemanları Gri Kurt Optimizasyonu (GKO) kullanılarak kalibre edildi. Bu süreç sonunda, farklı tip ÖSA'ların SUMO için önerdikleri özellik kümeleri ve bu kümelerin kalibrasyon performansına etkileri analiz edildi.

ÖSA'ları kalibrasyon sürecine dâhil eden farklı alanlarda çalışmalar (Kimlik doğrulaması (Vigneau & Thomas, 2012), kızılötesi spektroskopisi analizi (Li et al., 2009), vb.) olmakla birlikte, bir ÖSA'nın trafik mikro-simülasyon kalibrasyonuna uygulayan bir çalışmaya imkânlar dâhilinde rastlanmamıştır. Diğer taraftan bazı çalışmalarda Duyarlılık Analizi (DA) tekniğinin kullanıldığı ve parametre ağırlıklarının araştırıldığı anlaşılmaktadır. Örneğin, Ge ve Menendez (2014) OTEE ismi verilen yöntemle kalibrasyon işlemini ele alan ve etkin parametreleri duyarlılık indekslerine göre sıralayan bir yöntem önerdi. Çalışmada VISSIM programı kullandılar ve bu yöntemin hesaplama karmaşıklığı yüksek mikroskobik modeller için faydalı olacağını belirttiler. Yine VISSIM ortamında çalışan Azam et al. (2019) bir elmas tip farklı düzey kavşak için simülasyon ve kalibrasyon işlemleri yaptı. Kalibre edilecek parametreleri DA kullanarak belirlendiler. Araştırmacılar parametre seçim işlemi için DA'nın yardımcı olduğu belirttiler. Ciuffo et al. (2014) varyans tabanlı DA tekniğini akıllı sürücü araç takip modeline uyguladılar. Farklı parametre kombinasyonlarını deneyen araştırmacılar DA'nın etkin olmayan parametrelerin belirlenmesinde etkin bir rol oynadığını ve farklı takip modelleri için farklı kombinasyonların etkin olduğunu belirttiler. (Arkatkar et al., 2016) VISSIM kullanarak heterojen trafiğe sahip bir otoyol yol için mikro-simülasyon kalibrasyonu yaptılar, fakat bu analiz sadece etki düzeyini anlayabilmek için kullanıldı. Essa & Sayed (2015) ise DA kullanarak simülasyon sonuçlarına etkisi yüksek VISSIM parametrelerini belirledi ve bu parametreleri genetik algoritmayla optimize ettiler. Bu geçmiş çalışmaların çoğunluğunda DA metodu kullanıldığı ve bazılarında ise DA'nın kalibrasyon sürecine dâhil edilmediği anlaşılıyor. Bu çalışma da ise DA'nın yerine ÖSA'lar kalibrasyon sürecine dâhil edildi, ilave olarak geçmiş kalibrasyon çalışmalarında bu alanda kullanılmayan SUMO trafik modeli kullanıldı. Hem yeni ÖSA'ların kalibrasyon sürecine dâhil edilmesi ve etkinliklerinin belirlenmesi hem de SUMO'nun bu çalışmada kullanılması, bu çalışmanın kalibrasyon konusundaki sürece katkı verme potansiyeli olduğunu göstermektedir.

İlerleyen bölümlerde öncelikle önerilen yöntem bileşenleri olan Latin Hiper Küpü, ele alınan ÖSA'lar, GKO ve diğer yöntem bileşenleri hakkında bilgiler verildi. Ardından, deneylerin yapıldığı yol kesimi ve kullanılan trafik akış değerleri hakkında bilgiler sunuldu. Sonuç bölümünde ise önerilen ÖSA'ların kalibrasyon performansına etkileri detaylı olarak tartışıldı.



Şekil 1. Önerilen kalibrasyon yaklaşımının genel akış diyagramı.

2. Metodoloji

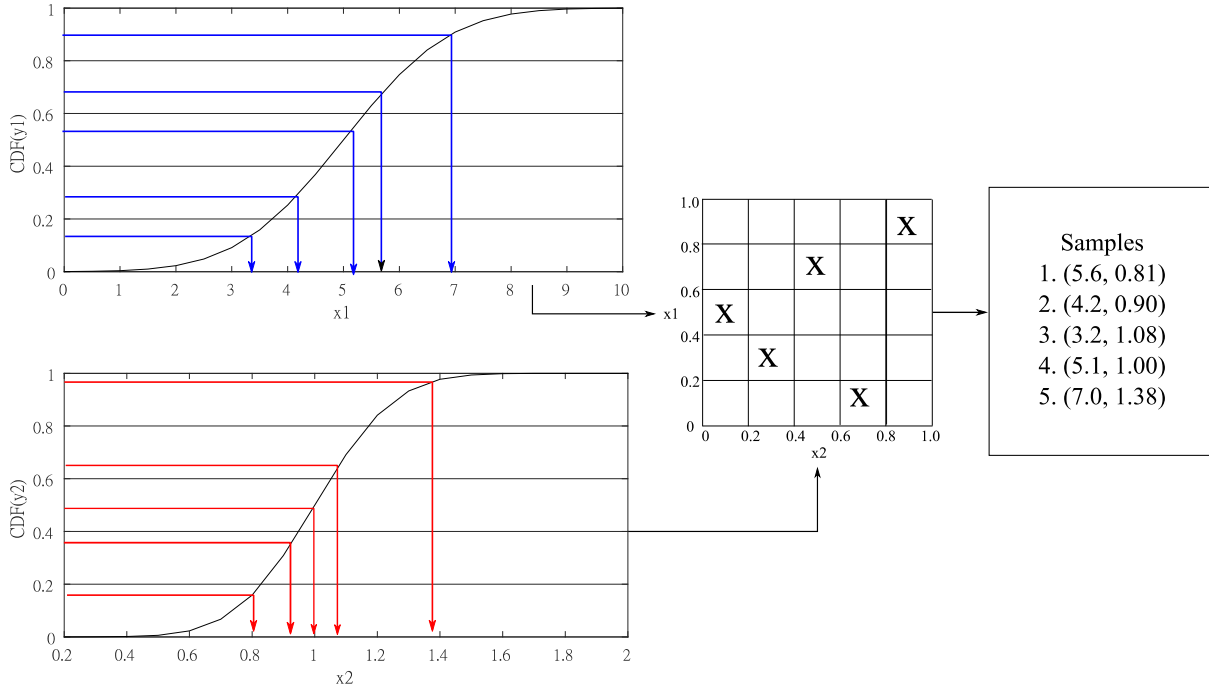
2.1. Genel Bakış

Bu bölümde önerilen trafik model kalibrasyon yaklaşımın Şekil 1’ de şematik olarak resmedilen beş ana aşaması hakkında detaylı bilgiler verildi. (i) Saha verilerinin toplanması: Bu aşamada modelin oluşturulması için gerekli veriler ölçüm veya sayım yöntemleriyle elde edilir. (ii) Deney kümesinin (E) oluşturulması: Bu küme kalibre edilecek parametrelere ait değerlerin kombinasyonudur ve Latin-Hiper Küpü (LHK) kullanılarak oluşturulur. (iii) ÖSA eğitim kümesinin (O) oluşturulması: SUMO ve E kümesi kullanılarak oluşturulmuş trafik modelinden elde edilen simülasyon detektör çıktıları ile gerçek çıktılar arasındaki farklarla hata kümesi tespit edilir. Hata kümesi ve deney kümesi birleştirilmesiyle sonucunda O kümesi elde edilir. (iv) ÖSA’nın O kümesiyle eğitilmesi ve parametreler için ağırlık değerlerinin hesaplanması ve eşik değeri (λ) yardımıyla özellik kümesinin (F) tespit edilmesi: F , P kümesinin alt kümesi olup, ÖSA tarafından seçilen parametreleri içeren bir kümedir. (v) özellik kümesi elemanlarının, yani seçilmiş parametrelerin, Simülasyon Tabanlı Optimizasyon (STO) ile kalibre edilmesi: Diğer bir deyişle, F kümesi içindeki model parametrelerin değerleri bu aşamada kalibre edilir. Bu kısımda SUMO ve Gri Kurt Optimizasyonu (GKO) birlikte çalışarak trafik akım değerleri arasındaki farkı minimize edecek parametre değerlerini araştırır ve bir Kalibre Parametre Kümesi önerir.

2.2. Latin Hiperküpe ve Deney Veri Kümesi

Bir olayın başarılı biçimde modellenebilmesi için, olayla ilgili parametre değerleri ve bu değerlere karşılık oluşan çıktı değerlerini içeren yeterli sayıda elemana sahip bir eğitim kümesi gereklidir. Fakat parametre sayısının fazla ve parametrelerin alacağı değer sınırlarının geniş olması durumlarında önemli sayıda deney yapma gerekliliği oluşur. İlk olarak McKay et al. (1979) tarafından önerilen LHK bir girdinin başlangıç dağılımına yakın bir dağılımı daha az sayıda numune ile ederek kaliteli numuneler içeren bir deney kümesi oluşturmayı amaçlar. Böylece gerekli deney sayısı uygulanabilir sayılara indirgenbilir.

LHK’nın çalışmada prensibi girdilerin kümülatif olasılık dağılımını (CDF) nE adet eşit aralıklara bölmesi (nE aynı zamanda deney kümesi eleman sayısı olmaktadır) ve her bir aralıktan rastgele bir örnek toplamasıdır. Şekil 2’de iki değişkenli (x_1 ve x_2) bir problemde öncelikle her değişkenin, $nE = 5$ olması için, CDF’leri 0.2 aralıklarla bölünmüş ve her aralık içinden rastgele CDF değerleri ve karşılık gelen değişken değerleri belirlenmiştir. Örneğin x_1 değişkenine ait CDF aralığı 0.8-1.0’de, x_1 değişkenin değeri 7.0’dır. Bir istatistiksel örnek toplamanın Latin Hiperküpe olması için her bir kolon ve satırdan sadece bir adet örnek alınmalıdır. Bu şartın sağlandığı Şekil 2’deki (x_1 , x_2) ızgara tablosunda görülmektedir. LHK’nın son aşamasında bu düzene göre 5 eleman içeren deney kümesini oluşturulur.



Şekil 2. Latin Hiper küpü kullanarak örnek bir deney kümesinin oluşturulması.

Simülasyon modeli kapasitene bağlı olarak, taşıt davranışlarının modellenmesinde kullandığı önemli sayıda parametre içerir. Amaç fonksiyonu ile ilgisi yüksek parametrelerin kalibrasyonun yapılması sürece katkı sağlayacaktır. Örneğin, çoğu simülasyon programı kavşaklardaki taşıt davranışlarını modellemek için çeşitli parametreler barındırır fakat bir kesintisiz akım koşullarının geçerli olduğu bir otoyol kesiminin kalibrasyonuna bu parametrelerin dâhil edilmesi süreci zorlaştıracaktır. Bu nedenle parametre seçim işlemine geçilmeden önce kaliteli bir deney kümesinin oluşturulması sürecin performansını arttıracaktır.

Şekil 2’de görülen deney kümesinin (E) oluşturulma süreci, simülasyon programının içerdiği parametreler arasından elemanları seçilen ve $P = \{p_i: i \leq np \wedge i \in \mathbb{N}\}$ olarak ifade edilen Model Parametre Kümesi belirlenmesiyle başlar. Ardından, p_i parametresinin değeri vp_i ile gösterilecek olursa, alt $L = \{l_i: l_i \leq vp_i\}$ ve üst $U = \{u_i: u_i \geq vp_i\}$ sınır kümeleri tespit edilir. Bu sınır değerleri taşıt dinamikleri ile ilgili fizik kurallarına bağlı uç değerler göz önüne alınarak belirlenebilir. Sürücü davranışlarıyla ilgili sınırların belirlenmesi ise daha karmaşık bir süreç olup, bazı saha gözlemleri veya modelin varsayılan sınırları kullanılabilir. LHK’nın uygulanmasının ardından $E = \{VP_k: vp_{i(k)} \in VP_k, (k \leq nE), (k \in \mathbb{N})\}$ olarak ifade edilen deney kümesi elde edilir. Yukarıda LHK’nın çalışma prensibinde de anlatıldığı gibi nE , E kümesinin eleman sayısını, yani deney sayısını belirler ve işlem öncesinde kullanıcı tarafından belirlenmelidir.

2.3. ÖSA Eğitim Kümesinin Oluşturulması

Bu aşama, VP_k elemanlarının SUMO parametreleri olarak kullanılması sonucunda, simülasyon ile saha detektörleri arasındaki değer farklarının, yani simülasyon hatalarının tespit edilmesi ve ÖSA eğitim kümesinin (O) oluşturulması işlemlerini kapsar.

İncelenen yol ağı üstünde nd adet detektör bulunsun ve j detektörünün $t \leq nt$ periyodunda ölçtüğü simülasyon ve gerçek trafik akım değerleri, sırasıyla $q_{j(t)}$ ve $\hat{q}_{j(t)}$ olsun. Bu çalışmada trafik akım değerlerine (q) bağlı kalibrasyon yapılmıştır. Farklı bir değişken için bu kısmın değiştirilmesi yeterlidir. Bu durumda bu yol ağının t periyodu için hata değeri Denklem 1 ile hesaplanır.

$$h_{(t)} = \frac{1}{nd} \sum_{j=1}^{nd} (q_{j(t)} - \hat{q}_{j(t)})^2 \quad (1)$$

Denklem 1 diğer periyotlar için tamamlanıp, hata değerlerinin aritmetik olarak toplanmasıyla h_k elde edilir. Böylece, her V_k kümesine karşılık gelen $h_k \in H$ değerleri tespit edilir. Sonuç olarak ÖSA eğitim kümesi (O) Denklem 2 tarif edilen biçimde oluşturulur.

$$O = \{(VP_k, h_k): VP_k \in \mathbb{R}^{np}, h_k \in \mathbb{R}\} \quad (2)$$

2.4. Özellik Seçimi Algoritmaları ve Eşik Değeri

Özellik seçim işlemi, önemli sayıda parametre (özellik) tarafından etkilendiği düşünülen bir olayda, belirli adımlarla etkisi yüksek parametreleri belirlemeyi ve düşük ağırlıklı parametreleri elemeyi amaçlar. Böylece karmaşıklığı azaltılmış ve hatta daha yüksek performanslı modellerin geliştirilmesi sağlanır. Farklı yaklaşımlarla geliştirilmiş önemli sayıda ÖSA'lar bulunmakta ve bunlar filtre, sarıcı ve gömülü olarak üç grupta incelenmektedir. Bu çalışmada filtre ve gömülü tip ÖSA'lar kullanılmış ve özet bilgileri referanslar ile birlikte Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. ÖSA'lara ait bilgiler

ÖSA	Özet Bilgi
F-RANK (Saeys et al., 2007)	F-RANK her bir özelliğin önemini F-testi kullanarak ayrı ayrı inceler. Öncelikle, her bir özellik ile tepki (bu çalışmada için hata) değerleri arasında doğrusal regresyon modeli kurarak korelasyon değerleri hesaplar. Ardından bu korelasyonlardan faydalanılarak F-skorları ve p-değerlerini bulur ve özelliklerin önem dereceleri elde edilen p-değerlerine göre sıralar.
Komşuluk Bileşenleri Analizi (NCA) (Yang et al., 2012)	k -en yakın komşular algoritmasının k parametresinin belirlenme problemine karşı geliştirilmiştir. Bir noktayı rastgele seçerek bir olasılık fonksiyonu içinde noktalar arası uzaklıkları kullanır ve nokta ile ilgili karar verir. Orijinalinde sınıflandırma için geliştirilmiş olsa da regresyon problemleri içinde kullanılmaktadır.
RELIFF (Kira & Rendell, 1992)	Her bir tahmin edici vektör içindeki özellikleri karşılaştırır. Öncelikle hedef bir vektör ve ardından hedef vektör tepkisine yakın ve uzak değerlere sahip iki vektör belirler. Eğer özellik değeri değiştiğinde tahminde değişkenlik oluyorsa, o özelliğin ağırlığı ödüllendirilir. Aksi durumda cezalandırılır. Böylece incelenen özelliklere ait ağırlıklar hesaplanır.
Gauss Süreci Regresyonu (GSR)(Rasmussen, 2003)	Tahmin edici ve tepki verilerine GSR uygulanır. Regresyon sonucunda elde edilen özellik ağırlıkları aynı zamanda özelliklerin önemini gösterir. Düşük ağırlıklı özellikler modelden elenir.
Lasso Regülasyonu (LASSO)(Tibshirani, 1996)	Gözlem ve model çıktısı arasındaki hatayı minimize etmek için bir amaç fonksiyonu kullanılır. LASSO bu amaç fonksiyona bir ceza terimi ekler. Ceza terimi içinde yer alan α katsayılarının büyütülmesiyle model performansına katkısı düşük olan özellik katsayılarının küçülterek modelden çıkarır.

Bu ÖSA algoritmalarının her biri O kümesiyle eğitildikten sonra, $W = \{w_i: i \leq nP, i \in \mathbb{N}\}$ biçimde ifade edilen özellik ağırlık kümesi ortaya çıkar. ÖSA'lar ele alınan parametreler için sonuç olarak bir ağırlık değeri önermektedir. Fakat algoritmaların probleme yaklaşımları farklı olduğu için önerdikleri ağırlıkların sınır değerleri birbirinden farklı olmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada ağırlıkların anlaşılır biçimde karşılaştırılabilmesi ve parametre seçimi yapabilmek için öncelikle bir normalizasyon işlemi uygulanmış ardından bir belirlenen eşik değerini (λ) geçenler F kümesi elemanı olarak seçilmiştir.

Normalize edilmiş ağırlık değeri, $w'_s \in W'$ Denklem 5 yardımıyla hesaplanır. Burada l' ve u' sırasıyla normalizasyon için belirlenen alt ve üst sınırlardır.

$$w'_s = l' + \frac{w_s - \min(W)}{\max(W) - \min(W)} * (u' - l') \quad (5)$$

Böylece, her bir özelliğe atanan ağırlıklar, W' kümesini oluşturur ve hangi parametrenin kalibrasyona dâhil edileceği önceden belirlenen λ kullanılarak belirlenir. Eğer $w'_s \geq \lambda$ ise, f_s kalibre edilir, aksi durumda ise çıkartılır ve $F = \{f_s: s \leq nP, s \in \mathbb{N}, nP \leq nP\}$ olarak ifade edilen Özellik Kümesi oluşturulmuş olur. Böylece ağırlığı yüksek parametreler kalibre edilmek için seçilirken, optimizasyon işlemi için karar değişkeni sayısı azaltılmış olur.

2.5. Simülasyon Tabanlı Optimizasyon

Süreç F elemanlarına başlangıç değerinin atanması ve Denklem 3 de tanımı verilen VF' nin oluşturulmasıyla başlar. Denklemde kullanılan l_s ve u_s , sırasıyla U ve L kümelerindeki ilgili parametreye ait alt ve üst sınır değerleri ifade eder.

$$VF = \{vf_s: l_s \leq vf_s \leq u_s, vf_s \in \mathbb{R}\} \quad (3)$$

Ardından, VF kullanılarak simülasyon detektörlerinin ölçtüğü trafik akım değerleri ve gerçek değerler arasındaki fark, yani hata değerleri (h) tespit edilir. GKO, VF ve h değerlerini kullanarak optimizasyon işlemi gerçekleştirir ve bir sonraki iterasyonu için bir VF^* kümesi önerilir. Bu işlem bir optimizasyon problemi olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$\text{Min} \quad f(VF) = \frac{1}{nd} \sum_{t=0}^{nt} \sum_{j=1}^{nd} (q_{j(t)}(VF) - \hat{q}_{j(t)})^2 \quad (4)$$

Denklem 3'de verilen VF' 'ye ait kısıtlar Denklem 4 içinde geçerlidir.

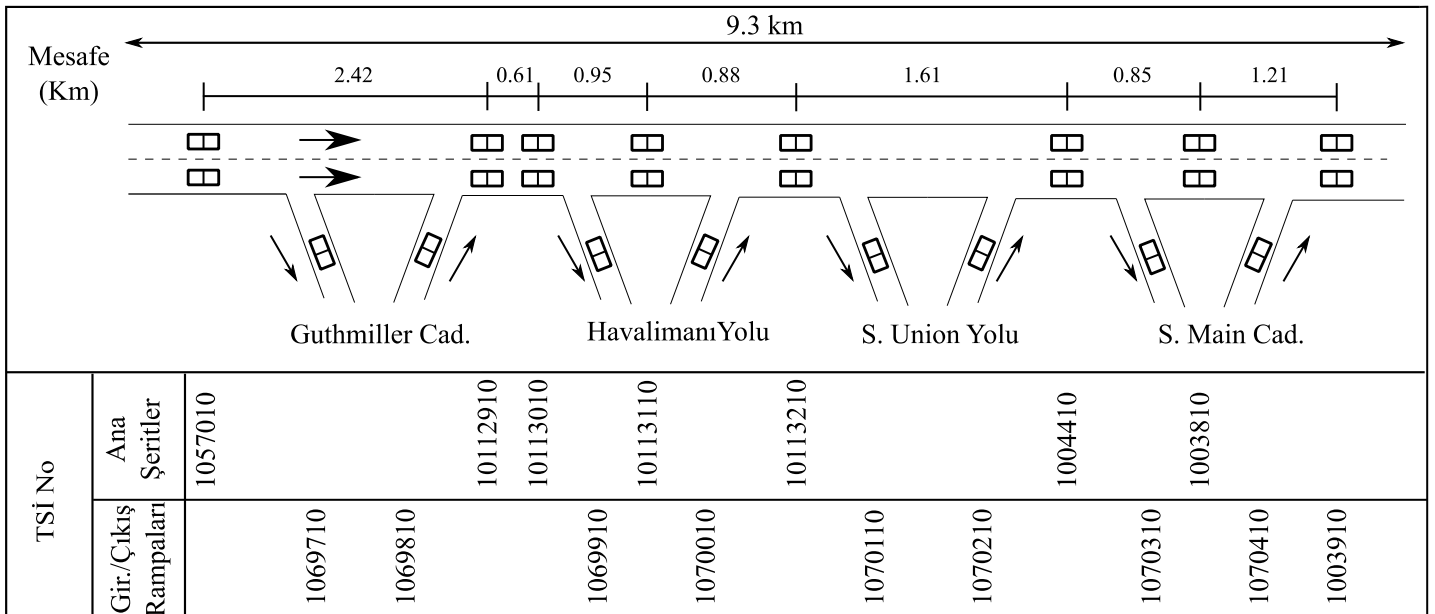
GKO algoritmasının çözüm arayışı önceden belirlenen bir hata değerine veya iterasyon sayısına ulaşıldığında sonlanır ve son iterasyonda elde edilen VF^* elemanları, kalibre parametre kümesi olarak tanımlanır.

GKO, gri kurt sürülerinin avlanma stratejilerini taklit eden bir yaklaşım ile çözüm arayan bir optimizasyon algoritmasıdır. Gri kurtlarda bulunan hiyerarşiyi dört seviye kullanarak taklit eder. Bunlar: alfa, beta, delta ve omega seviyeleridir ve alfa kurt hiyerarşinin tepesinde yer alır. GKO' da, problemin çözümü bir avın pozisyonuna benzetilir ve her bir hiyerarşinin amacı çeşitli teknikler ile av pozisyonuna yaklaşımdır. Bu algoritmaya ait detaylı bilgi orijinal çalışmadan elde edilebilir (Mirjalili et al., 2014).

3. Deneysel Düzeninin Kurulması

3.1. Trafik Veri Kümesi ve Test Otoyol Kesimi

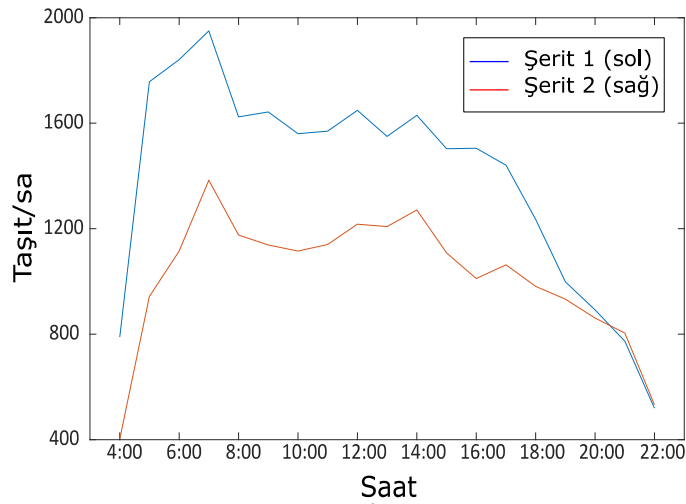
Önerilen yöntemin test edilmesi için California Eyaleti, Manteca Kenti içinde yer alan ve Şekil 3'de resmedilen otoyol bölümü (Batı-Doğu istikameti) seçilmiştir. Bu otoyol üstünde Performance Measurement System (PeMS) sistemine bağlı Taşıt Sayım İstasyonları (TSİ) bulunmakta olup 5 dk. periyotlarla bilgi akışı sunabilmektedir. Ana yol ile giriş ve çıkış rampalarında ayrı detektörler sayesinde kalibrasyon için önemli büyüklükte veri sağlayabilmesi, bu yol kesiminin analizler için seçilmesinde etkili olmuştur. Ana yollarda aynı kesit içinde her şerit için ayrı detektörler bulunmakta olup, bu iki detektör bir TSİ olarak anılmaktadır. Çalışmada kullanılan TSİ'lerin ara mesafeleri ve kod numaraları Şekil 3' de verilmektedir.



Şekil 3. Otoyol planı ve detektör numaraları

Analizlerin yapılacağı zaman kesiminin seçimi için detektörlerin sağlık durumları incelenmiş ve veri kaybının olmadığı 17 Mayıs 2019 tarihinde 04:30-08:30 saatleri arası kalibrasyon işlemleri için seçilmiştir. Böylece trafik akımının en düşük ve en yüksek olduğu (zirve

saat) saat aralığı kapsamıştır. Şekil 4’de incelenen tarihte 1013110 nolu TSİ tarafından ölçülen trafik akımı saatlik olarak verilmiştir. Zirve saatin 07:00 olduğu ve analiz periyodunun hem en düşük akım durumlarını hem de zirve saati içerdiği net olarak görülmektedir.



Şekil 4. 1013110 nolu TSİ'ye ait trafik akış grafiği

3.2. Model Parametre Kümesi ve Sınırlar

SUMO, taşıt tipi, kavşak içindeki taşıt davranışı, şerit değiştirme ve taşıt takip durumlarını modellemek için önemli sayıda parametre sunmaktadır. Bu çalışmada Tablo 2’de açıklamaları ile verilen dokuz adet parametre P elemanları olarak seçilmiştir.

Tablo 2. Model parametre kümesine ait bilgiler

Parametre	l	u	Açıklama
$speedFactor$	0.2	2	Sürücünün, izin verilen maksimum hızın ne oranda üstünde veya altında gideceğini belirleyen katsayıdır. Taşıt tipi parametreleri içinde yer alır
$speedDev$	0.1	0.8	Trafik akımı içindeki taşıt hızlarını heterojen hale getirmek için kullanılır. Taşıt tipi parametreleri içinde yer alır
$minGap$	1	10	Taşıtların birbirini izleyeceği minimum takip mesafesini ifade eder. Taşıt tipine ait bir katsayıdır.
$lcStrategic$	0	10	Belirlenen taşıt rotasını takip edebilmek için gerçekleştirilen şerit değiştirme işlemini modellemek için kullanılır. Daha yüksek değerler taşıtın daha erken şerit değiştirilmesiyle sonuçlanır. Şerit değiştirme modeline ait bir parametredir.
$lcSpeedGain$	0	10	Hız kazanmak için şerit değiştirme isteğidir. Daha yüksek değerler daha fazla şerit değiştirmeye neden olur. Şerit değiştirme modeline ait bir parametredir.
$accel$	1	3	Taşıtların hızlanma ivmesini ifade eden değer. Taşıt takip modeline ait bir parametredir.
$decel$	1	5	Taşıtların yavaşlama ivmesini ifade eden değer. Taşıt takip modeline ait bir parametredir.
σ	0	1	Sürücü kusuru (0, mükemmel sürüşü ifade eder). Taşıt takip modeline ait bir parametredir.
τ	1	10	Sürücünün takip ettiği araç ile arasındaki olmasını istediği sn. cinsinden minimum mesafedir. Taşıt takip modeline ait bir parametredir.

Tablo 2' de belirtilen parametreler SUMO programında kullanılan orijinal isimleri değiştirilmeden İngilizce olarak bırakılmıştır. Alt ve üst sınır değerleri (l, u), fizik kuralları ve olabilecek makul uç sınırlar gözetilerek belirlenmiştir. P kümesi dışında kalan parametreler için SUMO'nun varsayılan değerleri kullanılmıştır.

3.3. Algoritmalar için başlangıç ayarları

Kullanılan ÖSA algoritmaları seçim işlemlerini gerçekleştirebilmek için çeşitli parametreler kullanılmaktadır. Bu çalışmaya ait ÖSA çözümleri Matlab 2020b ortamında gerçekleştirilmiş olup, genel olarak programın önerdiği varsayılan değerler kullanılmıştır. GKO ve ÖSA parametrelerine ait değerler Tablo 3'de sunulmuştur.

Tablo 3. Model parametre kümesine ait bilgiler

Algoritma	Parametreler
F-RANK	Grup Adedi=10 Optimizasyon Algoritması= lbfgs
NCA	Yaklaşma Metodu = exact İterasyon sayısı = 1000
RELIEFF	Sigma = 50 Kernel Fonksiyonu = Karesel eksponansiyel
GSR	Fit Metodu = exact Optimizasyon Algoritması= Quasi-newton
LASSO	Lamda=100 10-kat çapraz doğrulama
GKO	İterasyon sayısı = 100 Popülasyon = 30

4. ÖSA Hatalarının Karşılaştırılması

Bu bölümde çalışmadan elde edilen iki temel sonuç sunulup tartışılmıştır. Bunlar: (i) incelenen ÖSA'ların kalibrasyon için önerdikleri simülasyon modeli parametreleri ve (ii) önerilen parametreler ile kalibre edilen simülasyonların kalibrasyon hatalarıdır.

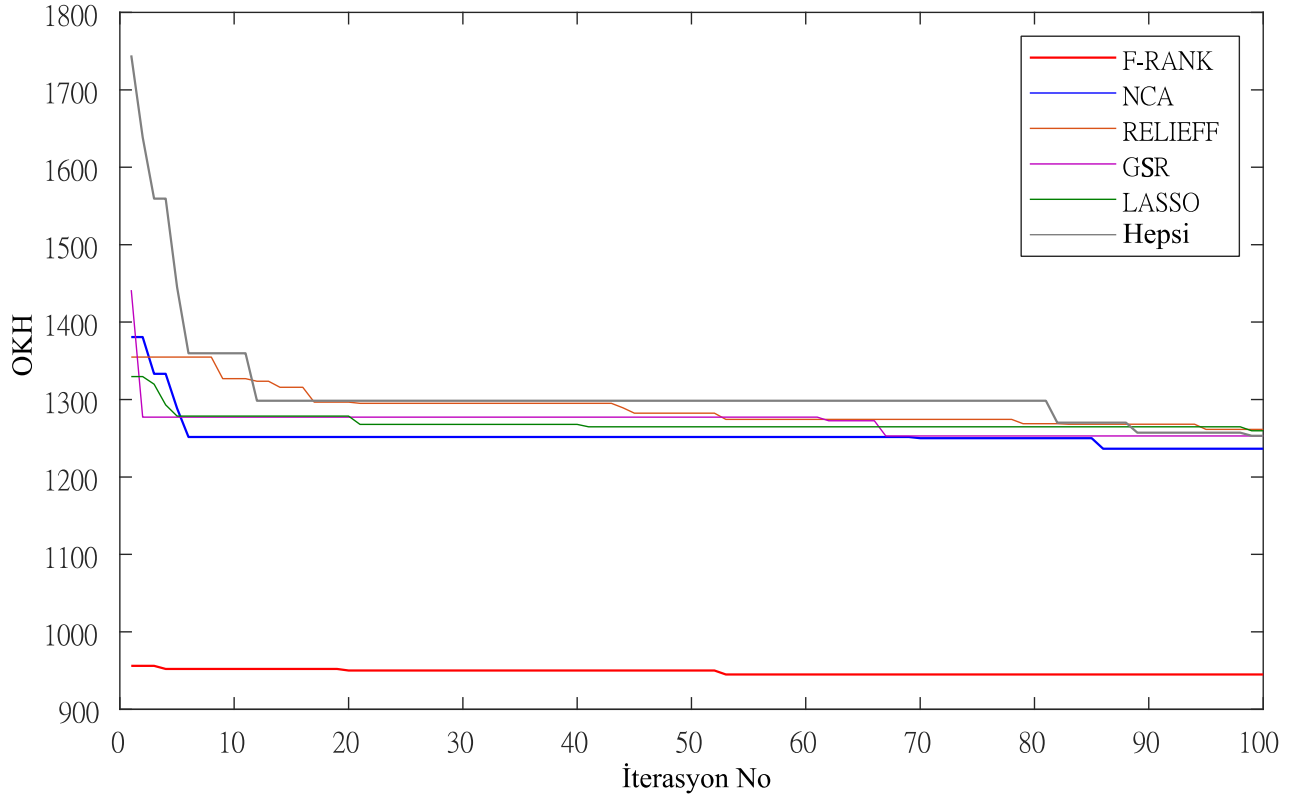
O kümesi ile eğitilen ÖSA'lar her parametre için belirli ağırlıklar tanımlamakta ve ağırlığı yüksek olan parametrelerin F kümesine seçilme şanslarını artmaktadır. Tablo 3'de, ÖSA'ların parametreler için atadıkları ağırlık değerlerinin 0-100 arasına normalize edilmiş değerleri sunulmaktadır. Normalizasyon farklı sınırlarda üretilen parametre ağırlıklarının karşılaştırılabilir hale getirmek için uygulanmış bir işlemdir.

Kalibrasyon hatasını düşürmek için en etkin parametrenin (özelliğin), *speedFactor* olduğu ve NCA dışında tüm yöntemlerin bu parametrenin ağırlığını 100 olarak tespit ettiği Tablo 3'den görülmektedir. *speedFactor*, yani hız faktörü taşıt hız dağılımları üstünde doğrudan etkiye sahip olduğu sebebiyle SUMO kalibrasyon işlemlerinde ilk ele alınması gereken parametre olarak öne çıkmaktadır. Diğer parametrelerin ağırlıkları incelendiğinde, *speedDev*'in (hız dağılımı) ve τ parametrelerinin genel olarak öne çıktığı anlaşılmaktadır. NCA *speedDev* için ağırlığı 100 olarak belirlediği fakat diğer ÖSA'ların önemli derecede düşük olduğu, hatta F-RANK'ın 1.93 e kadar ağırlığı düşürdüğü görülmektedir. Diğer taraftan τ parametresine önerilen ağırlıkların *speedDev*'e kıyasla daha uniform dağıldığı anlaşılmaktadır. Kalan parametreler incelendiğinde en yüksek ağırlığın, NCA tarafından *accel*'e atandığı görülmekte ve diğerlerinin dikkate değer ağırlıklara sahip olmadığı belirlenmiştir. Tablo 4 sonuçları genel olarak yorumlandığında, NCA dışındaki algoritmaların yaklaşık benzer eğilimler gösterdiği, hız faktörünün, hız dağılımının ve τ 'nun öne çıkan parametreler olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır.

Tablo 4. ÖSA'ların önerdikleri parametre ağırlıkları

ÖSA	<i>speedFactor</i>	<i>speedDev</i>	<i>minGap</i>	<i>lcStrategic</i>	<i>lcSpeedGain</i>	<i>minGap</i>	<i>accel</i>	<i>decel</i>	σ	τ
F-RANK	100.00	1.93	0.16	2.11	0.76	0.16	0.33	0.09	0.00	22.42
NCA	88.36	100.00	6.12	2.16	7.17	6.12	23.13	0.00	35.70	24.50
RELIEFF	100.00	11.79	2.25	3.98	0.18	2.25	5.79	0.00	2.31	38.32
GSR	100.00	37.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.98	0.00	0.03	4.63
LASSO	100.00	27.78	1.99	0.00	0.00	1.99	0.00	1.08	0.00	16.12

Farklı ÖSA'ların önerdikleri F kümesinin eleman çeşitliliği sağlanması ve aynı zamanda algoritmaların belirli düzeyde önemli gördüğü parametrelerin analiz edilmesi amaçlanarak $\lambda=5$ olarak belirlenmiştir. Bu değerin belirlenmesi normalizasyon sonucunda oluşan Tablo 4'ün incelenmesi sonucunda bu çalışmada için belirlenmiş bir değerdir. Bu ÖSA'ların belirledikleri ağırlık değerlerinin $\lambda=5$ eşliğine göre filtrelenmesi sonucunda seçilen parametreler Tablo 4'de gri renk ile boyanarak gösterilmiştir. Örneğin, F-RANK için $F = \{speedFactor, \tau\}$ olarak tespit edilmiştir. En fazla parametre öneren algoritma NCA olmuş ve *lcStrategic* haricindeki bütün parametreleri F kümesine dâhil etmiştir.



Şekil 5 Optimizasyon sürecinde ÖSA hata değerleri

Şekil 5'de ÖSA'lar tarafından önerilen parametrelerin kalibre edilmesi sürecinde, GKO iterasyonlarına bağlı OKH'ların değişimi resmedilmiştir. Optimizasyon süreci sonunda oluşan hatalar incelendiğinde, en düşük hatanın F-RANK algoritmasının önerdiği parametrelerin kalibre edilmesiyle elde edildiği ve diğer algoritma hatalarının F-RANK'tan önemli miktarda fazla olduğu görülmüştür. Optimizasyonun başlangıcında en yüksek hatanın ise bütün parametrelerin, yani P kümesinin, (Şekil 5 Gri çizgi) kalibre edilmesi sürecinde oluştuğu anlaşılmıştır. F-RANK dışındaki ÖSA'lar incelendiğinde önemli bir farkın oluşmadığı sadece NCA hata değerinin bir miktar pozitif ayrıştığı gözlenmiştir.

Bu sonuçlara göre, simülasyon modelinde yer alan tüm parametrelerin kalibre edilmesinin hem işlem karmaşıklığı doğurduğu hem de kalibrasyon performansını düşürdüğü anlaşılmaktadır. Diğer taraftan OHK en düşük olan F-RANK'ın kalibre edilecek parametre sayısını önemli miktarda düşürdüğü böylece işlem karmaşıklığını azalttığı, dahası OHK hatalarda önemli düzeyde iyileşme yarattığı anlaşılmaktadır.

5. Sonuç

Trafik simülasyon modelleri, büyük ve detaylı yol ağlarını düşük maliyetle detaylı biçimde analiz edilmesini sağlayan önemli trafik mühendisliği araçlarıdır. Fakat incelenen bölge için kalibre edilmemeleri halinde, ürettikleri sonuçlar hatalı kararların alınmasına sebep olacaktır. Diğer taraftan, simülasyon modellerinin sağladığı çok sayıda parametre bulunmakta ve bunların tümünü kalibre etmek kalibrasyon sürecini karmaşık hale getirmektedir. Bu çalışmada, kalibre edilecek SUMO model parametre sayısını azaltmak için farklı özellik seçim algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmalar LHK ile oluşturulmuş veri kümesiyle eğitilmiş ve parametre ağırlıkları rasyonel bir yaklaşımla tespit edilmiştir. Son aşamada, detaylı trafik verisine sahip bir yol koridoru için kalibrasyon işlemleri GKO kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon için seçilen zaman periyodunun düşük ve yüksek trafik akım değerlerini içermesine de dikkat edilmiştir. Analizler sonucunda, F-RANK özellik seçim algoritmasının önerdiği hız faktörü ve τ parametreleriyle SUMO'nun eğitilmesinin kalibrasyon performansını önemli düzeyde artırdığı kanıtlanmıştır. Diğer bir ifadeyle, kalibrasyon işlemi öncesinde ÖSA

kullanılması simülasyon doğruluğunu önemli düzeyde arttıracak potansiyele sahip bir işlem olduğu gösterilmiştir. Önerilen model parametreleri SUMO için kısıtlı olsa da diğer simülasyon programlarının kalibrasyonu için bu yaklaşımın kullanılması yararlı olacaktır. İleri çalışmalarda, diğer önemli simülasyon programları için benzer deneyler yapılabilir, farklı tip yol kesimleri için (Kavşaklar, şehir içi yollar, vb.) kalibrasyon çalışmaları yapılabilir. Böylece, farklı bölgelerde çalışan uygulamacı ve araştırmacılar için kalibrasyon sürecinin kısaltılmasına katkı sağlanabilir.

Referanslar

- Arkatkar, S., Velmurugan, S., Puvvala, R., Ponnu, B., & Narula, S. (2016). Methodology for simulating heterogeneous traffic on expressways in developing countries: A case study in India. *Transportation Letters*, 8(2), 61–76. <https://doi.org/10.1179/1942787515Y.0000000008>
- Azam, M., Puan, O. C., Hassan, S. A., & Mashros, N. (2019). Calibration of microsimulation model for tight urban diamond interchange under heterogeneous traffic. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 527(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/527/1/012077>
- Balakrishna, R., Antoniou, C., Ben-Akiva, M., Koutsopoulos, H. N., & Wen, Y. (2007). Calibration of microscopic traffic simulation models: Methods and application. *Transportation Research Record*, 1999(1), 198–207. <https://doi.org/10.3141/1999-21>
- Ciuffo, B., Punzo, V., & Montanino, M. (2014). Global sensitivity analysis techniques to simplify the calibration of traffic simulation models. Methodology and application to the IDM car-following model. *IET Intelligent Transport Systems*, 8(5), 479–489.
- Essa, M., & Sayed, T. (2015). Simulated traffic conflicts: Do they accurately represent field-measured conflicts? In *Transportation Research Record* (Vol. 2514, pp. 48–57). <https://doi.org/10.3141/2514-06>
- Ge, Q., & Menendez, M. (2014). An efficient sensitivity analysis approach for computationally expensive microscopic traffic simulation models. *International Journal of Transportation*, 2(2), 49–64.
- Kira, K., & Rendell, L. A. (1992). A practical approach to feature selection. In *Machine learning proceedings 1992* (pp. 249–256). Elsevier.
- Li, G.-Z., Meng, H.-H., Yang, M. Q., & Yang, J. Y. (2009). Combining support vector regression with feature selection for multivariate calibration. *Neural Computing and Applications*, 18(7), 813–820.
- Lopez, P. A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y.-P., Hilbrich, R., Lücken, L., Rummel, J., Wagner, P., & Wießner, E. (2018). Microscopic traffic simulation using sumo. *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2575–2582.
- McKay, M. D., Beckman, R. J., & Conover, W. J. (1979). A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics*, 21(2), 239–245. <https://doi.org/10.2307/1268522>
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46–61. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
- Rakha, H., Hellenga, B., Van Aerde, M., Perez, W., Aerde, M. Van, Perez, W., Van Aerde, M., & Perez, W. (1996). Systematic verification, validation and calibration of traffic simulation models. *75th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC*.
- Rasmussen, C. E. (2003). Gaussian processes in machine learning. *Summer School on Machine Learning*, 63–71.
- Saeyns, Y., Inza, I., & Larrañaga, P. (2007). A review of feature selection techniques in bioinformatics. *Bioinformatics*, 23(19), 2507–2517. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btm344>
- Tibshirani, R. (1996). Regression shrinkage and selection via the lasso. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 58(1), 267–288.
- Vigneau, E., & Thomas, F. (2012). Model calibration and feature selection for orange juice authentication by 1H NMR spectroscopy. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 117, 22–30.
- Yang, W., Wang, K., & Zuo, W. (2012). Neighborhood component feature selection for high-dimensional data. *Journal of Computers*, 7(1), 162–168. <https://doi.org/10.4304/jcp.7.1.161-168>



SPI ve SPEI Yöntemleri ile Kuraklık Araştırması: Kırıkkale Örneği

Drought Investigation Using SPI and SPEI Methods: A Case Study in Kırıkkale

Gaye Aktürk¹, Utku Zeybekoğlu², Osman Yıldız²

^{1,3}Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71450 Kırıkkale, Türkiye
²Sinop Üniversitesi, Boyabat Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Boyabat, 57200 Sinop, Türkiye

Başvuru/Received: 09/04/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Kuraklık, çeşitli sosyal ve çevresel etkileri olan en önemli doğal afetlerden biridir. Bu nedenle, kuraklığı izlemek için özellikle uygun bir indis seçmek çok önemlidir. Standartlaştırılmış Yağış İndisi (SPI) ve Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndisi (SPEI) kuraklık izlemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yarı kurak özelliklere sahip Kırıkkale ilinde kuraklığın gelişimini ve özelliklerini incelemek amacıyla SPI ve SPEI yöntemleri kullanılarak kuraklık analizi yapılmıştır. Kırıkkale meteoroloji istasyonundan 1963-2018 yılları arasında aylık yağış ve sıcaklık verileri kullanılarak 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde SPI ve SPEI değerleri hesaplanmıştır. SPEI hesaplamasında potansiyel evapotranspirasyon (PET) değerleri hesaplanırken Thornthwaite ve Hargreaves modelleri kullanılmış ve iki farklı SPEI değeri elde edilmiştir. Sonuç olarak aynı zaman ölçeğinde tüm indisler arasında yüksek korelasyon değerleri elde edilmiştir. SPI ve SPEI yöntemlerinin çalışma alanında kuraklığın tespiti ve izlenmesinde uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır

Anahtar Kelimeler

“Kuraklık, SPI, SPEI, Thornthwaite Metodu, Hargreaves Metodu”

Abstract

Drought is one of the most important natural disasters with various social and environmental effects. Therefore, it is very important to choose a particularly suitable index for monitoring drought. Standardized Precipitation Index (SPI) and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) are widely used in drought monitoring. In this study, drought analysis was carried out using SPI and SPEI methods in order to examine the development and characteristics of drought in the city of Kırıkkale, which has semi-arid characteristics. SPI and SPEI values were calculated on 1, 3, 6, 9 and 12-month time scales by using monthly precipitation and temperature data from Kırıkkale meteorology station between 1963 and 2018. While calculating the potential evapotranspiration (PET) values in the SPEI calculation, Thornthwaite and Hargreaves models were used and two different SPEI values were obtained. As a result, high correlation values were obtained between all indices in the same time scale. It has been concluded that SPI and SPEI methods are applicable in the detection and monitoring of drought in the study area.

Key Words

“Drought, SPI, SPEI, Thornthwaite Method, Hargreaves Method”

1. Giriş

İklim değişikliği genel olarak, iklimin ortalama durumunda ya da onun değişkenliğinde onlarca ya da daha uzun yıllar boyunca süren istatistiksel olarak anlamlı değişimler olarak tanımlanabilir. Son yıllarda iklim değişikliği, hidrolojik çevrim, su kaynakları ile onların yerel-bölgesel-küresel yönetimi ve dağıtımı üzerinde gün geçtikçe daha fazla etkili olmakla birlikte dünyanın birçok bölgesinde su kıtlığı ve kuraklık olaylarının yaşanmasına neden olmaktadır (Türkeş, 2008a; Türkeş, 2008b; Şen, 2005). Günümüzde belirgin ve yaygın olarak meydana gelen su kıtlığı ve kuraklık olaylarının sıklığı ve yoğunluğu artmakta ve beraberinde sosyoekonomik açıdan birçok probleme neden olmaktadır. Hemen her ülkede özellikle su kalitesi hızla bozulma eğilimine girmiştir. Ortaya çıkan sorunlar zaman içerisinde hem kapsam olarak hem de boyut olarak çeşitlenmekte ve küresel boyutlarda önemli problemler teşkil etmektedir. Bu sorunlar günümüzde su kaynaklarının geliştirilmesi, kontrolü ve yönetiminde yeni yaklaşımlara ihtiyaç olduğunu ortaya çıkarmış ve uluslararası gündemde bu olgular ilk sıralara taşınmıştır.

Uluslararası çölleşme ile mücadele sözleşmesinde kuraklık için “*Kuraklık, yağışların kaydedilen normal düzeylerin önemli ölçüde altına düşmesi sonucu arazi ve su kaynakları ile üretim sistemlerini olumsuz olarak etkileyen ve ciddi hidrolojik dengesizliklere yol açan doğal bir olay*” şeklinde tanımlama yapılmıştır (WMO, 1997). Kuraklık için bu şekilde genel bir tanım verilmekle birlikte, neredeki suyun göz önüne alınacağına (örneğin; yağış, akış, zemin nemi, yeraltı suyu, baraj haznelerindeki su), hangi sürenin seçileceğine, eksikliğin aşması gereken değer için yapılan kabule ve kuraklığın kaplaması gereken bölge için seçilen büyüklüğe göre farklı tanımlamalara varılabilmektedir (Beyazıt ve Önöz, 2008). Genel olarak, yeryüzünün herhangi bir yerinde ve belli bir zaman süresince yağışın normalin ya da ortalamasının altında gerçekleşmesi kuraklığın birçok tanımında esas alınmış ve yağış eksikliği, uzun süre devam etmesi ve olumsuz etkilere sahip olması ise ortak terimler haline gelmiştir. Bu şekilde kuraklık olaylarının birbirinden farklı alanlarda etkili olması kuraklık tanımlamalarını genişletmiştir (Şen, 2009). Tüm dünyada yaygın olarak etkileri gözlenen kuraklık olayı meteorolojik kuraklık, tarımsal kuraklık, hidrolojik kuraklık ve sosyoekonomik kuraklık olarak dört farklı şekilde ele alınmaktadır. Meteorolojik kuraklık belirli bir bölgenin belli bir periyodun ortalamasına göre yağış miktarının azalması veya belirli bir zaman periyoduna ait normallerde meydana gelen sapmalar olarak tanımlanmakta olup, ilk görülen kuraklık türüdür (Anisfeld, 2010). Hidrolojik kuraklık, su kaynaklarının (yağışlar, yeraltı ve yüzey suları) beklenen normal seviyelerin ve ortalamaların altında kalması olarak tanımlanabilmekte ve meteorolojik kuraklık sona erdikten sonra dahi uzun bir süre varlığını sürdürebilmektedir. Bitkinin ihtiyaç duyduğu miktardaki suyun toprakta bulunmaması tarımsal kuraklığı işaret etmektedir (Kadioğlu, 2008). Kuraklığın tarıma, canlılara ve su kaynakları ile bu kaynaklardan faydalanması gereken endüstriler üzerindeki etkisi ise sosyoekonomik kuraklığı oluşturmaktadır (Anisfeld, 2010). Meteorolojik, hidrolojik ve tarımsal kuraklıktan kaynaklanabilecek olası etkilerin en aza indirilebilmesi için kuraklığın etkileyebileceği alanlar incelenerek, kuraklığın şiddeti ve süresine bağlı olarak gerekli planlamalar yapılarak kuraklığa hazırlıklı olunmalıdır (Mishra & Singh, 2010).

Kuraklık, belirli bir zaman periyodunda yağışların beklenen miktardan az olması, ihtiyacın altında su bulunması gibi tanımlamaların ortak noktası olan su eksikliği sebebiyle meydana gelmektedir. Kuraklık, farklı çevre ve meteorolojik şartlar altında oluşup, canlıların olumsuz etkilenmesine, can ve mal kayıplarına sebep olmaktadır (Beyazıt & Önöz, 2008). Karmaşık bir yapıya sahip olan ve sayısallaştırılması zor olan kuraklık; frekans, süre, şiddeti ve etkilediği alan gibi niteliksel özelliklerle karakterize edilebilir. Alansal boyutu ile değerlendirildiğinde diğer doğal afetlerden çok daha büyüktür. Özellikle diğer hidrolojik afetlerle karşılaştırıldığında, gelişim bakımından yavaşlığının yanı sıra kuraklığın başladığı ve bittiği anı tespit etmek çok zordur. Genellikle yalnızca insan faaliyetleri ve çevre etkilendiğinde kuraklığı belirlememiz mümkündür (Burton, vd., 1978; Vicente-Serrano vd., 2005). Bu sebeple, kuraklık olaylarını belirlemek, tahmin etmek ve izlemek kolay olmamaktadır. Kuraklıkların alansal ve zamansal boyutlarını açıkça belirlenmesine ait güçlüklerin beraberinde, kuraklığın farklı zaman periyodlarında izlenmesi ile ilgili de önemli problemler mevcuttur. Örneğin, su kaynaklarının yağış eksikliğine karşı farklı tepkileri, zaman ölçeklerinin bir fonksiyonu olarak belirgin bir şekilde değişmektedir (Changnon & Easterling, 1989; Elfatih vd., 1999; Pandey & Ramasastri, 2001).

Kuraklık olaylarının izlenebilmesi için araştırmacılar tarafından çok çeşitli indisler geliştirilmiş olup, bu indisler yağış gibi tek bir meteorolojik parametrenin kullanımının yanı sıra birçok değişkeni içeren yöntemlerin de kullanımına imkan vermektedir (Mckee vd., 1993; Palmer, 1965; Vicente-Serrano vd., 2010; Willeke vd., 1994; Tsakiris & Vangelis, 2005; Gibbs & Maher, 1967; Shukla ve Wood, 2008; Wu vd., 2001; Byun & Wilhite, 1999). Kuraklık indisleri, kuraklık olaylarının zamanda ve etki alanında sürekli izlenmesine, şiddetinin ve alansal boyutunun nicelik bakımından değerlendirilmesine ve daha erken tanımlanmasına yani kuraklığın tahmin edilmesine ve mevcut iklim altında yönetim stratejilerinin geliştirilmesine olanak sağlaması açısından çok önemlidir. Söz konusu kuraklık indisleri arasında Standartlaştırılmış Yağış İndisi (SPI) ve Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndisi (SPEI) çoklu zaman ölçeklerinde kullanılabilme, çeşitli kuraklık türlerini temsil edebilme ve kuraklık niteliklerindeki (şiddet, süre, frekans ve etki alanı) değişiklikleri daha iyi yansıtabilme özelliklerine sahip olduklarından literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (Mishra & Singh, 2010). SPI ve SPEI'nin teorileri benzer olup, SPI ve SPEI'nin hesaplamasında kullanılan parametreler arasında farklılıklar vardır. SPI; sıcaklık, bağıl nem, buharlaşma, rüzgar hızı, vs. gibi kuraklık koşullarının oluşmasında etkili olan diğer değişkenleri dikkate almayıp, sadece yağış parametresini tek bir sayısal değere dönüştürerek, farklı iklimlere sahip bölgelerdeki kuraklıkları tanımlamak ve izlemek amacıyla geliştirilmiştir (Mckee vd., 1993; Çamalan vd., 2017). Yaygın olarak kullanılan SPI, devam eden periyotta yağış eksikliklerini belirlemekte ve yağış azalmasını çoklu zaman ölçümlerinde farklı zaman dilimlerinde izleme olanağı vermektedir. Ayrıca, SPI ile farklı zaman dilimlerinde kurak ve nemli süreler hesaplanabilir ve yağış açığının çeşitli su kaynakları üzerindeki etkileri

de belirlenebilir (Wang vd., 2017). Yakın zamanda, Vicente-Serrano ve diğerleri (2010) tarafından yeni bir kuraklık indisi olarak önerilen SPEI ise, yağış parametresine ek olarak kullanılan potansiyel evapotranspirasyon (PET) parametresi arasındaki kümülatif farka dayanarak hesaplanabilir ve böylelikle yüzey suyu dengesindeki değişimi kapsamlı bir şekilde yansıtılabilir (Zhang vd., 2017). SPEI, özellikle Palmer Kuraklık Şiddet İndisi (PDSI)'nin sıcaklık dalgalanmaları ve eğilimlerinin neden olduğu evapotranspirasyonda oluşan değişimlere hassasiyeti ile SPI'nın farklı zaman ölçeklerinde ve basit hesaplanabilmesi avantajlarını birleştirir (Wang vd., 2017).

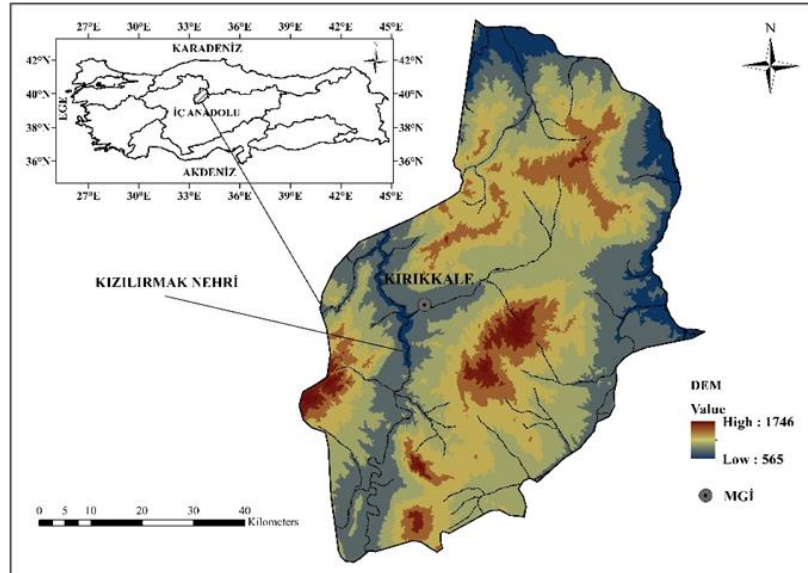
Son yıllarda iklim değişikliği üzerine yapılan birçok çalışmada, hızla gelişen endüstrileşme ile birlikte küresel sıcaklıkta önemli artışların meydana geldiği ortaya konulmuştur (Citakoglu vd., 2019). Çeşitli iklim modelleri ile yapılan tahminlere göre 21. yüzyıl sonunda sıcaklıklarda belirgin artışların meydana geleceği öngörülmektedir (IPCC, 2001, 2007, 2013, 2019; SYGM, 2016). Bu sebeple, kuraklığın doğru bir şekilde değerlendirilmesi için küresel ısınma ile birlikte sıcaklıklarda meydana gelen artma trendi sonucu oluşan buharlaşmadaki artış göz ardı edilmemelidir. Dolayısıyla SPEI yöntemi, kuraklık izlemede SPI yönteminden belirgin şekilde daha iyi olduğu düşünülmektedir (Mathbout vd., 2018). Ancak, SPEI yönteminin özellikle kurak bölgelerde uygulanabilirliği sınırlı kalmaktadır (Shaowei vd., 2003). Diğer taraftan, SPI yöntemi halen tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonuç olarak, kuraklık izlemede SPI ve SPEI yöntemleri arasındaki fark ve bölgesel uygulanabilirliği hala tartışmaya açık konulardır (Pei vd., 2020).

Ülkemizde yarı kurak iklim özellikleri görülen İç Anadolu Bölgesi'nde yıllık yağış yüksekliği ülke ortalamasının altında kalmakta ve kuraklıktan en fazla etkilenen bölgelerin başında gelmektedir. Bu çalışmada, İç Anadolu Bölgesinde yer alan Kırıkkale ilinde meydana gelen kuraklıkların zaman içerisindeki gelişimini ve özelliklerini incelemek amacıyla SPI ve SPEI yöntemleri ile kuraklık analizi yapılmıştır. Çalışmada, Kırıkkale meteoroloji istasyonuna ait 1963-2018 yılları arasındaki Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden (MGM) elde edilen mevcut aylık ortalama yağış verisi, aylık ortalama sıcaklık verisi, aylık maksimum sıcaklık verisi ve aylık minimum sıcaklık verisi kullanılarak, 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde SPI ve SPEI değerleri hesaplanmıştır. Geçmiş dönemlerde meydana gelen kuraklıkların karakteristik özellikleri incelenmiş, seçilen indislerin bölge için uygulanabilirliği, performansları ve arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir. Ayrıca, söz konusu indislerden SPEI hesabında PET değerleri için Thornthwaite ve Hargreaves modelleri kullanılarak 2 farklı SPEI değeri elde edilmiştir (Thornthwaite, 1948; Hargreaves & Samani, 1985). Burada elde edilen kuraklık tahmini sonuçlarının, çalışma alanındaki kuraklık risk analizi ve yönetimi çalışmaları için önemli bilgiler sağlayacağı düşünülmektedir.

2. Materyal ve Method

2.1. Çalışma Alanı ve Veri

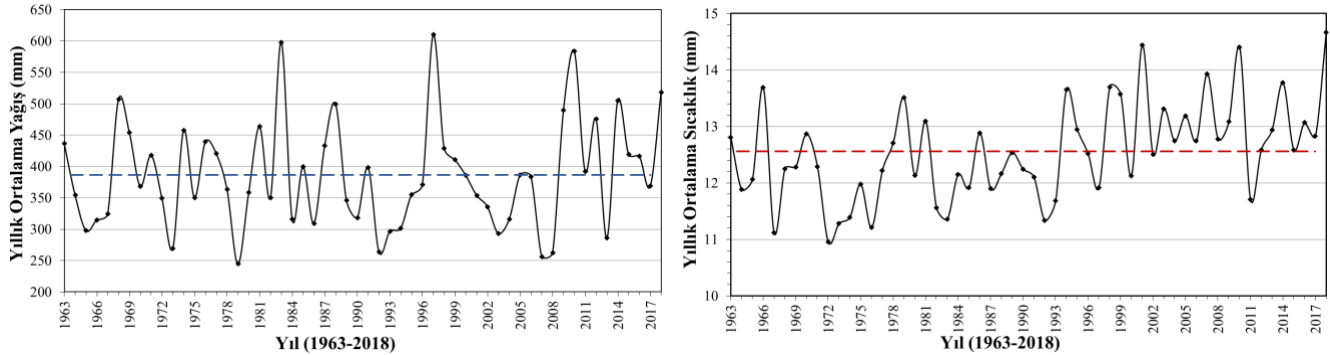
Çalışma alanı olarak seçilen Kırıkkale ili, yarı kurak iklim özellikleri görülen İç Anadolu bölgesinin Orta Kızılırmak bölümünde 33°20'-34°25' doğu meridyenleri, 39°20'-40°20' kuzey paralelleri arasında yer almaktadır. Yaklaşık olarak 4694 km² yüzölçümüne sahip olan Kırıkkale ilinde, kot yüksekliği 565-1746 m aralığında değişmektedir (Şekil 1). Kırıkkale'de kış ayları soğuk ve yağışlı, yaz ayları ise sıcak ve kurak geçmektedir.



Şekil 1. Kırıkkale İlının Coğrafi Konumu ve Yükseklik Haritası

Çalışma alanında yıllık ortalama yağış miktarı 386 mm civarındadır. Bu değer, ülke geneli için hesaplanan yıllık ortalama yağış miktarının yaklaşık olarak %67'sine karşılık gelmektedir. Toplam yıllık yağış değeri yıldan yıla farklılık göstermekte olup, minimum yağış 1979 yılında 245 mm iken, maksimum yağış 1997 yılında 610 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 2). Bölgede en fazla yağış ilkbahar mevsiminde nisan ve mayıs aylarında, en az yağış ise yaz mevsiminde temmuz ve ağustos aylarında görülmektedir. Aylık ortalama

yağış mayıs ayında 54 mm civarında iken, temmuz ve ağustos aylarında yaklaşık olarak 10 mm'ye kadar düşmektedir. Kış mevsiminden sonra en yağışlı mevsimin ilkbahar mevsimi olduğu gözlemlenmiştir. Kırıkkale'de yıllık sıcaklık ortalaması ise 12.6 °C'dir (Şekil 2). En sıcak aylar temmuz ve ağustos, en soğuk aylar ise ocak ve şubat olup, bölgede en yüksek ve en düşük ortalama sıcaklık değeri arasındaki fark 20 °C'nin üzerindedir. Aylık ortalama sıcaklık temmuz ve ağustos aylarında yaklaşık olarak 24~25 °C iken, ocak ve şubat aylarında 0~2 °C civarına düşmektedir. Özellikle bölgede 2000'li yıllardan itibaren sıcaklıkta belirgin artışlar söz konusudur.



Şekil 2. Kırıkkale Yıllık Yağış ve Sıcaklık Zaman Serileri

Bu çalışmada, MGM'den elde edilen Kırıkkale meteoroloji istasyonuna ait 1963-2018 yılları arasındaki 56 yıllık dönemde mevcut aylık ortalama yağış, aylık ortalama sıcaklık, aylık maksimum sıcaklık ve aylık minimum sıcaklık verileri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan verilere ait istatistiksel bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kırıkkale Meteoroloji İstasyonundan Elde Edilen Verilere Ait İstatistiksel Bilgiler

	Aylık Toplam Yağış (mm)	Aylık Ortalama Sıcaklık (°C)	Aylık Minimum Sıcaklık (°C)	Aylık Maksimum Sıcaklık (°C)
Ortalama	32.18	12.56	0.49	25.70
Maksimum	172.70	28.70	16.80	41.80
Minimum	0.00	-5.00	-22.40	3.90
Standart Sapma	27.03	8.55	8.47	9.13
Çarpıklık	1.07	-0.07	-0.20	-0.31
Basıklık	1.33	-1.20	-0.71	-1.08

2.2. Yöntem

2.2.1. Swed-Eisenhart (run) test

Run Testi (Swed & Eisenhart, 1943), verilerin aynı popülasyondan geldiği ve birbirinden bağımsız olduğunu kontrol etmek amacıyla zaman serilerine uygulanan parametrik olmayan bir testtir. Bu testte verilerin homojenliği H_0 (homojen) veya H_1 (homojen değil) varsayımları kontrol edilir (Oliver, 1981). Gözlem serisinin homojenliğine Denklem 1'de hesaplanan Z değeri sonucunda karar verilir.

$$Z = \frac{r - \frac{N_a N_b + 1}{N_a + N_b}}{\sqrt{\frac{2N_a N_b (2N_a N_b - N)}{N^2 (N-1)}}} \quad (1)$$

Denklemden; Z; test sonucunu, N; veri sayısını, r; değişim (run) sayısını, N_a ; serinin ortanca değerinden küçük değerlerin sayısını, N_b ise ortancada büyük değerlerin sayısını ifade etmektedir. Elde edilen Z değeri $\pm 1,96$ arasında ise verilerin %95 güven aralığında H_0 varsayımının kabul edilerek ve verilerin homojen dağıldığı kabul edilir, aksi durumda H_1 hipotezi kabul edilmektedir (Swed ve Eisenhart, 1943; Toros, 1993).

Çalışmada, Kırıkkale istasyonuna ait gözlem değerlerinin homojenliği Run testi kullanılarak kontrol edilmiştir. %95 güven seviyesi için toplam yağış, ortalama sıcaklık, minimum sıcaklık ve maksimum sıcaklık serilerine ait Run testi sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Run testi sonuçlarına göre tüm Kırıkkale istasyonuna ait yağış ve sıcaklık serilerinde %95 güven düzeyinde H_1 varsayımının kabul edildiği belirlenmiştir.

Tablo 2. Meteorolojik Parametrelere Ait Run Testi Sonuçları

	Aylık Toplam Yağış	Aylık Ortalama Sıcaklık	Aylık Minimum Sıcaklık	Aylık Maksimum Sıcaklık
Ortanca	26.8	12.8	0.1	27.3
r	273	113	113	119
N	672	672	672	672
N _a	336	336	337	337
N _b	336	336	335	335
Z	-4.79	-17.14	-17.14	-16.68
Z _{kr}	±1.96	±1.96	±1.96	±1.96
Varsayım	H ₁	H ₁	H ₁	H ₁

2.2.2. Standartlaştırılmış yağış indisi (SPI) hesabı

Bu yöntem, farklı iklimlere sahip bölgelerdeki kuraklıkları tanımlamak ve izlemek amacıyla 1993 yılında McKee ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir (McKee vd., 1993). İhtiyaç duyulan tek meteorolojik değişken yağış değerlerine bağlı olarak kolay hesaplanabilen SPI ile herhangi bir bölgedeki belirli bir zaman aralığında kurak veya sulak olaylardaki anormallikler belirlenebilir (Sırdaş, 2002). Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) tarafından dünya çapında kullanılması tavsiye edilen indislerden biri olan SPI, devam eden periyotta yağış eksikliklerini hesaplamakta ve yağış azalmasını çoklu zaman ölçümlerinde farklı zaman dilimlerinde izleme olasılığını vermektedir. Ayrıca, yöntem ile yağışta meydana gelen azalmanın yeraltı suyu, su biriktirme haznesi depolaması, zemin nemi, kar yığını ve akarsu gibi hidrolojik sistemler üzerindeki etkileri belirlenebilmektedir (Sırdaş, 2002). İndisin spesifik olarak hesaplanma yöntemi aşağıdaki gibidir:

Thom (1958), Gama dağılımının iklimsel yağış serilerini en iyi temsil eden dağılım olduğunu ortaya koymuştur. Gama dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$g(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}; \quad x, \alpha, \beta > 0 \quad (2)$$

Burada x yağış toplamı, $\Gamma(\alpha)$ Gama fonksiyonu ve sırasıyla α ve β şekil ve ölçek parametrelerini temsil etmektedir. Optimum α ve β parametrelerinin tahmininde maksimum olasılık yöntemi kullanılır (Guttman, 1999; Yuan & Zhou, 2008; Liu vd., 2012; Bacanlı & Kargı, 2019).

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right), \quad \beta = \frac{\bar{x}}{\alpha}, \quad A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (3)$$

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (4)$$

$t=x/\beta$ olduğu zaman, bu eşitlik eksik gamma fonksiyonunu oluşturmaktadır (Sırdaş, 2002).

$$G(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (5)$$

Gamma fonksiyonu $x=0$ için tanımsız olur ve yağış dağılımı sıfır değerleri de içerebilir. Bu durumda toplam olasılık dağılımı aşağıdaki şekilde yazılabilir (Sırdaş, 2002);

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (6)$$

Burada “q” sıfırın olasılığıdır ve eğer “m” yağış zaman serisinde sıfırların sayısı ise “q=m/n” olarak tahmin edilir. Kümülatif olasılık $H(x)$, standartlaştırılmış normal dağılıma dönüştürülür. Böylece, ortalaması sıfır (0) ve varyans değeri ise bir (1) olan SPI değerini ifade eden standart normal rastgele değeri Z değeri elde edilir. Kümülatif olasılık, Z adı verilen standart normal rastgele değişkene aşağıdaki formüllerle dönüştürülebilir (Sırdaş, 2002; Yacoub & Tayfur, 2020; Abramowitz & Stegun, 1965).

$$SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right), \quad t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(H(x))^2} \right)} \quad 0 < H(x) < 0.5 \quad (7)$$

$$SPI = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right), \quad t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1.0 - H(x))^2} \right)} \quad 0.5 < H(x) < 1.0 \quad (8)$$

Burada sabitler, $c_0=2.515517$, $c_1=0.802853$, $c_2=0.010328$, $d_1=1.432788$, $d_2=0.189269$ ve $d_3=0.001308$ şeklinde tanımlanabilir.

2.2.3. Standartlaştırılmış yağış evapotranspirasyon indisi (SPEI) hesabı

Bu yöntem esasında PDSI'nin buharlaşma talebindeki değişikliklere hassasiyeti ile SPI'nın çoklu zaman ölçeği ve basit hesaplanabilme özellikleri bir araya getirilerek 2010 yılında Vicente-Serrano ve diğerleri tarafından önerilmiştir (Vicente-Serrano vd., 2010). Kuraklık olaylarını tanımlamak, belirlemek ve izlemek amacıyla geliştirilen SPEI, küresel ısınmanın kurak şartlar üzerindeki etkilerini ve sonuçlarını açıklama konusunda da etkindir. Yağış parametresine ek olarak, sıcaklık parametresine bağlı olarak elde edilen PET değerlerini de kapsayan SPEI'nın hesap adımları, SPI ile aynıdır (Çamalan vd., 2017; Yüce & Eşit, 2020). Su dengesi ilkesine dayanan SPEI, bölgenin kurak ve nemli koşullarını değerlendirmek amacıyla yağış (P) ve PET arasındaki farkı giriş şartı olarak kullanılarak hesaplanmaktadır (Tirivarombo vd., 2018). İklim-su dengesi matematiksel olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (9)$$

Burada, D_i analiz edilen (i) aydaki su fazlası veya eksikliği (mm), P_i (i) ayındaki yağış (mm) ve PET_i (i) ayındaki potansiyel evapotranspirasyondur (mm). İlk olarak, D serisinin bulunabilmesi için PET değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Yirminci yüzyıldan itibaren birçok PET modeli geliştirilmiş olsa da bunlar arasında en yaygın olarak kullanılanlar Thornthwaite, Hargreaves ve Penman-Monteith modelleridir (Thornthwaite, 1948; Hargreaves & Samani, 1985; Allen vd., 1998; Beguería vd., 2013; Ogunrinde vd., 2020). Çoğu PET modelinin hesaplamaları için bir veya daha fazla hidrometeorolojik değişken gerekmektedir. Bu çalışmada PET değerleri Thornthwaite ve Hargreaves modelleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Thornthwaite (1948) seçilen istasyonun aylık ortalama sıcaklık değerlerini ve istasyonun bulunduğu enlem bilgilerini gerektiren verilere ihtiyaç duyulan bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem ile aylık PET değerleri aşağıdaki adımlar izlenerek hesaplanabilir.

$$PET(T) = 16 * \left(\frac{10*T}{I}\right)^A * G \quad (10)$$

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \quad (11)$$

$$I = \sum_1^{12} i \quad (12)$$

$$A = 6.7510 * 10^{-7} * I^3 - 7.7110 * 10^{-5} * I^2 + 1.791210 * 10^{-2} * I + 0.49239 \quad (13)$$

Burada, $PET(T)$; Thornthwaite yöntemi ile elde edilen potansiyel evapotranspirasyon (mm), i aylık sıcaklık indisi, T aylık ortalama sıcaklık ($^{\circ}C$), I yıllık sıcaklık indisi, A bir parametre, G ise enlem düzeltme katsayısı olarak tanımlanmaktadır (Thornthwaite, 1948).

Hargreaves ve Samani (1985) PET değerini sadece hava sıcaklığı ve radyasyona iliştiiren kolay bir metot geliştirmiştir. Bu yöntemde günlük PET değerleri hesaplanmaktadır ve bunun için ortalama maksimum ve ortalama minimum sıcaklık verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Hargreaves-Samani denkleminin orijinali aşağıdaki gibidir (Hargreaves & Samani, 1985; Çobaner vd., 2018; Droogers & Allen, 2002):

$$PET(H) = 0.0023 * 0.408 * R_a * (T_{max} - T_{min})^{0.5} * \left(\frac{T_{max}+T_{min}}{2} + 17.8\right) \quad (14)$$

Burada, $PET(H)$; Hargreaves yöntemi ile elde edilen potansiyel evapotranspirasyon (mm), R_a extraterrestrial radyasyon ($MJ/m^2/gün$), T_{max} maksimum sıcaklık ($^{\circ}C$), T_{min} minimum sıcaklık ($^{\circ}C$) olarak tanımlanmaktadır (Hargreaves ve Samani, 1985; Çobaner vd., 2018).

SPEI, SPI'deki ile aynı adımlar kullanılarak hesaplanabilir ve log-lojistik dağılımının standart normal dağılıma dönüştürülmesiyle belirlenebilir (Kumanlioglu, 2020). Hesaplanan D veri serisine uyması için Denklem 15'te verilen üç parametrelili log-lojistik olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılmaktadır (Pei vd., 2020).

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2} \quad (15)$$

Denklemdaki α , β ve γ parametreleri sırasıyla ölçek, şekil ve orijin parametreleridir. Belirli bir zaman ölçeğinin kümülatif dağılım fonksiyonu $F(x)$, Denklem 16'da verilmiştir. SPEI ise Denklem 17'de gösterildiği üzere $F(x)$ 'in standartlaştırılmış değerleri olarak kolaylıkla bulunabilir (Vicente-Serrano vd.,2010; Pei vd., 2020; Abramowitz & Stegun, 1965):

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma}\right)^{\beta}\right]^{-1} \quad (16)$$

$$SPEI = w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \quad (17)$$

$$W = \sqrt{2 \ln(p)} \quad (18)$$

Denklem 18’de (p), belirlenen bir D değerini aşma olasılığı olup, $p = 1 - F(x)$ (Pei vd., 2020). Eğer $p > 0.5$ ise p , $(1 - p)$ ile yer değiştirir ve hesaplanan SPEI’nin işareti tersine çevrilir. Denklem 17’deki sabitler, $c_0= 2.515547$, $c_1= 0.802853$, $c_2=0.010328$, $d_1= 1.432788$, $d_2= 0.189269$, $d_3= 0.001308$ olarak belirlenmiştir. Verilen hesaplama yöntemi sonucunda ortalama değeri sıfır ve standart sapması bir olan SPEI değerleri elde edilir (Pei vd., 2020).

Çalışmada kavram karışıklığı yaşanmaması amacıyla PET(T) değerleri kullanılarak elde edilen SPEI değerleri SPEI(T) ve PET(H) değerleri kullanılarak elde edilen SPEI değerleri ise SPEI(H) olarak ifade edilmiştir. SPI ve SPEI dünya çapında yapılan araştırmalarda yaygın olarak kullanılmakta olup, 1, 3, 6, 12, 24 ve 48 ay gibi çeşitli zaman ölçeklerinde hesaplanarak farklı kuraklık türlerini temsil etmektedir. Tablo 3’te çalışmada kullanılan kuraklık indislerine ait aşırı nemlilikten aşırı kuraklığa kadar değişen nemli ve kuraklık sınıflandırması verilmiştir (Li vd., 2015; Kassaye vd., 2021; Salvacion vd., 2021). Çalışmanın amacı doğrultusunda nemli durumlar tek bir sınıf olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, SPI ve SPEI değerleri nemli, normale yakın ve kurak şeklinde 3 farklı sınıfa ayrılmıştır. Diğer taraftan, kuraklıklara ait karakteristik özellikler incelenirken orta kurak, şiddetli kurak ve aşırı kurak durumlar üzerinde durulmuştur.

Tablo 3. SPI ve SPEI Metoduna Göre İndis Değerleri ve Sınıflandırılması

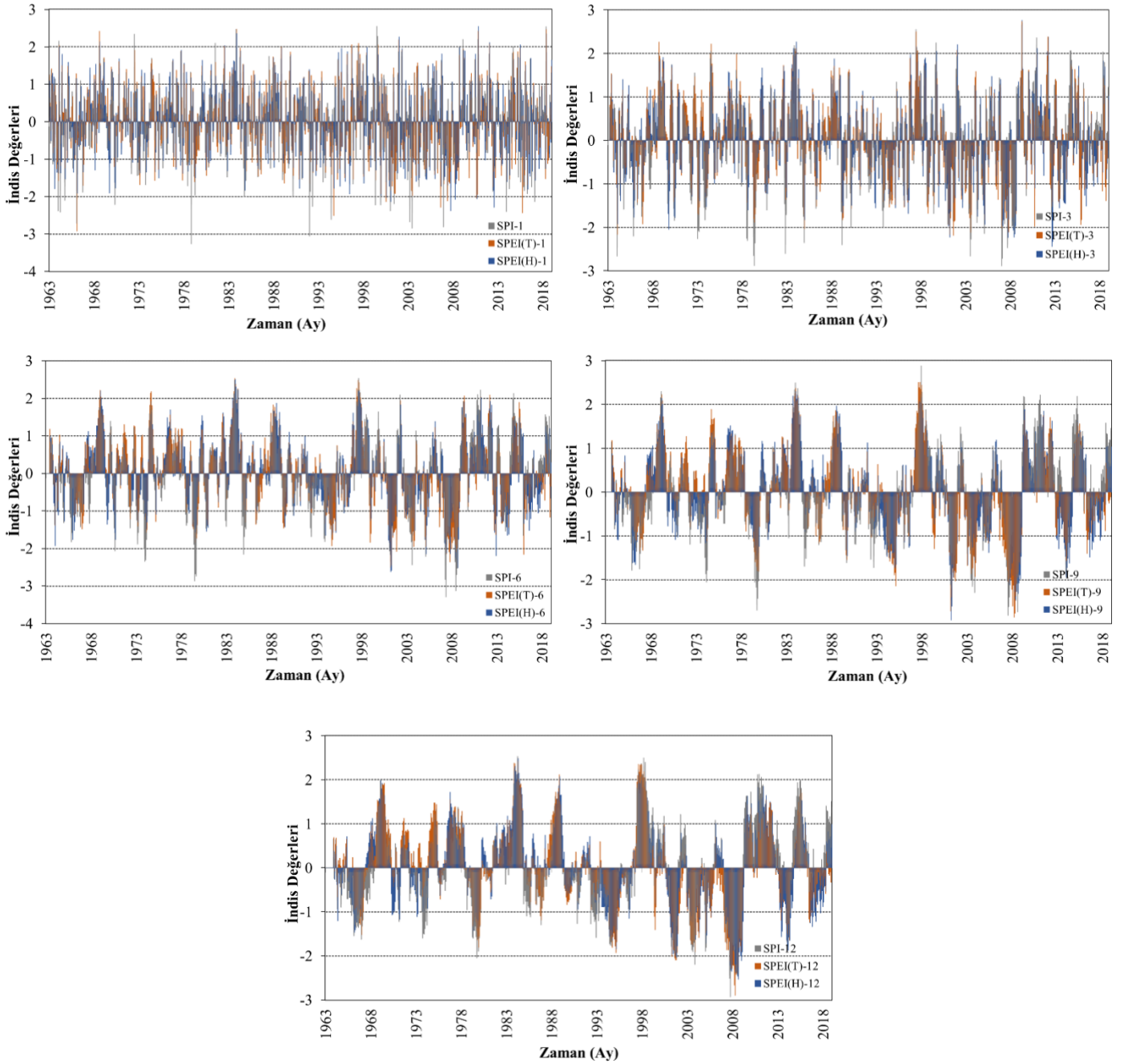
Sınıflandırma	SPEI	SPI
Aşırı Nemli	≥ 2	≥ 2
Çok Nemli	1.5 ~ 1.99	1.5 ~ 1.99
Orta Nemli	1 ~ 1.49	1 ~ 1.49
Normale Yakın	-0.99 ~ 0.99	-0.99 ~ 0.99
Orta Kurak	-1 ~ 1.49	-1 ~ 1.49
Şiddetli Kurak	-1.5 ~ -1.99	-1.5 ~ -1.99
Aşırı Kurak	≤ -2	≤ -2

3. Araştırma ve Bulgular

Bu çalışma, İç Anadolu Bölgesinde yer alan Kırıkkale ilinde 1963-2018 yılları arasındaki dönemde meydana gelen kuraklık olaylarının farklı zaman dilimlerindeki gelişimini izlemek ve karakteristik özelliklerini (kuraklık sıklığı, kuraklık süresi ve kuraklık şiddeti) tanımlamak amacıyla, SPI ve SPEI değerleri hesaplanarak kuraklık analizi yapılmıştır. Çalışma kapsamında, ilk olarak SPI ve SPEI yöntemleri kullanarak elde edilen geçmiş dönemlerde gözlemlenen kuraklık olaylarının karakteristik özellikleri farklı zaman ölçeklerinde incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Daha sonra ise farklı zaman ölçeklerinde bulunan indis değerleri arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir.

3.1. Kuraklıkların Zamansal Değişimi ve Kuraklık Özelliklerinin İncelenmesi ve Karşılaştırılması

1, 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman ölçekleri için hesaplanan SPI ve SPEI değerleri kullanılarak farklı periyotlardaki kurak ve nemli dönemlere ait zamansal değişim incelenmiştir. Şekil 3’ten görüldüğü gibi SPI ile SPEI(T) ve SPEI(H) için kısa zaman ölçeklerde kurak dönemlerin frekansı çok fazladır. Zaman ölçeği arttıkça kuraklık eğilimi daha belirgin hale gelmekte, kurak dönemlerin frekansında azalma ve kuraklık genliklerinde ve sürelerinde artış gözlenmektedir. İndislere ait aylık zaman serilerinde kısa zaman ölçeklerinde SPI değerlerinin değişimi göze çarpmaktadır. Aşırı ve şiddetli kuraklıkları SPI aylık serisinde nispeten daha belirgin şekilde yansıtmakta ve şiddet bakımından SPEI(T) ve SPEI(H) arasında farklılıklar bulunmaktadır. Fakat zaman ölçeği arttıkça bu fark azalmakta ve indis değerleri arasında tutarlılık gözlenmektedir. Ayrıca, 2007 ve 2008 yıllarında meydana gelen aşırı şiddetli kuraklıklar üç indis için göz önüne alınan zaman ölçeklerinde belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 3. Kırıkkale Meteoroloji İstasyonuna Ait SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) Değerlerinin Zamansal Değişimi

Kırıkkale meteoroloji istasyonu için 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman ölçeğinde hesaplanan SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) değerleri için rölatif frekans analizi yapılmıştır. Tablo 3'te verilen sınıflandırma nemli, normale yakın ve kurak durum olarak ayrılmış ve elde edilen rölatif frekans yüzdeleri Tablo 4'te verilmiştir. 5 farklı zaman ölçeğinde elde edilen SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) değerlerinin rölatif frekans analizi sonuçlarına göre, nemli veya kurak durumlara nispeten normale yakın durumlar daha fazla olup bu kategoride tüm rölatif frekans değerlerinin %60'ı aştığı belirlenmiştir. Normale yakın sınıfta rölatif frekansın minimum değeri %63.1 olarak SPEI(H) ile 1 aylık zaman ölçeğinde, maksimum değeri ise %69.1 olarak SPEI(T) ile 12 aylık zaman ölçeğinde bulunmuştur. Tablo 4'te görüldüğü gibi, nemli, normale yakın ve toplam kurak kategoride frekans yüzdelerinin maksimum ve minimum değerleri SPI için ağırlıklı olarak 3 ve 12 aylık zaman ölçeğinde bulunurken, SPEI(T) ve SPEI(H) için ağırlıklı olarak 1 ve 12 aylık zaman ölçeğinde elde edilmiştir. Ayrıca, toplam kurak ve nemli duruma ait rölatif frekans değerlerinin üç indis için de yaklaşık olarak birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, 1 aylık zaman ölçeğinde SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) rölatif frekans değerleri nemli sınıfta sırasıyla %17.1, %18 ve %18 olarak belirlenirken, toplam kurak sınıfta %14.9, %17.6 ve %18.9 olarak hesaplanmıştır. Çalışmanın amacı doğrultusunda kurak kategori tek başına değerlendirildiğinde, üç indisin 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman ölçekleri için orta kurak rölatif frekans değerlerinin, şiddetli ve aşırı kurak kategorilerine ait rölatif frekans değerlerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Detaylı olarak incelendiğinde, orta kurak

sınıfta maksimum rölatif frekans %13.1 olarak SPEI(H) ile 1 aylık zaman ölçeğinde, minimum rölatif frekans ise %6.7 olarak SPEI(T) ile 12 aylık zaman ölçeğinde elde edilmiştir. Şiddetli kurak sınıfta ise maksimum rölatif frekans %6.5 olarak SPI ile 1 aylık zaman ölçeğinde, minimum rölatif frekans %3.3 olarak SPI ile 12 aylık zaman ölçeğinde görülmüştür. Son olarak, aşırı kurak sınıfta maksimum rölatif frekans %3.3 olarak SPI ile 3 aylık zaman ölçeğinde, minimum rölatif frekans %0.9 olarak SPEI(T) ile 1 aylık zaman ölçeğinde bulunmuştur. Aşırı kurak sınıfta zaman ölçeği arttıkça SPI değerlerinin rölatif frekans yüzdelerinde azalma, SPEI(T) ve SPEI(H) değerlerinin rölatif frekans yüzdelerinde ise artma söz konusudur. Özellikle aşırı kurak sınıfı için tüm zaman ölçeklerinde SPI değerlerinin rölatif frekans yüzdeleri, SPEI(T) ve SPEI(H) değerlerinin rölatif frekans yüzdelerinden daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca, SPEI(T) ve SPEI(H) değerlerinin rölatif frekans yüzdeleri birbirine oldukça yakın bulunmuştur. Bunlar arasında yaklaşık olarak %90 korelasyon tespit edilmiştir. Sonuç olarak, tüm kategoriler kendi içinde değerlendirildiğinde üç indis içinde rölatif frekans değerlerinin hemen hemen benzer olduğu ve aralarında küçük farklılıklar olduğu görülmüştür.

Tablo 4. Kırıkkale Meteoroloji İstasyonu İçin Rölatif Frekans Yüzde Değerleri

Dönem		1	3	6	9	12
Nemli (%)	SPI	17.1	14.8	15.9	17.2	18.3
	SPEI(T)	18.0	17.0	15.3	16.9	16.0
	SPEI(H)	18.0	17.5	16.9	17.8	16.3
Normale Yakın (%)	SPI	68.0	69.0	68.2	67.0	66.0
	SPEI(T)	64.4	65.5	67.2	67.3	69.1
	SPEI(H)	63.1	65.4	65.2	65.8	67.5
Orta Kurak (%)	SPI	8.5	7.2	9.3	9.6	7.9
	SPEI(T)	11.5	10.9	10.6	8.4	6.7
	SPEI(H)	13.1	10.4	11.7	10.1	9.8
Şiddetli (%)	SPI	3.3	5.8	3.7	3.3	6.5
	SPEI(T)	5.1	5.4	5.5	5.4	5.7
	SPEI(H)	4.9	5.5	4.5	4.5	4.4
Aşırı Kurak (%)	SPI	3.1	3.3	2.8	2.9	1.4
	SPEI(T)	1.0	1.2	1.3	2.0	2.4
	SPEI(H)	0.9	1.2	1.6	1.8	2.0

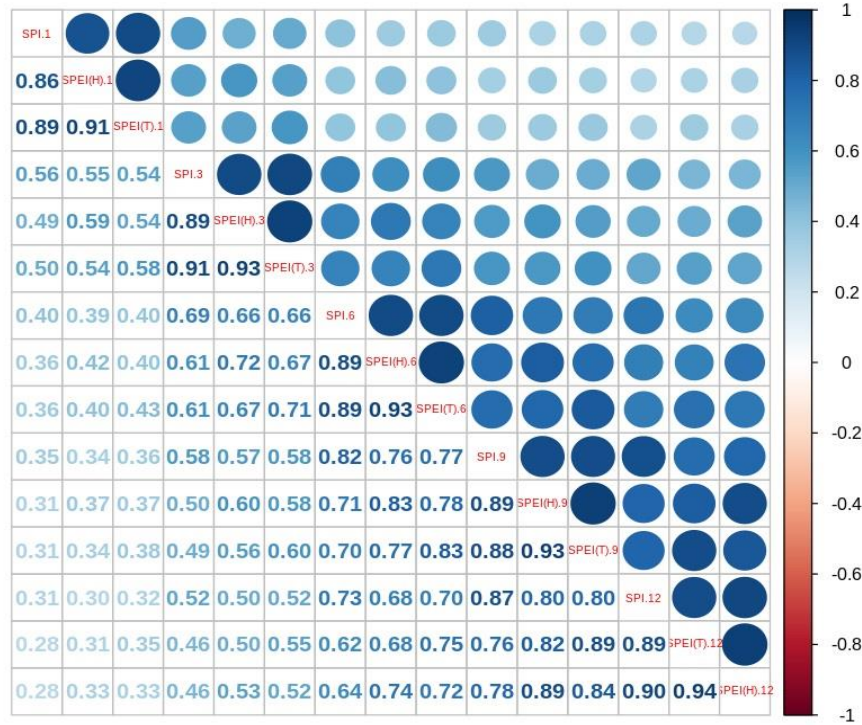
Kırıkkale meteoroloji istasyonuna ait 1963-2018 dönemi için hesaplanan 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman ölçeğinde kurak dönemlerin süresi, büyüklüğü ve şiddetini içeren kuraklık özellikleri incelenmiştir. Tablo 5'te her bir indis için 5 farklı zaman ölçeğinde incelenen kuraklık olaylarının kuraklık sınıfı, ortalama şiddet ve ortalama süreleri ile incelenen kuraklıkların en şiddetli ve en uzun süreli ile buldukları başlangıç ve bitiş zamanları verilmiştir. Üç indis için kuraklık olaylarının toplamı değerlendirildiğinde, genel olarak zaman ölçeği arttıkça yaşanan kuraklık olaylarının sayısında azalma görülmüştür. Fakat kuraklık periyodu uzadıkça hesaplanan üç indis için ortama kuraklık süresinde ve yaşanan en uzun kuraklık süresinde artış söz konusudur. Örneğin SPEI(T) yöntemi ile elde edilen sonuçlara göre, 1 aylık zaman ölçeğinde 118 ayda çeşitli şiddetlerde kuraklık olayları yaşanırken, 12 aylık zaman ölçeğinde toplamda 98 ayda çeşitli şiddetlerde kuraklık olayları yaşanmıştır. Yine aynı indis için 1 aylık zaman ölçeğinde ortalama kuraklık süresi 1.34 ve yaşanan en uzun süreli kuraklık 3 ay olarak bulunurken, 12 aylık zaman ölçeğinde ortalama kuraklık süresi 6.13 ve yaşanan en uzun süreli kuraklık 24 ay olarak bulunmuştur. Kuraklık olayları şiddet bakımından değerlendirildiğinde, tüm indisler için hesaplanan 5 farklı zaman ölçeğindeki ortalama şiddet değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ve -0.23 ile -0.27 değerleri arasında değiştiği görülmüştür. Maksimum kuraklık şiddeti ise her indis için küçük farklılıklar göstermektedir. Özellikle SPI yöntemi ile elde edilen maksimum kuraklık şiddetleri (9 aylık zaman ölçeği hariç), SPEI(T) ve SPEI(H) yöntemleri ile hesaplanan değerlere göre nispeten daha yüksektir. Örneğin maksimum şiddet 6 aylık zaman ölçeğinde SPI yöntemi ile -3.29 (Mayıs 2007), SPEI(T) yöntemi ile -2.5 (Mart 2001) ve SPEI(H) yöntemi ile -2.61 (Mart 2001) olarak bulunmuştur. En uzun süreli ve en şiddetli kuraklık olaylarının yaşandığı zamanlar incelendiğinde, üç indis içinde ağırlıklı olarak 2000'li yıllar göze çarpmaktadır. Türkiye genelinde kuraklık olaylarının en şiddetli ve geniş yayımlı olanlarından 2001, 2007 ve 2008 yıllarında meydana gelen kuraklıkların seçilen çalışma alanının da etkilendiği görülmektedir. Ayrıca, SPEI(T) ve SPEI(H) yöntemleri ile hesaplanan kuraklıkların en uzun süreli ve en şiddetli olanlarının 2000'li yıllarda görülmesinin nedenin, bu yıllardan sonra sıcaklıkta meydana gelen artma eğiliminden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 5. Kırıkkale Meteoroloji İstasyonun Farklı Zaman Ölçekleri İçin Kuraklık Karakteristikleri

İndis	Kuraklık Sayısı (Ay)				Toplam	Ortalama Kuraklık		En Uzun Süreli Kuraklık		Süre (Ay)	Maksimum Kuraklık	
	Kuraklık Periyodu	Orta Kurak	Şiddetli Kurak	Aşırı Kurak		Süre	Şiddet	Başlangıç	Bitiş		Şiddet	Zaman (Ay)
SPI	1	57	22	21	100	1.20	-0.23	1978/5	1978/8	4	-3.27	1978/11
	3	48	39	22	109	2.22	-0.27	2008/2	2008/8	7	-2.89	2007/1
	6	62	25	19	106	2.72	-0.25	2007/3	2007/10	8	-3.29	2007/5
	9	64	22	19	105	2.84	-0.24	2001/1	2001/10	10	-2.81	2007/7
	12	52	43	9	104	4.16	-0.24	2007/5	2009/1	21	-2.93	2007/10
SPEI(T)	1	77	34	7	118	1.34	-0.25	2001/6	2001/8	3	-2.92	1966/2
	3	73	36	8	117	2.34	-0.25	2007/5	2007/11	7	-2.18	2001/8
	6	71	37	9	117	3.25	-0.26	2007/3	2008/10	20	-2.50	2001/3
	9	56	36	13	105	4.38	-0.24	2006/12	2008/12	25	-2.85	2008/3
	12	44	38	16	98	6.13	-0.23	2007/2	2009/1	24	-2.89	2008/4
SPEI(H)	1	88	33	6	127	1.31	-0.26	2008/3	2008/8	6	-2.38	2007/9
	3	70	37	8	115	2.21	-0.25	2000/11	2001/4	6	-2.44	2012/8
	6	78	30	11	119	2.83	-0.25	2007/3	2008/1	11	-2.61	2001/3
	9	67	30	12	109	3.63	-0.24	2007/5	2008/12	20	-2.92	2001/3
	12	65	29	13	107	4.28	-0.24	2007/5	2009/2	22	-2.53	2008/8

3.2. SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) Arasındaki İlişki

Çalışmanın bu bölümünde 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde hesaplanan SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) arasındaki korelasyon katsayıları hesaplanarak, farklı zaman ölçeklerindeki kuraklık indisleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu amaçla hesaplanan korelasyon katsayılarının dağılımı Şekil 4'te verilmiştir. Burada görüldüğü gibi, her indis kendi içinde değerlendirildiğinde zaman ölçeği arttıkça korelasyon değerinde düşme görülmektedir. Örneğin, SPI 1 ile SPI 3 ve SPI 12 arasındaki korelasyonlar sırasıyla 0.56 ve 0.31 olarak bulunmuştur. Yapılan karşılaştırmada aynı zaman ölçeklerinde en yüksek korelasyon SPEI(T) ve SPEI(H) arasında ($R=0.94$) 12 aylık zaman ölçeğinde elde edilmiştir. Diğer taraftan, en düşük korelasyon ise SPEI(H) ve SPI arasında ($R=0.86$) 1 aylık zaman ölçeğinde bulunmuştur. SPEI(T) ve SPEI(H) arasındaki korelasyonlar değerlendirildiğinde, iki indis arasındaki ilişkinin daha kuvvetli olduğu ve zaman ölçeği uzadıkça elde edilen korelasyon değerlerinde artış olduğu gözlenmiştir. SPEI(T) ve SPEI(H) arasında korelasyon değeri 1 aylık zaman ölçeğinde $R=0.91$ iken, 12 aylık zaman ölçeğinde $R=0.94$ olarak bulunmuştur. SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) ile karşılaştırıldığında ise SPI'nin her iki indis ile arasındaki ilişkisinin kuvvetli olduğu tespit edilmiştir. SPI ile SPEI(T) arasında en yüksek korelasyon 3 aylık zaman ölçeğinde $R=0.91$ ve en düşük korelasyon 9 aylık zaman ölçeğinde $R=0.88$ 'dir. SPI ile SPEI(H) arasında ise en yüksek korelasyon 12 aylık zaman ölçeğinde $R=0.90$ ve en düşük korelasyon 1 aylık zaman ölçeğinde $R=0.86$ 'dir. Elde edilen sonuçlara göre, aynı zaman ölçeğinde tüm indisler arasındaki korelasyon değerlerinin 0.85'i aştığı ve en kuvvetli ilişkinin SPEI(T) ve SPEI(H) arasında olduğu bulunmuştur.



Şekil 4. Farklı Zaman Ölçeklerindeki Kuraklık İndislerinin Arasındaki Korelasyonlar

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, 1963-2018 yılları arasındaki dönemde Kırıkkale meteoroloji istasyonuna ait meteorolojik veriler kullanılarak 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) değerleri hesaplanmıştır. Çalışmanın amacı doğrultusunda, Kırıkkale ilinde geçmiş dönemlerde meydana gelen kuraklıkların karakteristik özellikleri incelenmiş ve seçilen indislerin çalışma alanı için uygulanabilirliği, performansları ve aralarındaki ilişkiler değerlendirilmiştir. Başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- I. SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) değerlerinin zamansal değişimi farklı zaman ölçeklerinde nispeten benzerlik göstermiş ve özellikle zaman ölçeği arttıkça benzerlik daha belirgin hale gelmiştir. İndislere ait aylık zamansal değişimlerinde özellikle kısa zaman ölçeklerinde SPI ile hesaplanan kuraklık şiddetlerinin SPEI(T) ve SPEI(H) ile hesaplanandan daha fazla ve belirgin olduğu görülmüştür. Zaman ölçeği uzadıkça üç indise ait değişimlerin temelde tutarlılık gösterdiği gözlenmiştir. Her üç indis için kısa zaman ölçeklerinde kurak dönemlerin frekansı çok fazladır. Ancak, zaman ölçeği arttıkça kuraklık eğilimi daha belirgin hale gelmiş, kurak dönemlerin frekansında azalma ve kuraklık günlüklerinde ve sürelerinde artış olmuştur.
- II. Rölatif frekans analizi sonuçlarına göre, nemli, normale yakın ve kurak sınıflar kendi içinde değerlendirildiğinde, üç indis için rölatif frekans değerlerinin nispeten benzer olduğu fark edilmiştir. SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) değerlerinin nemli veya kurak durumlara nispeten normale yakın durum için daha yüksek sonuçlar verdiği görülmüş olup normale yakın kategoride tüm rölatif frekans değerlerinin %60'ı aştığı belirlenmiştir.
- III. Kuraklık periyodu uzadıkça hesaplanan üç indis için ortama ve en uzun kuraklık sürelerinde artış söz konusudur. Buna ilaveten, farklı zaman ölçeklerinde ortalama şiddet değerlerinin birbirine çok yakın olduğu bulunmuştur. Maksimum kuraklık şiddeti ise her indis için küçük farklılıklar göstermekte olup SPI yöntemi ile elde edilen maksimum kuraklık şiddetleri (9 aylık zaman ölçeği hariç), SPEI(T) ve SPEI(H) yöntemleri ile hesaplanan değerlere göre nispeten daha yüksektir. En uzun süreli ve en şiddetli kuraklık olayları 2000'li yıllarda yaşanmıştır.
- IV. Aynı zaman ölçeğinde tüm indisler arasındaki yüksek korelasyon elde edilmiş ve korelasyon değerlerinin 0.85'i aştığı ve en kuvvetli ilişkinin SPEI(T) ve SPEI(H) arasında olduğu bulunmuştur.

Bu çalışma, Kırıkkale'de kuraklık olaylarının izlenmesi, kuraklık özelliklerinin belirlenmesi ile kuraklık indislerinin değerlendirilmesi ve seçimi için önemli bilgiler sağlamaktadır. İndisler arasında aynı zaman ölçeklerinde yüksek korelasyonlar görülmesi sebebiyle, çalışma bölgesinde SPI ve SPEI yöntemlerinin kuraklığı tanımlamak, tespit etmek ve izlemek için uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır. İleriki çalışmalarda, burada kullanılan indislerden farklı kuraklık indisleri incelenerek elde edilen bulguların karşılaştırılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, makalede kullanılan meteorolojik verilerin temin edildiği Meteoroloji Genel Müdürlüğü ile yapıcı eleştirileriyle makalenin gelişimine katkı sunan isimlere içtenlikle teşekkürlerini sunarlar.

Refesanslar

Abramowitz, M., & Stegun, I.A. (1965). Handbook of mathematical formulas, graphs and mathematical tables. Dover Publications Inc, New York.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements”, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome.

Anisfeld, S.C. (2010). Water resources. Island Press, Washington, DC.

Bacanli, U.G., & Kargi, P.G. (2019). Drought analysis in long and short term periods: Bursa case”, Journal of Natural Hazards and Environment, vol. 5, no. 1, pp. 166-174.

Beguiría, S., Vicente-Serrano, S.M., Reig, F., & Latorre, B. (2013). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) Revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. Int. J. Climatol., vol. 34, pp. 3001–3023.

Beyazıt, M., & Önöz, B. (2008). Taşkın ve kuraklık hidrolojisi. Nobel Yayın Dağıtım, s. 212-215, Ankara.

Burton, I., Kates, R.W., & White, G.F. (1978). The environment as hazard”, Oxford University Press, New York.

Byun, H.R., & Wilhite, D.A. (1999). Objective quantification of drought severity and duration. Journal of Climate, vol. 12, no. 9, pp. 2747-2756.

Changnon, S.A., & Easterling, W.E. (1989). Measuring drought impacts:the Illinois case. Water Resour. Bull., vol. 25, pp. 27–42.

Citakoglu, H., Ozeren, Y., & Coskun, O. (2019). Short time drought estimation of Sakarya Basin station with wavelet model–adaptive neuro–fuzzy inference system. IWW'2019: International Conference on Image Processing, Wavelet and Applications, vol.1, no.1, pp.190-197, Kocaeli, Turkey.

Çamalan, G., Akgündüz, A.S., Ayvaci, H., Çetin, S., Arabacı, H., & Coşkun, M. (2017). SPEI indisine göre Türkiye geneli kuraklık değişim ve eğitim projeksiyonları. IV. Türkiye İklim Değişikliği Kongresi, TİKDEK 5-7 Temmuz, İstanbul.

Çobaner, M., Çıtakoğlu, H., Haktanır, T., & Yelkara, F. (2018). Determination of optimum Hargreaves-Samani equation for Mediterranean region. Dicle University Journal of Engineering, vol. 7, no. 2, pp. 181–190.

Droogers, P., & Allen, R.G. (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data condition. Journal of Irrigation and Drainage Systems, vol. 16, no. 1, pp. 33-45.

Elfatih, A., Eltahir, B., & Yeh, P.J.F. (1999). On the asymmetric response of aquifer water level to floods and droughts in Illinois. Water Resour. Res., vol. 35, pp. 1199–1217.

Gibbs, W.J., & Maher, J.V. (1967). Rainfall deciles as drought indicators. Bureau of Meteorology Bulletin, 48, Melbourne, Australia.

Guttman, N.B. (1999). Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. Journal of American Water Resources Association, vol. 35, no. 2, pp. 311-322.

Hargreaves, G.H., & Samani, Z.A. (1985). Reference cropevapotranspiration from temperature. Appl. Eng. Agric., vol. 1, no. 2, pp. 96-99.

IPCC (2001). Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Houghton, J.T., et al. (eds.)]. Cambridge University Press: Cambridge and New York.

- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [Solomon, S., et al. (eds.)]. Cambridge University Press: Cambridge and New York.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bexand P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- IPCC (2019). *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. 234 Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.
- Kadioğlu, M. (2008). Kuraklık Kırımı Risk Yönetimi. Ed: Kadioğlu, M. ve Özdamar, E., Afet zararlarını azaltmanın temel ilkeleri. JICA Türkiye Ofisi Yayınları No: 2, s. 277-300, Ankara.
- Kassaye, A.Y., Shao, G., Wang, X., & Wu, S. (2021). Quantification of drought severity change in Ethiopia during 1952–2017. *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 23, no. 4, pp. 5096–5121.
- Kumanlioglu, A.A. (2020). Characterizing meteorological and hydrological droughts: A case study of the Gediz River Basin, Turkey”, *Meteorological Applications*, vol. 27, no. 1, pp. 1-17.
- Li, X., He, B., Quan, X., Liao, Z., & Bai, X. (2015). Use of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) to characterize the drying trend in southwest China from 1982–2012. *Remote Sens.*, vol. 7, no. 8, pp. 10917-10937.
- Liu, L., Yang, H., Hocker, J.E., Shafer, M.A., Carter, L.M., Gourley, J.J., Bednarczyk, N.C., Yong, B., & Adhikari, P. (2012). Analyzing projected changes and trends of temperature and precipitation in the southern USA from 16 downscaled global climate models. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 109, pp. 345–360.
- Mathbout, S., Lopez-Bustins, J.A., Martin-Vide, J., Bech, J., & Rodrigo, F.S. (2018). Spatial and temporal analysis of drought variability at several time scales in Syria during 1961–2012. *Atmos. Res.*, vol. 200, pp. 153–168.
- Mckee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January, pp.179-184, Anaheim, CA.
- Mishra, A.K., & Singh, V.P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, vol. 391, pp. 202-216.
- Ogunrinde, A.T., Olasehinde, D.A., & Olotu, Y. (2020). Assessing the sensitivity of standardized precipitation evapotranspiration index to three potential evapotranspiration models in Nigeria. *Sci. Afr.*, vol. 8, pp. 1-16.
- Oliver, J.E. (1981). *Climatology: Selected Applications*. Edward Arnold 260 pp, London.
- Palmer, W.C. (1965). *Meteorological drought*. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C.
- Pandey, R.P., & Ramasastri, K.S. (2001). Relationship between the commonclimatic parameters and average drought frequency. *Hydrol. Processes*, vol. 15, pp. 1019–1032.
- Pei, Z., Fang, S., Wang, L., & Yang, W. (2020). Comparative analysis of drought indicated by the SPI and SPEI at various timescales in inner Mongolia, China. *Water*, vol. 12, no. 7, pp. 1-20.
- Salvacion, A.R. (2021). Mapping meteorological drought hazard in the Philippines using SPI and SPEI”, *Spat. Inf. Res.*, vol. 29, no. 6, pp. 949–960.
- Şen, Z. (2005). İklim değişikliği ve su kaynaklarına etkisi. 22 Mart Dünya Su Günü İklim Değişikliğinin Su ve Enerji Kaynaklarımıza Etkisi Paneli, İstanbul.
- Şen, Z. (2009). Kuraklık afet ve modern hesaplama yöntemleri. 3. Su Vakfı Yayınları, İstanbul.

- Shaowei, Z., Hongchao, Z., Pengcheng, R., Guangjie, X., Bangdong, L., Wencheng, D., & Liying, W. (2013). Application of standardized precipitation evapotranspiration index in China”, *Clim. Environ. Res.*, vol. 18, pp. 617–625.
- Shukla, S., & Wood, A. (2008). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, vol. 35, no. 2, pp. 1-7.
- Sırdaş, S. (2002). Meteorolojik kuraklık modellemesi ve Türkiye uygulaması. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- SYGM, (2016). İklim değişikliğinin su kaynaklarına etkisi projesi, proje nihai raporu. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara.
https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/iklim%20de%C4%9Fi%C5%9Fikli%C4%9Finin%20su%20kaynaklar%C4%B1na%20etkisi/Iklim_NihaiRapor.pdf.
- Swed F. S., Eisenhart C. (1943). Tables for testing randomness of grouping in a sequence of alternatives. *Annals of Mathematical Statistics*, Cilt 14, s.66-87.
- Thom, H.C.S. (1958). A Note on the gamma distribution. *Mon. Weather Rev.*, vol. 86, pp. 117-122.
- Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, vol. 38, no. 1, pp. 55-94.
- Tirivarombo, S., Osupile, D., & Eliasson, P. (2018). Drought monitoring and analysis: standardised precipitation evapotranspiration index (SPEI) and standardised precipitation index (SPI)” *Phys. Chem. Earth Parts A/B/C*, vol. 106, pp. 1–10.
- Toros, H. (1993), *Klimatolojik Serilerden Türkiye İkliminde Trend Analizi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Tsakiris, G., & Vangelis, H. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, vol. 9, no. 10, pp. 3-11.
- Türkeş, M. (2008a). Küresel iklim değişikliği nedir? Temel kavramlar, nedenleri, gözlenen ve öngörülen değişiklikler. *İklim Değişikliği ve Çevre*, c. 1, s. 1., s. 45-64.
- Türkeş, M. (2008b). İklim değişikliği ve küresel ısınma olgusu: bilimsel değerlendirme. Yay. Haz; E.Karakaya, s. 21-57 *Küresel Isınma ve Kyoto Protokolü: İklim Değişikliğinin Bilimsel, Ekonomik ve Politik Analizi*. Bağlam Yayınları No: 308, İstanbul.
- Vicente-Serrano, S.M., & Lopez-Moreno J.I. (2005). Hydrological response to different time scales of climatological drought: An evaluation of the standardized precipitation index in a mountainous mediterranean basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 9, pp. 523-533.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., & López-Moreno, J.I. (2010). A Multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23, pp. 1696-1718.
- Wang, H., Pan, Y., & Chen, Y. (2017). Comparison of three drought indices and their evolutionary characteristics in the arid region of northwestern China. *Atmos. Sci. Lett.*, vol. 18, no. 3, pp. 132-139.
- Wilhite, D.A., & Glantz, M.H. (1987). Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International*, vol. 10, no. 3, pp. 111–120.
- Willeke, G., Hosking, J., Wallis, J.R., & Guttman, N.B. (1994). The national drought atlas. U.S. Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Report 94.
- WMO (1997). Extreme agrometeorological events. CagM-X Working Group, Geneva.
- Wu, H., Hayes, M.J., Welss, A., & Hu, Q. (2001). An evaluation the standardized precipitation index, the China-z index and the statistical Z-Score. *International Journal of Climatology*, vol. 21, no. 6, pp. 745-758.
- Yacoub, E., & Tayfur, G. (2020). Spatial and Temporal of variation of meteorological drought and precipitation trend analysis over whole Mauritania. *J. Afr. Earth Sci.*, vol. 163, no. 1, pp. 1-12.

- Yuan, Y., & Zhou, W. (2008). Influences of the Indian Ocean Dipole on the Asian summer monsoon in the following year. *International Journal of Climatology*, vol. 28, no. 14, pp. 1849–1859.
- Yüce, M.İ., & Eşit, M. (2020). Determination of the drought risk map of Ceyhan Basin by SPI and SPEI methods. *Su Kaynakları*, c. 5, s. 2, pp. 1–8.
- Zhang, Q., Qi, T., Singh, V.P., Chen, Y.D. & Xiao, M. (2015). Regional frequency analysis of droughts in China: A multivariate perspective. *Water Resour. Manag.*, vol. 29, pp. 1767–1787.



İnşaat Mühendisliği Eğitiminde Mühendislik Etiği Uygulamaları ve Etkileri

Applications and Effects of Engineering Ethics in Civil Engineering Education

Zahide Bayer Öztürk¹, Özgen Tavşancı², Şule Nur İster²

¹Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 50300 Nevşehir, TÜRKİYE

²Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir/TÜRKİYE

Başvuru/Received: 15/04/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Ülkemizde etik kuralları mesleki açıdan yeterli düzeyde uygulanmamaktadır. Mühendisler, mesleklerini yaparken üstesinden gelmek zorunda olacağı farklı etik ikilemlerle karşı karşıya kalabilmektedir. Mühendislik etiği ilkelerince, mühendisler görevlerini yerine getirirken toplumun güvenliğini, sağlığını ve refahını en önde tutmalıdır. Üniversitelerimizde “Mühendislik Etiği” eğitiminin verilmesi, öğrencileri profesyonel yaşamda karşılaşılabilecekleri zorluklara ve ikilemlere karşı hazırlamak açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada etiğin ve kurallarının inşaat mühendisliği alanında önemi, örnek vaka senaryoları ve bir anket çalışması ile incelenmiştir. Yapılan anket çalışmasının sonucuna göre, 323 katılımcıdan %76,9’unun “Mühendislik Etiği” dersini almadığı, buna bağlı olarak %40’ının etik yasalardan haberdar olmadığı, %40’ının ise kısmen haberdar olduğu belirlenmiştir. Katılımcılar, etik olmayan bir durumla karşılaştıklarında onu düzeltmek için farklı seviyelerde inisiyatif kullanacaklarını belirtmişlerdir. Ayrıca, etik ikilem karşısında karar verme mekanizmalarını etkileyen faktörler arasında; işi kaybetme korkusunun %23.7, işvereni uğratacağı maliyetin %18.3, Müdür ve arkadaşlarına karşı ispiyoncu olarak gözükme durumunun %16.7 ve %42’lik bir kesim tüm bu durumların etkin faktör olduğunu belirtmişlerdir. Bu sonuçlara göre, özel ve kamu sektörlerinde yönetici/iddareci/mühendis rollerini üstlenecek olan bu adaylar, uygulama sahalarında teknik anlamda yeterli olsalar da, etik anlamda etkinlik gösteremeyeceklerdir. Bu çalışmada anket çalışması ve örnek vaka senaryoları ile etik bir değerlendirme yapabilmek ve bir inşaat mühendisinin yaşayabileceği etik sorunlara karşı nasıl davranması gerektiğine dair öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler

“Etik, Mühendislik, İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Etiği”

Abstract

In our country, ethical rules are not applied professionally at a sufficient level. Engineers may be faced with different ethical dilemmas that they will have to overcome while performing their profession. According to the principles of engineering ethics, engineers should prioritize the safety, health and welfare of the society in the performance of their duties. Teaching "Engineering Ethics" in our universities is very important in terms of preparing students for the difficulties and dilemmas they may encounter in professional life. In this study, the importance of ethics and ethical rules in the field of civil engineering has been examined with case scenarios and a survey. According to the results of the survey, it was determined that 76.9% of the 323 participants did not take the "Engineering Ethics" course, and accordingly, 40% were not aware of ethical laws and 40% were partially aware. Participants that when they encounter an unethical situation, they will use different levels of initiative to correct it. In addition, among the factors affecting decision-making mechanisms in the face of ethical dilemma; 23.7% of the fear of losing the job, 18.3% of the cost to the employer, 16.7% of being seen as a snitch to the manager and their friends, and 42% stated that all these situations are effective factors. According to these results, these candidates who will assume the roles of manager/manager/engineer in the private and public sectors, although they are technically competent in the field of practice, will not be able to demonstrate ethical efficiency. In this study, the survey and case scenarios, learn how to put it into practice in the best way, and how a civil engineer should act against ethical problems that she may experience.

Key Words

“Ethics, Engineering, Civil Engineering, Engineering Ethics”

1. Giriş

Etik, yaşamın her alanında davranışları yönlendiren değer, ilke ve standartların bir bütünü olarak temeli bazen dine, örf-adetlere bazen meslek gruplarının özelliklerine bağlı olarak şekillenen kurallar bütünüdür (Buyruk Akbaba, 2008). Etik, meslek dalları arasında tarafların uyması yâda kaçınması gereken davranışlar olarak da tanımlanabilir (Turgut and Karan, 2012). Tarihsel süreçte etik, üretim biçimi, tinsel, kültürel değeri ve egemen ideolojinin değer yargıları vb. etkenlere göre, değişim ve dönüşüm gösteren bir süreç olarak gelişmektedir (Turgut and Karan, 2012). Meslek etiği, dünyanın neresinde olursa olsun aynı işi icra eden meslektaşların uyması gereken davranış kuralları olup, evrenseldir (Öztürk Bayer et al. 2015). Meslek etiğinin ilgili dallarından biri olan mühendislik etiği ise mühendislerin görevlerini yerine getirirken göz önünde bulundurması gereken kural ve davranışları gösteren bir rehber olarak kullanılmaktadır (Doğan, 2021).

İlk etik kavramı "Hipokrat Yemini" ile bilinmektedir ve yazılı olarak 1793 yılında Birleşik Krallık Manchester şehrinde Doktor Thomas Percival tarafından sağlık bilimleri alanında ilk etik kuralları denemesi yapılmıştır. Sağlık bilimleri tarafından yapılan etik çalışmalar; mühendisler, mimarlar ve diğer meslek dallarına örnek olmuştur. Mühendislik alanında ilk etik kuralları çalışmalarına Amerika Birleşik Devletlerindeki sivil toplum kuruluşları tarafından başlanmıştır. İlk yazılı kurallar 1912 yılında Amerikan Elektik Mühendisleri Derneği (AIEE) tarafından kabul görülmüştür. Mühendisler için ortak etik kuralları 1932 yılında başlamış ve 1947 yılında "etiğin temel ilkeleri" olarak kabul edilmiştir. İnşaat mühendisliğinde etik kavramı ise 1914 yılında Amerika İnşaat Mühendisleri Topluluğu üyeleri tarafından belirlenmiştir (Usman et al. 2012).

Türkiye’de Mühendislik etiği ile ilgili çalışmalar, 1954 yılında ortaya çıkan, 1959 yılında revize edilen ve 1983 yılında Kanun Hükmünde kararname ile tekrar değiştirilen 6235 sayılı yasa ile kurulan Türk Mühendisler ve Mimar Odaları Birliği (TMMOB) tarafından 1998 yılında başlamıştır. Türkiye’de 17 Ağustos 1999 Kocaeli/Gölcük ve 12 Kasım 1999 Düzce merkezindeki depremler sonucunda yaşanan can kayıplarının mühendislik hatalarından dolayı ortaya çıkmasıyla Türkiye’de etik kavramı daha da önem kazanmıştır. TMMOB tarafından, 2003 yılında gerçekleştirilen bir kurultayda "mesleki davranış ilkeleri" oluşturulmuş ve TMMOB’nin etik konusunun önemini vurgulamasıyla, üniversitelerle irtibata geçip görüşmesiyle ve Mühendislik Fakültelerinin akreditasyon için başvurularında bulunmasıyla etik konulu bir dersin müfredata eklenmesi söz konusu olmuştur (Doğan, 2021; Taluğ et al. 2015). Dünya Mühendisler Birliği, AIEE ve TMMOB tarafından oluşturulan Mühendisler için etik ilkelere bakıldığında, üçünün de ortak noktası: Mühendislerin toplumun güvenliği ve refahını korumaları, tarafsız ve doğru bilgilendirme yapmaları, doğaya ve çevreye zarar vermekten kaçınmaları, mesleklerinin itibarını korumaları hususlarıdır (Doğan, 2021).

2. Etik ve Mühendislik

Ülkelerin gelişmesinde teknoloji ve bilim ne kadar önemli ise, teknoloji ve araştırmanın gelişmesinde de mühendisler o kadar önemlidir. Mühendis, bilimi teknolojiye dönüştüren, yarattığı teknolojiyi de toplumun ihtiyaçlarını karşılamak için kullanıp, geliştirendir. Bu nedenle, bir mühendisin kendi alanındaki gelişmeleri en iyi şekilde takip etmesi, uygulaması ve yol gösterici olması gerekir (Ozturk Bayer et al. 2015). Son yüzyıldaki teknolojik ilerlemelerin insanları ve yaşadığımız dünyayı hem olumlu hem de olumsuz etkilediğini görüyoruz. Gelişmiş mühendislik uygulamaları ile teknolojiye yön verilebilmekte ve insan hayatını kolaylaştırmaya yönelik faaliyetler yapılabilmekte ancak bunları yaparken doğal kaynaklar tükenmekte ve çevresel denge bozulabilmektedir. Bu sebeple, mühendisler karar verme süreçlerinde en uygun olanı seçmek için etik ilkelere ihtiyaç duymaktadır (Oğulata, 2021). Tam da bu noktada şöyle bir soru sorulabilir: Mühendis kime karşı sadık olmalıdır? Patrona, şefe, topluma, ailesine, ülkesine, insanlığa vb sıralanabilir (Emo, 2012). Yapılan bir eylemin sadece kendisinin doğru veya yanlış olduğuna karar vermek etiğe görevci (deontolojik) bakış açısı ile eylemin sadece sonuçları üzerinde değerlendirme yapmak sonuççu yaklaşım, eylemi sadece yapan açısından değerlendirmek ise erdemsel yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Mühendislerin mesleki hayatlarında önlerine çıkabilecek sorunlar karşısında hangi yaklaşıma göre davranmaları gerektiği üzerinde ister istemez tartışmalar çıkmaktadır. Mühendislik uygulamalarında sonuççu yaklaşımın daha yaygın olduğu görülebilmektedir (Oğulata, 2021). Mühendisler, üstesinden gelmek zorunda olacağı farklı etik ikilemlerle karşı karşıya kalabilmektedir. Mühendislik etiği ilkelerince, mühendisler görevlerini yerine getirirken toplumun güvenliğini, sağlığını ve refahını en önde tutmalıdır. Sadece kendi uzmanlık alanlarında hizmet vermeli ve mesleğinin onurunu zedeleyecek davranışlardan uzak durmalıdır (Ozturk Bayer et al. 2015). Karar verme sürecinde en iyiler arasından tercih yapma becerisine de sahip olmalıdır. Bu beceri ise, bilimsel temelli bir etik eğitimle mühendis adaylarına kazandırılabilir. Mühendislik etiğinin amaçları; mühendis adaylarına toplumsal deneyim, bilgi, sorun bilinci, karar verme yeteneği, sorunu ortaya koyabilme ve değerlendirebilme becerisi kazandırabilmek olmalıdır. Bu bağlamda, mühendis adayları da verecekleri tüm kararların toplumun değişik kesimlerini nasıl etkileyeceğini, nelerin üzerinde önemle durulması gerektiğinin önemini, ne ile suçlanabileceğini yâda sorumlu tutulabileceğini kavrayabilecektir (Uğur and Arslan, 2021; Dikici, 2021). Şu da unutulmamalıdır ki, etik kurallar her soruna cevap veremediği gibi her koşulda da ne yapılacağını söylemez ancak, bu eğitimi alan insanlar karşılaştıkları olaylara farklı bir bakış açısıyla bakabilmektedir (Doğan, 2021).

3. İnşaat Mühendisliğinde Etiğin Yeri

En eski mühendislik dallarından biri olan inşaat mühendisliği alanında çalışan mühendisler yol, köprü, kanal, baraj, hava alanı ve bina türü yapıların planlanması, projelendirilmesi, yapımı ve denetimi konularında araştırma ve inceleme yapmaktadır. Tasarım, inşaat ve tadilat aşamalarını kapsayan projelerin içerdiği farklı boyutlar düşünüldüğünde, projelerde meydana gelebilecek mühendislik hatalarının topluma ve çevreye vereceği zararın boyutlarının artacağı da göz önünde bulundurulmalıdır (Bozkuş and Tunç, 2016; website). Ortaya çıkan bu özel durum ile inşaat mühendislerinin vermiş olduğu kararlar toplum ve çevre sağlığını, aynı zamanda meslektaşların, işçilerin, tesislerin ve tesiste çalışanların güvenliğini yakından etkilemektedir (malzeme tedarik). Amerika ASCE

(American Society of Civil Engineers, Amerika İnşaat Mühendisleri Topluluğu), Avrupa - ECCE (European Council of Civil Engineers, Avrupa İnşaat Mühendisleri Konseyi) ve Japonya – JSCE (Japon Society of Civil Engineers – Japonya İnşaat Mühendisleri Topluluğu)'nin etik kuralları bulunmaktadır. Bu üç farklı kültüre ait etik kurallar incelendiğinde hepsinin ortak noktası şöyledir:

- İnşaat mühendisleri; toplumun can, mal güvenliğini ve refahını korumalıdır.
- İnşaat mühendisleri, müşterilere ve işverenlere karşı dürüst, adil ve çıkar ilişkisi gütmeyecek şekilde davranmalıdır.
- Doğaya, çevreye saygılı olmalıdır.
- İnşaat mühendisleri mesleklerinin, kendilerinin ve meslektaşlarının itibarlarını ve çalışma arkadaşlarının güvenliklerini riske atıcı her türlü davranıştan kaçınmalıdır.
- İnşaat mühendisi doğruyu gizlememeyi ilke edinmeli ve kamuoyunu bu ilke doğrultusunda mutlaka doğru bilgilendirmelidir (Bozkus and Tunç, 2016).

Mühendisliğin temeli; yaşamın kalitesini arttırmak, doğanın dengesini bozmayarak, insanların içinde mutlu olacağı, çevreyi iyileştiren hizmetler vermek üzerine kurulmalıdır (Emo, 2012; Bacanlı and Baycan, 2011; Kumbasar, 2003; Şen, 2020). Mühendisler hem günümüzde kendi toplumlarındaki ve dünyanın başka yerlerindeki yaşayanların, hem de gelecek nesillerin sağlık, güvenlik ve refahını da dikkate alarak hizmet vermek üzere eğitilmelidirler. Ana hedefleri de yaşam kalitesini arttırmak ve bu amaçla çevreyi iyileştirmek olmalıdır (Müezzinoğlu, 2003). Mühendisler mesleki yaşamları sırasında etik olmayan çeşitli davranış/olaylar ile karşılaşabilirler. Bu durumda etik sorunlar ne zaman ele verilmelidir sorusunun karşılığı da önemli olacaktır. Önemli hususlarda, gerçek ve güvenilir bilgilere dayanarak, daha yetkin-vakıf kişilere danışıldığında dahi kurum içinde çözüme dair sonuç alınmadığında, açık bir tehlike söz konusu ise mühendis etik sorunu ele vermelidir (Gerçek, 2005).

Bu çalışmada, inşaat sektöründe çalışmakta olan inşaat mühendisleri ve çeşitli üniversitelerde inşaat mühendisliği bölümünde okuyan öğrencilerin katılımı ile mühendislik etiği sorularına verilen yanıtları içeren bir anket çalışmasına ve inşaat mühendisliği alanında gerçek hayatta karşılaşılabilen etik durum senaryolarına (vakalar) yer verilmiştir. Bu sayede mühendis adaylarını profesyonel dünyaya hazırlamak için kendi alanlarında karşılaşılabilecekleri olası etik ikilemlere hazırlamak için vaka değerlendirmeleri ile empati yapabilmeleri, etik davranış benzerlik/farklılıkları üzerine bir farkındalık oluşturmak amaçlanmıştır.

4. Örnek Vakalar

Bu bölümde verilen vakalar, sektördeki mühendislerin karşılaştıkları durumlardan esinlenerek türetilen yeni etik durum senaryoları olup, her vakanın kendine özgü olduğu ve bu özgünlüğe göre hangi ilkeye dayanarak bir karar verilebileceği belirtilmiştir. Yaşanabilecek etik ikilemlere karşı nelere dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

- Bakanlık tarafından ihale edilmiş olan bir inşaatın projelerinde yapılması mutlaka gerekli olan fakat yapılmamış olan imalatlar olduğu fark edilmiştir. Yeni hastane ile mevcut hastane arasında geçişi sağlayacak olan köprülerin statik projeleri, ihaleyi aldıktan sonra detaylı bir şekilde tekrar incelenmiş, donatı detaylarında tutarsızlık olduğu yapının deprem gibi durumlarda beklenenden daha fazla zarar görebileceği gözlemlenmiştir. Bu durum, Sağlık Bakanlığı'na iletilmiştir. Bakanlık eksik donatının hesaplandığını kabul etmiş, yeni bir proje çizilebileceğini fakat bunun için de müteahhide fazladan bir bedel ödenmeyeceğini belirtmiştir. Eksik projeye göre yapılacak olan imalat, mühendislik etiği kavramına tamamen aykırı düşeceği için yanlış bir uygulama olacaktır. İşveren firma tarafından, herhangi bir bedel almaksızın yeni bir proje çizilmiş ve imalat yapılmıştır. (*toplum sağlığını ve güvenliğini koruma ilkesine göre hareket edilmiştir.*)
- İş güvenliği açısından çalıştığı inşaatta sürekli sıkıntılar yaşanan bir İSG (iş sağlığı güvenliği) yetkilisi, taşeron firma yetkililerine sözlü olarak durumları iletmekteydi. Sürekli uyarılmalarına rağmen iş güvenliği teçhizatlarını kullanmayan personel/ekipman ile ilgili sorunlar devam ediyordu. İSG yetkilisi kendi işini kaybetmemek, taşeron firmaları ile iyi geçinmek adına bu sorunları yazılı rapor halinde işverene sunmak istemiyordu. Bir gün inşaatta çalışan bir personel, uygunsuz ekipman ve uygun kişisel koruyucu ile çalışmadığı için büyük bir iş kazası yaşadı. İlk sorumlu tutulan İSG yetkilisi idi. İş sağlığı ve güvenliği yönetmelikleri ve Mühendislik etiği kavramına aykırı olan bu göz ardı ediş ile insan sağlığı ve hayatını önde tutmayı amaçlaması gereken İSG yetkilisi görevini kötüye kullandığı için uyarı cezası almıştır. (*çalışma arkadaşlarının güvenliğini riske atıcı her türlü davranıştan kaçınma ilkesine göre hareket etmeliydi.*)
- Bir inşaat firmasında, işçilere ödenmesi gereken ücretlerde kesintilere gidilmekteydi. Bu durumdan ötürü işçiler işe çıkmama ve yapılan imalatlara zarar vermek gibi tehditlerde bulunmuşlardı. İşlerin sürekli aksamaya başladığı inşaat, mühendislik etiği açısından sıkıntılı olan bu durum: İşçi ve işveren arasındaki tarafların tek tek dinlenmesi ve kesintilerin azaltılıp ödeme tarihlerinin değiştirilmesi ile çözümlendi. (*Açık kapı politikası ile her birimin etkili şekilde birbiriyle iletişim kurabilmesi sonucu sorun çözümlenmiştir.*)
- Bir şantiyede ast-üst yetki karmaşası yaşanmaktaydı. Ustabaşı yaptığı imalat ile ilgili sıkıntıları ve problemleri kendi birimi dışında herkesle paylaşmıştı. Yaşanan problemi sadece kendi üstüne izah etmesi ve diğer çalışanlarda yanlış bir izlenim yaratmaması gereken bu ustabaşının etik bir ihlalde bulunduğu görülmektedir. Şantiyede organizasyon şeması hazırlanmış ve her bir çalışanın sorumluluk alanları belirlenmiştir. Ustabaşı uyarılmıştır ve yaşanan sıkıntıları önce kendi üstüne, sonrasında

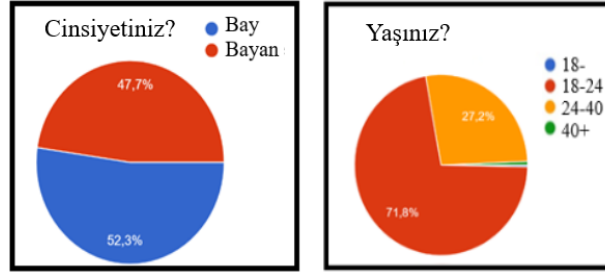
çözüm sağlanamadığında bir üstüne iletebileceği bu sayede birimler arasında iletişimin etkinleşebileceği belirtilmiştir. (*Kendi amirine sadık olma durumu*)

- Şantiyede yanlış ya da hatalı yapılan imalatlar muhakkak olmaktadır. Fakat bazı durumlarda bu hatalar o an düzeltilmemektedir. Kolon aplikasyonu yapılırken hata sınırları dışında yapılan imalatlar bir sonraki aşamada düzeltilme yoluna gidilmekteydi. Harita mühendisi tarafından yapılan kolon aplikasyonu doğru olmasına rağmen, bazı kolonlarda (+-) 2 cm. hatalar belirlendi. Kalıp ustası kolon kalıp işleminde bu hataları önemsememiştir. Nasıl olsa kolon betonları döküldükten sonra kolon üzerine uygulanacak olan alçı ya da sıvada bu hataların kapatılabileceğini savunmuştur. İnce işlerde bu hatalar giderilecektir. Fakat alçı ve sıva ekibi sürekli bu hataları kapatmakla zaman kaybı yaşayacaktı. Bu durum mühendislik etiği açısından uygun olmayan bir durumdur. Konu ile ilgili kalıp ustası uyarıldı, yarattığı durumun etik açıdan yanlış olduğu anlatıldı. Yapılan bu çalışmada alt katlarda kolon aplikasyonunda olası küçük sapmalarının üst katlarda daha büyük hatalara yol açabileceği düşünülerek sıva uygulamasının da gideremeyeceği büyük sorunlarla karşılaşılabilir. Ayrıca statik açıdan kolon akslarındaki kayma yük taşıma özelliklerini etkileyeceği için işin başında önlem alınması gerektiği vurgulanarak harita mühendisinin doğru ölçüm değerlerine uygun olarak kalıp ustasının hatayı düzeltmesi sağlandı (*kendi uzmanlık alanında yetkin ve güvenilir hizmet sunma ilkesi*).
- Şantiyede ilk olarak alçıdan önce elektrik buat işlemleri yapılmaktadır. Alçı ekibi işe başladığı zaman buat yerlerini önemsemeyip imalatına devam etmekteydi. Savunma olarak da sözleşmesinde buat yerlerini muhafaza altına alınması taşeron firmaya aittir şeklinde bir madde olmadığını savunmaktadır. Elektrik ustaları sürekli yaptığı imalatları geriye dönerek kontrol etmeye çalışıyorlardı. Bu durum mühendislik etiği açısından bakıldığında büyük sorun teşkil etmekteydi. Alçı ekibinin iyi niyet kuralları çerçevesinde hareket edip imalatlarını yaparken buat yerlerini de korumaya alması gerekmektedir. Alçı ekibinin sözleşmesinde olmamasına rağmen buat yerlerini koruma altına alması kanuni olarak zorunlu olmasa da etik olarak zaruret teşkil etmektedir. Aksi takdirde imalatın ileriki aşamalarında hem elektrik tesisatı bağlantıları hem de son kullanıcılar için büyük sorunlar oluşmasına sebep olabilecektir (*kendi uzmanlık alanında yetkin ve güvenilir hizmet sunma ilkesi*).
- Şantiyede kontrol mühendisleri ile belirli zamanlarda saha gezisi yapılmaktadır. En son yapılan bir gezide işveren; hastane giriş yolunun 5,00 metre olarak tasarlandığını fakat araç yoğunluğunu ve trafik sirkülasyonunu düşündüğümüzde bunun yetersiz olduğunu savunmuştur. Kontrol mühendisi yolun 7,00 metre olmasını SÖZLÜ olarak kabul etmiştir. Yazılı bir evrak hazırlamaya gerek duyulmadığını da belirtmiştir. Yolun 7,00 metre yapılmasından sonraki aşamada as built (revizyon) projesi ve hakkeleş kısmına gelindiğinde, kontrol mühendisi kendisinin yol genişliğini arttırmak hakkında bir fikri olmadığını işverene beyan etmiştir. Bu durum mühendislik etiğine yakışmayan bir durumdur. Konu taraflar arasında tekrar görüşülmüştür. Uzun uğraşlardan sonra kontrol mühendisi hatasını daha doğrusu söylediği sözleri hatırlayarak imalata devam edilmiştir. Aslında yüklenici firma sözleşme esaslarına tabi olarak yolu genişletme zorunluluğu olmasa da kamu zararı ve trafik yoğunluğuna bağlı oluşacak yolu geniş tutmuştur. Mühendisin mağduriyetlerin önüne geçmek için yolu projedekinden daha geniş yapması yasal olarak zorunluluk değildir ancak *verilen sözler açısından etik olarak bir gereklilik doğmuştur*.
- Şantiyede ISG yetkilisi, MYK(Mesleki yeterlilik sınavı) sınavına nezaret etmekle yükümlüdür. Bu sınavdan işçinin geçmesi ve işine devam edebilmesi için 70 puan alması gerekmektedir. ISG yetkilisinin herkesin sınavdan geçebilmesi ve işveren ile sıkıntılar yaşamamak adına sınava giren işçilere yardım ettiği gözlenmiştir. Etik olmayan bir durum ortaya çıkmıştır. Konu ile ilgili ISG yetkilisi uyarılarak yapmış olduğu davranışın yanlış olduğu vurgulanmıştır. Adayların yeniden sınava alınması sağlanmıştır.

5. Anket Çalışması

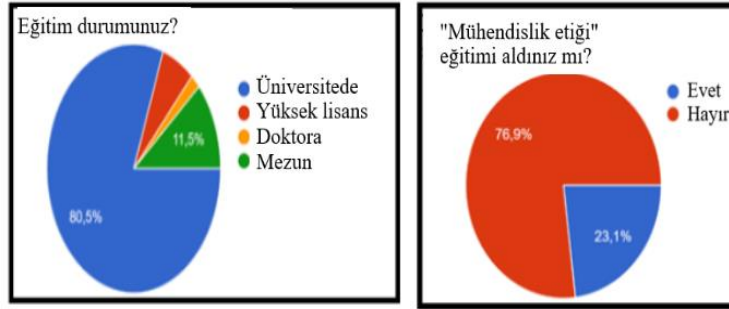
Üniversitelerimizde etik eğitiminin verilmesi, öğrencileri profesyonel yaşamda karşılaşılabilecekleri zorluklara ve ikilemlere karşı hazırlamak açısından oldukça önemlidir (Dyrud, 2004). Bu kısımda sektörde bulunan ve mühendislik eğitimine devam eden inşaat mühendisi adaylarına yöneltilen anket sorularının sonuçları aşağıda sunulmuştur:

323 kişilik anket sonucunda inşaat mühendisleri ve inşaat mühendisliği bölüm öğrencilerini kapsayan anketin ilk sorusunda katılımcıların %52,3'ünü erkekler, %47,7'sini bayanlar oluşturmaktadır. Ankete katılanların %71,8'inin 18-24 yaş aralığında %27,2'sinin 24-40 yaş aralığında olduğu görülmektedir (Şekil 1).



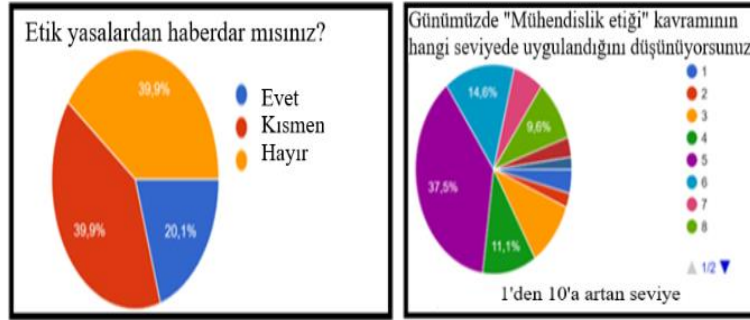
Şekil 1. "Yaşınız?" ve "Cinsiyetiniz nedir" anket sorularına verilen cevap yüzdeleri

Katılımcıların %80,5'inin üniversitede eğitimine devam ettiği (inşaat mühendisliği bölümü öğrencileri), %11,5'inin üniversiteden mezun olduğu görülmektedir. Katılımcıların % 76,9'unun "Mühendislik Etiği" dersini almadıkları görülmektedir (Şekil 2). Eğitimine devam eden öğrencilere neden bu dersi almadıkları sorulduğunda; bazılarının müfredatta bulunmadığı için, bazılarının ise seçmeli ders kategorisinde yer alması nedeniyle farklı bir dersi seçtikleri öğrenilmiştir.



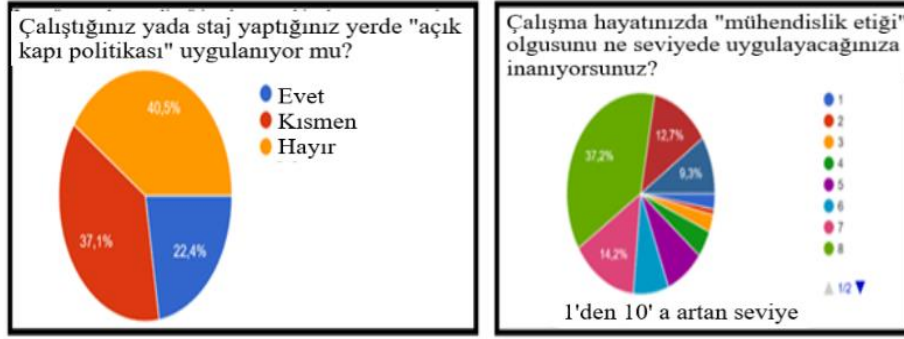
Şekil 2. "Eğitim dereceniz nedir?" ve "Mühendislik etiği dersi aldınız mı?" anket sorularına verilen cevap yüzdeleri

Bu nedenle Şekil 3'de sorulan "Etik yasalardan haberdar mısınız?" sorusunun yanıtı %39,9 "Hayır" ve yine %39,9 "Kısmen" şeklinde yanıtlanmıştır. Bu nedenle etik yasalara tam hâkim olunamadığı ve İnşaat mühendisliği alanında neden daha çok etik problemlerle karşılaşıldığı anlaşılmaktadır. "Günümüzde Mühendislik etiği kavramı hangi seviyede uygulanıyordu?" sorusunun yanıtı da 1'den 10'a artan seviyelerde genel olarak 4-5-6. seviyelerde olarak seçilmiştir. Bu seçenekler toplamın %63,2'sini oluşturmaktadır.



Şekil 3. "Etik yasalardan haberdar mısınız?" ve "Günümüzde Mühendislik Etiği kavramının hangi seviyede uygulandığını düşünüyorsunuz?" anket sorularına verilen cevap yüzdeleri

Çalıştığımız yâda staj yaptığımız işyerinde "açık kapı politikası" uygulanıyor mu sorunun yanıtları ise %40,5 Hayır ve % 37,1 Kesmen şeklinde olmuştur. Çalıştığı işyerinde tüm iletişim hatlarının açık olduğunu, üstlerine ve yöneticilerine erişim kolaylığı bulabildiklerini belirten %22,4'lük bir kesimin olduğu da tespit edilmiştir (Şekil 4). Kendi çalışma hayatınızda "Mühendislik Etiği" olgusunu ne seviyede kullandığınıza/kullanacağınıza inanıyorsunuz sorunun yanıtı olarak önemli seviyede uyguladıklarını görmekteyiz. %51,4'lük bir kesim 7.ve 8. Seviyede uyguladığını/uygulayacağını düşünmektedir. Ankete katılan kişilerin çoğunluğunun etik kurallarını şu an ve gelecekteki iş hayatında üst seviyede uygulama isteğinde olduğunu görmekteyiz.



Şekil 4. “Çalıştığınız yâda staj yaptığınız yerde açık kapı politikası uygulanıyor mu?” ve Çalışma hayatınızda mühendislik etiği olgusunu ne seviyede uygulayacağınıza inanıyorsunuz?” anket sorularına verilen cevap yüzdeleri.

Katılımcılara, “Etik olmayan bir durumla karşılaştıklarında onu düzeltmek için hangi seviyede inisiyatif alacakları” sorulduğunda, %42.7’sinin 7 ve 8. Seviyede, %44.6’sının ise 1-5 seviyeleri arasında inisiyatif alacakları tespit edilmiştir (Şekil 5). Bu durum çoğu şantiyede/işyerinde hâlâ etik kuralların gerektiği kadar uygulanmadığını göstermektedir.



Şekil 5. Etik olmayan bir durumla karşılaştığınızda onu düzeltmek için hangi seviyede inisiyatif kullanırsınız? Anket sorusuna 1’den 10’a artan seviyelerde olmak üzere cevap yüzdeleri.

İnsiyatif kullanma dereceleri farklılığına hangi faktörlerin etki edebileceğini değerlendirmek için Şekil 6’da verilen faktörlerin etkin olabileceği düşünülmüştür. Buna göre, katılımcılar etik olmayan bir durumla yüz yüze geldiklerinde, karar verme mekanizmalarını etkileyen faktörler arasında; işi kaybetme korkusunun %23.7, işvereni uğratacağı maliyetin %18.3, Müdür ve arkadaşlarına karşı ispiyoncu olarak gözükme durumunun %16.7 ve %42’lik bir kesim tüm bu durumların etkin faktör olduğunu belirtmiştir.



Şekil 6. “Etik olmayan bir durumla karşılaştığınızda, karar verme mekanizmanızı etkileyen faktörler nelerdir?” anket sorusuna verilen cevap yüzdeleri

Bu faktörler düşünüldüğünde, çalışılan kurumda güçlü bir etik kültürün oluşmuş olmasının ne kadar önemli olduğunu görmekteyiz. En üst düzeydeki yöneticiden en alt kademedeki çalışana kadar, her seviyede etik kurallara açık bir bağlılıkla, tüm etik sorunlar çözülebilir. Bu da, tüm çalışanların zorunlu bir etik eğitimi alması ile gerçekleşebilir. Öğrenim hayatlarında “etik eğitimi” alamamış tüm personele eğitim ve seminerler düzenlenmeli, yöneticiler de çalışanlara örnek olmalıdırlar. Çalışanların kaygılarını yâda önerilerini iletebilecekleri lafta kalmayan erişim olanakları sunulmalıdır.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada etiğin ve etik kurallarının inşaat mühendisliği alanında önemi, örnek vaka senaryoları ve bir anket çalışması ile incelenmiştir. İnşaat mühendisliği mesleğinde faaliyet gösteren mühendislerin, mühendis adaylarının vermiş olduğu tüm kararlar toplum ve çevre sağlığını ve aynı zamanda meslektaşlarının, çalışanların ve tesislerin güvenliğini şüphesiz çok yakından etkilemektedir. Bu nedenle, tüm mühendisler gibi inşaat mühendisleri de verdikleri kararlar da çevreye ve topluma karşı sorumlu davranmalı, meslek etiği kurallarına uymalıdır. Yapılan anket çalışmasının sonucuna göre, 323 katılımcıdan %76,9’unun “Mühendislik Etiği” dersini

almadığı, buna bağlı olarak %40'ının etik yasalardan haberdar olmadığı, %40'ının ise kısmen haberdar olduğu tespit edilmiştir. Böylesi bir ortamda özel ve kamu sektörlerinde yönetici/ıdareci/mühendis rollerini üstlenecek olan adaylar, uygulama sahalarında teknik anlamda yeterli olsalar da, etik anlamda etkinlik gösteremeyeceklerdir. Örnek vaka senaryoları ile etik bir değerlendirme yapabilmek, bunu en iyi şekilde pratiğe dökülebilmeyi öğrenmek ve bir inşaat mühendisinin yaşayabileceği etik sorunlara karşı nasıl davranması gerektiğine dair öneriler sunulmuştur. Mühendislik Etiği dersinin Türkiye'deki tüm üniversitelerin Mühendislik alanlarında verilen ders müfredatlarında zorunlu ders olarak yer alması gerçekten önemlidir. Bu çalışmanın anket ve vaka senaryoları ile İnşaat Mühendisliği alanında özellikle aday mühendisler için farkındalık yaratmak ve kazanımların sağlanması amaçlanmıştır.

Referanslar

- Bacanlı ÜG, Baykan O (2011) Mühendislik Etiğinin Zorunluluğu, İnşaat Mühendisliği Eğitimi 2. Sempozyumu, 319-324. https://istanbul.imo.org.tr/Eklenti/3177,167413010pdf.pdf?0&_tag1=47D04BC8EE4B40888FD2F7A5291DBC4EAB122A11
- Bozkuş MB, Tunç G. İnşaat Mühendisliği ve Etik, <https://silo.tips/download/naat-mhendsl-ve-etk12> (2016).
- Buyruk Akbaba AN. (2018) Muhasebede etik, mesleki değerler, etik ve tutum, IES 4 kapsamında inceleme, Muhasebe Bilim Dünyası Dergisi, Özel Sayı 20, 762- 778.
- Dikici B. (2021) Implementing Next-Generation Engineering Ethics in Education and Industry for Social Happiness:A Macroscopic Overview from Turkey to the World, Turkish Journal of Business Ethics, 14 (2), 364-380.
- Doğan S. (2021) Engineering ethics and education , International Journal of Social Sciences, 5(1), 87-108.
- Dyrud, MA. (2004), “Cases for Teaching Engineering Ethics”, Frontiers in Education, Volume:3, S1E/10 -S1E/14.
- Etik, Kodlanan Etik ve Pratiği; Hazırlayan: Elektrik Mühendisleri Odası, Etik Komisyonu, 1.bs.--Ankara. Elektrik Mühendisleri Odası, 2012.
- Gerçek H. (2005) Mühendislikte Etik Sorunların Ele Verilmesi” , Bilimsel Madencilik Dergisi 44, https://www.maden.org.tr/resimler/ekler/3f390d88e4c41f2_ek.pdf
- Kumbasar N. (2003) Mühendislik Etiği ve Güçlendirme, TMH –Türkiye Mühendislik Haberleri, 423, 17-19. <https://www.imo.org.tr/Eklenti/1467,muhendislik-etigi-ve-guclendirmepdf.pdf?0>
- Müezzinoğlu A. (2003) Mühendislikte Etik, TMH –Türkiye Mühendislik Haberleri, 423, 20-22. https://etik.gov.tr/wp-content/uploads/2019/03/aysemuezzinoglu-m%C3%BChendislikte_etik.pdf
- Öztürk Bayer Z, Kaçmaz H, Cırık R, Türkyılmaz M. (2015) Engineering Ethics and Ethical Evaluation of the Metallurgical & Materials Engineering Department in Turkey, Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4(1) 81-87.
- Şen Z. “Mühendislikte Felsefe, Mantık, Bilim ve Etik”, Su Vakfı Yayınları, 2020.
- Taluğ, C, Kanber H, Yalım Y. (2015). Türkiye’de mühendislik etiği eğitimi, Türkiye Biyoetik Dergisi, 2(3), 202-12.
- Turgut Z, Karan O. (2012) Mühendislik Etiği Eğitimi, Gerekliliği ve Yöntemleri. www.emo.org.tr/ekler/87c028efd561648_ek.pdf
- Oğulata T. (2021) Ethics in Engineering, Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi, 33(2), 527-536.
- Uğur LO, Arslan M. (2021) İnşaat Mühendisliği eğitiminde mühendislik etiği dersi uygulamalarının ve kazanımlarının değerlendirilmesi, 3rd International Gobeklitepe Applied Sciences Congress, Proceeding Book, 132.
- Usmen M. Baradan S. Akboğa Ö. (2012) Ethics in civil engineering: implementation in United America, e-Journal of New World Sciences Academy (NWSA-Engineering Sciences) 7(1), 1A0306.
- Web site: https://tr.wikipedia.org/wiki/insaat_muhendisligi



Farklı Tane Boyutlarındaki Kuvarsın Elektroporselen Bünyeye Etkisinin İncelenmesi

Investigation of Different Particle Size Quartz on Electroporcelain Body

Aliosman Tiryaki¹ , Ceyda Ayça Avcı¹ , Ceren Karakaya² , Baran Tarhan*² 

¹Ankara Seramik A.Ş., Ar-Ge Merkezi, I. O.S.B. Osmanlı Caddesi No:15, Posta 06930 Sincan, Ankara
²Uşak Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Seramik Bölümü, Ankara İzmir Yolu 8. km Bir Eylül Kampüsü, 64200 Uşak

Başvuru/Received: 29/04/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Porselen, izolatör üretiminde kullanılan en yaygın malzemedir. Porselen izolatörlerin üretiminde, diğer porselen ürünlerine benzer hammaddeler kullanılsa da nihai ürünün sağlaması gereken teknik ve karakteristik özellikler bakımından son derece özel ürünlerdir. Kuvars esaslı porselen izolatörler ise alçak ve yüksek gerilim kademelerinde kullanılmaktadır. Kuvars esaslı porselenlerde ana bileşen olan kuvars bünyenin teknik ve karakteristik özellikleri üzerinde son derece önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada farklı tane boyutlarındaki kuvars hammaddesinin porselen izolatör bünyesindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla elek üstü bakiyeleri en fazla %1 olan 45µ, 63 µ ve 100 µ tane boyutuna sahip kuvarsla porselen izolatör çamuru hazırlanmıştır. Hazırlanan reçetelerin fiziksel ve termal özellikleri analiz edilmiştir. Kuvars tane boyutu yükseldikçe pişme ve kuru mukavemet değerlerinde gözle görülür bir düşüş belirlenmiştir. Tane boyutunun yükselmesiyle, su emme ve görünür porozite yükselmiş, pişme küçülmesi azalmıştır. Çalışma sonunda kuvars tane boyutu yükseldikçe temel fiziksel özellikler kötüleşmektedir. İdeal çalışılacak tane boyutu 45 mikron olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“İzolatör, kuvars, kuvars esaslı porselen, tane boyutu”

Abstract

Porcelain is the most common material used in the manufacture of insulators. Although raw materials similar to other porcelain products are used in the production of porcelain insulators, they are extremely special products in terms of technical and characteristic features that the final product must provide. Quartz-based porcelain insulators are used in low and high voltage levels. Quartz, which is the main component in quartz-based porcelain, plays an extremely important role on the technical and characteristic features of the body. In this study, the effects of quartz raw material in different grain sizes on the porcelain insulator were investigated. For this purpose, porcelain insulator sludge was prepared with quartz with 45µ, 63 µ and 100 µ grain sizes with a maximum 1% residue. The physical and thermal properties of the prepared recipes were analyzed. As the quartz grain size increased, a significant decrease was determined in the firing and dry strength values. With increasing grain size, water absorption and apparent porosity increased, and firing shrinkage decreased. At the end of the study, as the quartz grain size increases, the basic physical properties deteriorate. The ideal grain size to be studied was determined as 45 microns.

Key Words

“Insulator, quartz, quartz based porcelain insulator, particle size”

1. Giriş

İzolator enerji nakil hatlarında kullanılan iletkenlerin direklere tespitine ve iletkenleri hem toprak ile diğer iletkenlere karşı izole etmeye yarayan hem de taşımaya t şebeke malzemelerine izolator denir. İzolatorler yüksek elektrik akımına karşı dirençli ve yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerden yapılır. Yapıldıkları malzemeye göre porselen silikon, epoksi reçineli ve cam izolator olmak üzere dört çeşit izolator tipi mevcuttur (T.C. Milli Eğitim Bakanlığı 2011). Porselen izolatorler diğer malzeme türlerine göre, sertlik ve mekanik dayanıklılığı olan, yalıtımda yarı iletkenliğe adapte edilebilen, değiştirilebilen elektriksel özellikleri ile kimyasal etkilere, ısı ve hava koşullarına karşı dayanıklılık, yüksek korozyon dayanıklılığı, estetik tasarım gibi üstünlüklerinden dolayı daha avantajlı konumdadır ve 150 yılı aşkın süredir izolator malzemesi olarak kullanılmaktadır. Günümüzde modern toplumunda elektrik enerjisinin önemi nedeniyle artan porselen talebi, porselen izolatorlerin gereksinimleri ve uygulamalarında en iyi özellikleri elde etmek için birçok araştırma projesini motive etmektedir [Jos'e et al.(2005), J. Libermann (2012)].

Porselen izolator üretiminde hammadde olarak diğer porselen üretimine benzer şekilde kil ve kaolenler, feldspatlar, kuvars ve alümina kullanılır. İzolatorler, kullanıldığı hammaddeler ve üretim yöntemleri bakımından diğer porselen sektörlerine benzer olsa da izolator ürünlerinden beklenen performans ve gereksinim çok farklıdır. İzolatorler, sahada kullanıma alınmadan önce, genel olarak kabul edilen IEC tarafından belirtilen 20 standart özellik testlerinde (elektromekanik kırılma yükü testi, flaş testi, güç frekansı delinme testi vb.) geçmelidir. Testler, elektromekanik özellikler ve dış ebatlar gibi izolatorün birçok yönünü içerir. Ayrıca testler güvenliği garanti altına almak için katıdır, aynı zamanda IEC tarafından verilen yeterlilik sertifikasını almanın zor olmasının da nedenidir[A. Ruys (2018)].

Porselen izolatorlerde yaygın olarak kullanılan iki farklı tip porselen türü vardır. Bunlar alümina ve kuvars esaslı izolatorlerdir. İzolatorün karşılamasının beklendiği mekanik ve elektriksel özellikler değerlendirilerek gerekli izolator grubunun seçimi yapılmaktadır (IEC-60672-3 standardında bu alt gruplar sınıflandırılmıştır).

Kuvars esaslı porselenler hammadde içeriği olarak kuvars, kil ve feldspat içermekle birlikte farklı gerilim seviyelerine göre hem alçak hem yüksek gerilim kademelerinde kullanılmaktadır. Mekanik ve elektriksel özellikleri, alümina esaslı porselenler kadar üstün olmasa da kuvars esaslı porselenler standartlarda belirtilen gerekli şartları sağladığı ürün gruplarında tercih edilmektedirler. Bu porselenlerin kullanımının başlıca avantajı maliyetlerinin düşük olmasıdır. Kuvars esaslı porselenlerde, yüksek pişirim sıcaklığı veya uzun pişirme süresi, kuvars tanelerinin erimesi nedeniyle seramik gövdedeki katı kuvars içeriğinin azalmasına neden olur. Öte yandan, kuvars fazı ile çevreleyen sıvı faz arasındaki ısıl genleşme farklılıkları, porselende mikro çatlaklar oluşturabilen mekanik strese neden olur. Parça sıcaklığındaki yoğun değişiklikler, mevcut mikro çatlakların artmasına neden olarak yük altında mekanik mukavemetin azalmasına neden olabilir[Jos'e et. Al(2012)].

Ayrıca 3 bileşenli porselenler üzerine yapılan bazı çalışmalarda, kuvarsin ortaya çıkan ürün üzerinde son derece önemli rolü olduğunu ortaya koymaktadır. Porselen karolarda bu rol kuvarsin en baskın faz olduğundan dolayı daha kritiktir. Diğer taraftan, soğuma sırasında kuvarsin ve matrisin termal genleşme katsayıları arasındaki fark çıkan mikroskobik bir artış sıkıştırma gerilimine maruz bıraktığı için bir güçlendirme etkisine sahiptir. Bu mikroskobik gerilimlerin büyüklüğü, kuvars parçacıklarının çevresinde çatlaklar oluşturarak gerilim gevşemesine ve ürünün mekanik davranışını olumsuz yönde etkileyen mikro yapısal hasarın artmasına neden olur[A.De Nori et al.(2009)].

Porselenlerde kullanılan hammaddelerin tane boyutu ve dağılımı, su emme, mukavemet, mikroyapı gibi temel fiziksel özellikler üzerinde etkisi vardır[Tarhan et al. (2022), Tarhan (2019)] . Kompozisyonlarda kullanılan kuvars tane dağılımı ve boyutu düştükçe mukavemeti ve kırılma tokluğu yükselmektedir. Braganca et al.(2006) yaptığı çalışmada 20-30 µm aralığında kullanılan kuvarsin optimum tane boyutu olduğu belirlenmiştir. Bir diğer çalışmada ise seramik sağlık gereçleri(vitrifiye)ürünlerin pişirimden sonra kristal kalıntı kuvars tanelerinin mukavemet üzerinde önemli etkileri olduğu belirlenmiştir[Tarhan et al. (2022),Turmen O. et al.(2015)].

Bu çalışmada kuvars tane boyutunun, kuvars esaslı porselen izolator çamuru üzerine etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca baskın yapı olan kuvarsin farklı tane boyutlarında kullanılmasının, teknik ve karakteristik özellikler üzerine etkileri tespit edilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Kullanılan Hammaddeler

Standart izolator bünyesi kil, kaolen, kuvars ve feldspattan oluşmaktadır. Kullanılan kil ve kaolenler; yurtiçi ve yurt dışı tedarikçilerinden olmak üzere farklı yerlerden temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan kuvars, üç farklı tane boyutunda;45µ altı, 63µaltı ve 100 µ altı olmak üzere Aydın/Çine bölgesinden tedarik edilmiştir. Kullanılan hammaddelere ait oksit bileşenleri Tablo 1'de verilmiştir. Hammaddelere ait fiziksel özelliklere Tablo 2'de verilmiştir.

Kullanılan kuvarsların tane boyutu ve dağılımları her kuvars için Mastersizer 2000 cihazında üçer ölçüm yapılarak ortalaması alınmıştır. 45 ve 63 mikron elek üstü % elek bakiyeleri de yaş elek analizi yöntemiyle hesaplanmıştır.

Tablo 1. Hazırlanan reçetelerde kullanılan hammaddelerin kimyasal bileşimleri (% ağırlıkça)

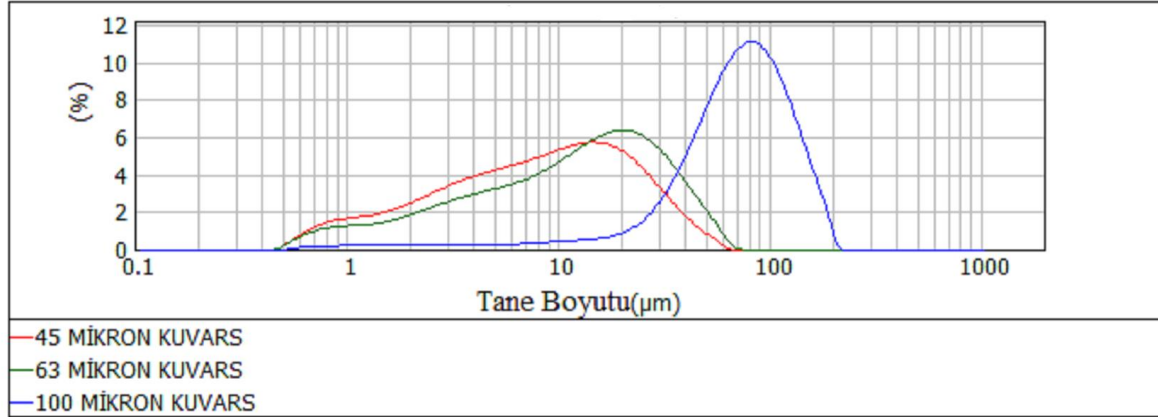
Hammaddeler	SiO ₂ +Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ +TiO ₂	CaO+MgO	Na ₂ O+K ₂ O	K.K.
Kuvars	99,53	0,02	0,06	0,23	0,16
Feldspat	86,12	0,18	0,45	12,88	0,37
Kil 1	83,63	4,14	0,74	2,15	9,34
Kil 2	82,11	3,57	0,82	2,63	10,87
Kaolen 1	82,31	3,13	0,50	3,25	10,81
Kaolen 2	82,24	3,05	0,49	3,52	10,70
Kaolen 3	84,48	1,93	0,27	0,15	13,17
Kaolen 4	82,96	2,09	0,51	0,47	13,97

K.K. : Kızdırma Kaybı

Tablo2. Kil ve kaolenlerin fiziksel özellikleri (% ağırlıkça)

Hammaddeler	Kuru Mukavemet (kg/cm ²)	Pişme Küçülmesi (%)	Su Emme (%)
Kil 1	40	8,72	15,00
Kil 2	75	9,84	0,35
Kaolen 1	15	7,60	18,00
Kaolen 2	30	6,56	5,00
Kaolen 3	23	8,39	14,48
Kaolen 4	38	9,60	-

Çalışmada kullanılan kuvars özel olarak istenilen tane boyutunda öğütülerek işletme denemesi için hazırlanmıştır. 5'er tonluk partiler halinde hazırlanan kuvars partilerine ait tane boyut dağılımı Şekil 1'de, elek bakiye değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

**Şekil 1.** Kuvars partilerine ait % Hacim-Tane boyutu(µm) tane boyut analizi grafiği**Tablo 3.** Kuvars hammaddelerine ait % elek üzeri bakiyeleri ve tane boyutları

Kuvars Partileri	45 µ Üzeri Elek Bakiyesi (%)	63 µ Üzeri Elek Bakiyesi (%)	d(50) (µ)	d(max) (µ)
45 µ Altı	1,2	0,0	12,1	69,1
63 µ Altı	4,1	0,3	17,4	79,3
100 µ Altı	64,4	47,1	73,3	208,1

2.2 Bünye Geliştirme Çalışmaları

Ankara Seramik Ar-Ge Merkezi laboratuvarında hazırlanan izolatör çamurları; reçete kompozisyonu değiştirilmeden kuvarsın tane boyutu değiştirilerek; 45 µ altı, 63 µ altı ve 100 µ altı kuvars kullanılarak bünyeler hazırlanmıştır. Hazırlanan elektroporselen bünyeler sırasıyla R1, R2 ve R3 olarak adlandırılmıştır. Hazırlanan reçetelerin oksit oranları Tablo 4’de verilmiştir. 1300 g/lit yoğunluğundaki çamurlar, filter preste 13 bar basınçta yaklaşık % 20 rutubete gelene kadar sıkıştırılarak kekler hazırlanmıştır. Hazırlanan kekler 9 devir/dak. hızla dönen vakum presten geçirilerek homojenleştirilmiştir. Vakum presten çıkan yaklaşık 30 mm çapındaki çubukların rutubeti % 19 ve sıcaklığı 35 °C’ dir. Çubukların kurutma işlemi 110 °C sıcaklıktaki etüvde, nem içeriği %0,1’in altına inene kadar gerçekleştirilmiştir. Çubuklar, 0,3 m³ hacimli doğalgazlı pilot üretim fırında işletme pişirim çevrimi programında maksimum sıcaklığı 1205°C olacak şekilde pişirilmiştir.

Tablo 4. Hazırlanan reçetelerin oksit oranları

Reçeteler (Std,R1,R2,R3)	SiO ₂ +Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ +TiO ₂	CaO+MgO	Na ₂ O+K ₂ O	K.K.
	88,32	1,36	0,42	5,29	4,61

2.3. Karakterizasyon

2.3.1 Fiziksel ve kimyasal karakterizasyon özellikleri

Test sonuçları, her bir test için üçer adet numune hazırlanarak ve çıkan sonuçların ortalaması alınarak elde edilmiştir. Hazırlanan numunelerin fiziksel özellikleri (Boya nüfus deneyi,% su emme, görünür (açık) gözeneklilik, kuru mukavemet, pişme mukavemeti, % pişme küçülmesi) TS11237 EN 60672-2 standart test serisine göre yapılarak değerlendirilmiştir. Boya nüfus deneyi 1 litre %50 lik alkol ile 1 gram bazik Fuchsine ilave edilerek hazırlanan çözeltiye pişmiş numuneler koyularak Chemisches Laboratorium Tonindustrie marka test cihazıyla 90 MPa’lık basınçla 2 saat süreyle test gerçekleştirilmiştir. Görünür(açık) gözeneklilik ve % su emme deneyleri **Arşimet** prensibine göre yapılarak hesaplanmıştır. Standartta göre alınan deney parçaları 3 saat kaynatıldıktan sonra, su sıcaklığı oda sıcaklığına gelinceye kadar su içinde bekletildikten sonra ölçümler alınmıştır. Oluşturulan reçetelerin deformasyon ölçümleri için hazırlanan izolatör çamurları ile özel şekilli alçı kalıplarda döküm metoduyla tabletler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin kimyasal karakterizasyonları X-ışını floresans (XRF) yöntemi ile PANalytical Axios marka cihaz ile yapılmıştır. Pişme ve kuru mukavemet testleri için ekstrüzyonda hazırlanmış olan silindirik numuneler Zwick/Roell marka Z020 model 3 noktalı eğme testi uygulanarak mukavemet değerleri hesaplanmıştır.

2.3.2 Termal karakterizasyon özellikleri

Bünyelerin ısıl genleşme katsayıları Netzch marka 402 PC model dilatometre cihazı ile yapılmıştır. Numunelerin termal şok dayanımları TS11237 EN 60672-2 standart test serisine göre numune ve ortam arasındaki sıcaklık farklı 140,150 ve 160°C olacak şekilde ayarlanarak testler gerçekleştirilmiştir.

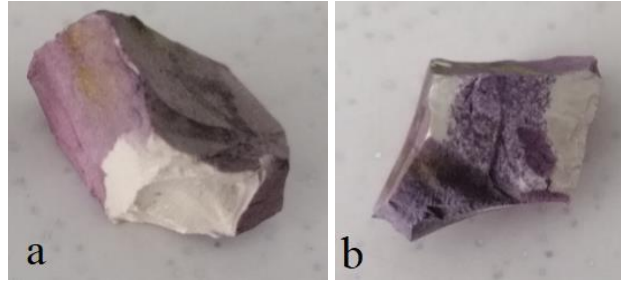
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Fiziksel Özellikler

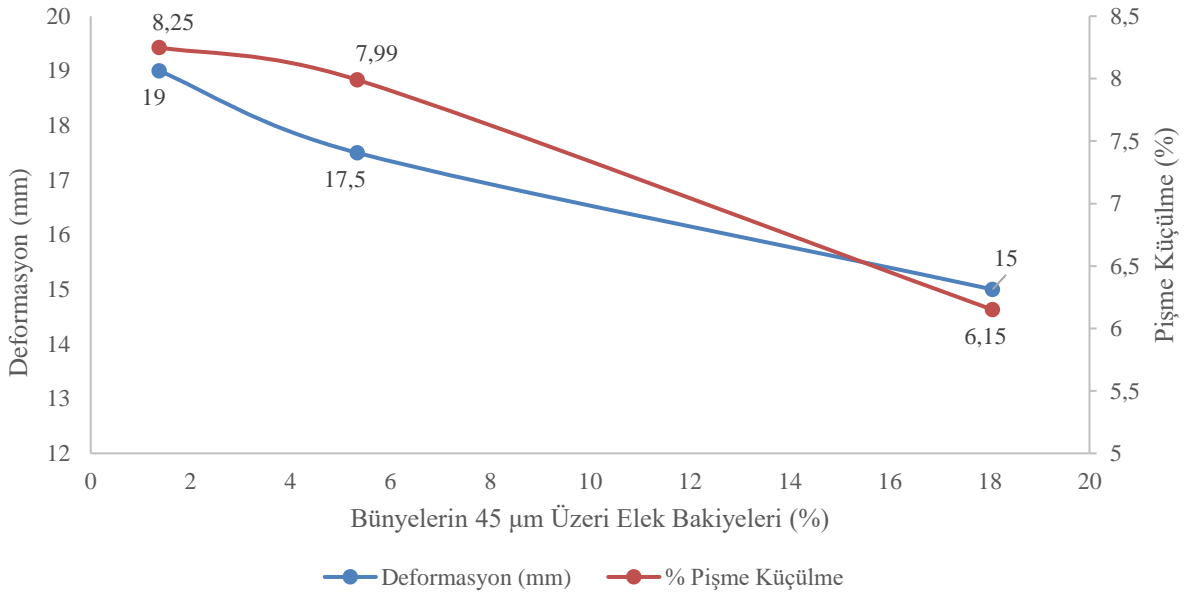
Porselen izolatör bünyesinde kullanılan kuvarsın tane boyutu değişiminin; bünyelerin 45µ, 63µ ve 100µ elek bakiyesi, % pişme küçülmesi, kuru mukavemet, sırlı ve sırsız pişmiş mukavemet değerleri üzerine değişimi Tablo 4’te, R1, R2 ve R3 denemelerinin boya nüfus deneyi sonuçları Şekil 2’de verilmiştir. Boya nüfus deneyi gözeneklerin veya mikro çatlakların varlığını tespit etmek için yapılan izolatör üretiminde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem ile servis ömrü ve ürün kullanımı sırasında karşılaşılabilecek çatlama ve kırılma hakkında bilgi veren bir test yöntemidir. Test sonuçlarına göre göre R1 ve R2 deneme reçeteleri boya nüfus testi sonucunda çatlak gözükmezken (olumlu sonuç verirken) R3 deneme reçetesinin olumsuz sonuç vermiştir (Tablo 5). R3 reçetesinde görünür porozite miktarı %1,92 iken R1 ve R2 reçetesinde sırasıyla %0,16 ve %0,22 çıkmıştır. Görünür porozite miktarının fazla olması-boya nüfus deneyinin olumsuz çıkmasına sebep olurken, bünye reçetesinde kullanılan kuvars tane boyutunun yükselmesi sinterleme sonrası kuvars çevresindeki radyal çatlakların artmasına sebep olarak yine boya nüfus deneyinin olumsuz çıkmasına neden olmaktadır [A. De Nori et al(2009), Braganca S.R et al.(2006)]. Bundan dolayı Şekil 2’de görüldüğü gibi hazırlanan boya çözeltisinin hem porozitenin içlerine hem de kuvars çevresinde oluşan çatlakların içlerine nüfuz ettiği değerlendirilmiştir.

Tablo 5.Çalışılan bünyelerin fiziksel özellikleri

Parametre	R1 (45µ Altı Kuvars Kullanılan Bünye)	R2 (63 µ Altı Kuvars Kullanılan Bünye)	R3 (100 µ Altı Kuvars Kullanılan Bünye)
45 µ üzeri elek bakiye (%)	1,37	5,34	18,06
63 µ üzeri elek bakiye (%)	0	0	12,04
Boya nüfuz deneyi	Olumlu	Olumlu	Olumsuz
Su emme (%)	0,07	0,09	0,80
Görünür porozite(%)	0,16	0,22	1,92
Pişme Küçülmesi (%)	8,25	7,99	6,15
Deformasyon (mm)	19	17,5	15
Kuru mukavemet (kg/cm ²)	48,81	41,81	37,58
Sırsız pişme mukavemeti (kg/cm ²)	941	907	481
Sırlı pişme mukavemeti (kg/cm ²)	1187	1150	717

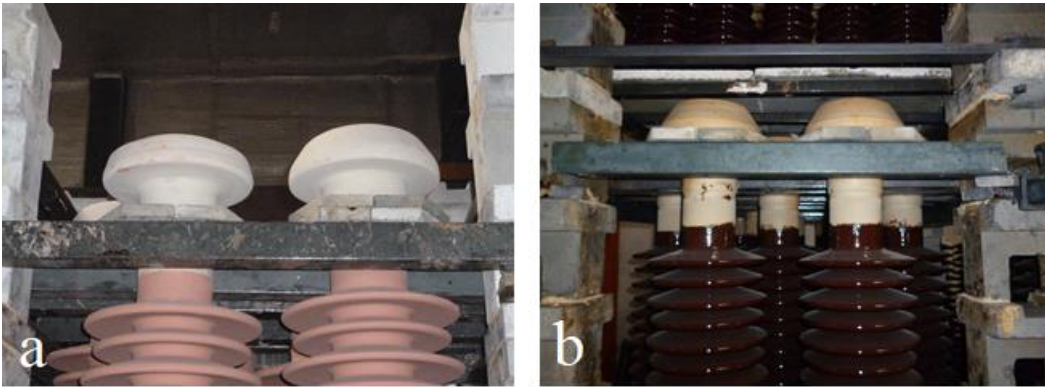
**Şekil 2.** a) R2, olumlu boya nüfusu testi, b) R3, olumsuz boya nüfusu testi

Yapılan su emme deneyi sonrasında R1, R2 ve R3 numuneleri için su emme değerleri sırasıyla % 0,07, % 0,09 ve % 0,8 olarak elde edilmiştir. R1 ve R2 numuneleri için su emme değerinde belirgin bir değişiklik görülmezken, 100 mikronluk kuvars kullanılan R3 kodlu numunenin su emme değeri yükselmiştir. Pişme küçülmesi değerleri analiz edildiğinde de en az küçülmenin (% 6,15) R3 deneme reçetesinde ve en fazla küçülmenin (%8,25) R1 deneme reçetesinde olduğu görülmüştür. Seramik bünyelerde termodinamik olarak tane boyutu ile sinterlenme derecesi arasında bir bağlantı vardır. Su emme ve porozite, pişme derecesine ve yapısal camsı faz oluşumuna bağlı olarak birbirleri ile doğrudan ilişkilidirler[Tarhan M.(2019),Tarhan M. et al.(2019)]. Tane boyutunun düşmesiyle(yüzey alanının artması) bağlı olarak tanelerin reaktivitesi artar. Bu sebeple sinterlenme prosesi etkin bir şekilde gerçekleşmektedir. Tane boyutu küçük olduğunda temas noktasının artmasıyla sinterleme de hızlanmaktadır[B.Tütmez et al.(1999), Kivitz E. et al.(2009), German R.M. et al.(2009)]. Su emme ve pişme küçülme değerleri beraber değerlendirildiğinde kuvars tane boyutunun 100 mikron olarak kullanılmasıyla numunelerin daha az sinterlendiği belirlenmiştir. Bununla beraber küçülme plakalarında ölçülen pişme küçülmesindeki farklılığın, R3 reçetesinde kullanılan 100 mikronluk kuvars sebebiyle bünyenin paketlenme kinetiğini olumsuz etkileyerek sinterleme sonrasında daha yüksek porozite oluşmasına neden olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 3. R1, R2 ve R3 bünyelerine ait 45 µm üzeri elek bakiyelerine göre deformasyon ve pişme küçülme grafiği

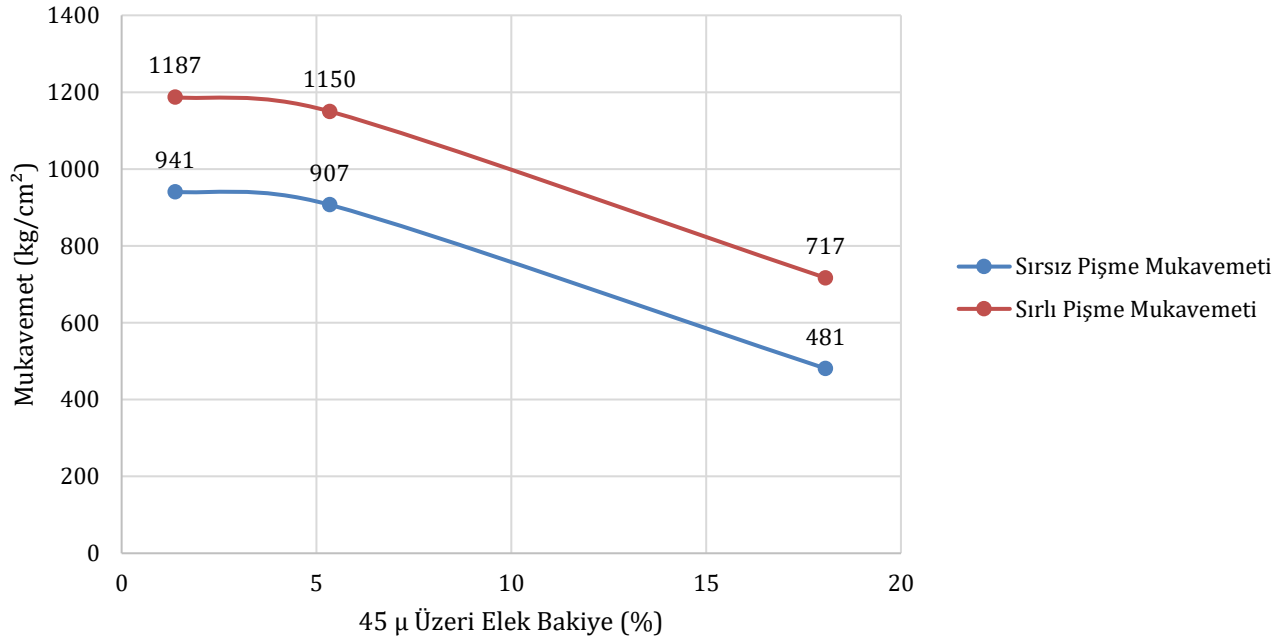
Bünyelere ait deformasyon ölçüm sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Bünyelerde artan kuvars tane boyutuna bağlı olarak deformasyon değerleri sırasıyla R1 reçetesi için 19 mm, R2 reçetesi için 17,5 mm ve R3 reçetesi için 15 mm olarak ölçülmüştür. Piroplastik deformasyon yüksek sıcaklıkta sinterleme sürecinde oluşan camsı fazın miktarı ve viskozitesine bağlı olarak değişmektedir. Artan camsı faz miktarı ve azalan viskoziteyle deformasyon artmaktadır. Sinterleme, partiküllerin yüzey enerjisini azaltmaya yönelik olan atomal hareketlenmenin bir sonucudur. Partiküllerin yüzey enerjisi partikül boyutuyla ters orantılıdır. Bundan dolayı daha fazla enerjiye sahip olan küçük partiküller büyük partiküllere göre daha hızlı sinterlenmektedir [German R.M. et al.(2009), Tarhan, B. et al. (2022), Tarhan B. et al. (2019)]. Bundan dolayı bünyelerde kuvars tane boyutundaki artışın sinterleme ve camsı faz gelişimini azaltarak bünyelerin deformasyon değerinin azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. Deformasyon izolatör üretiminde önemli bir parametredir. Şekil 4a ve 4b de gösterildiği gibi izolatörlerin kendini sinterlenme sonrası şekil bozukluğu gerçekleşmeden askıya alınmış olması beklenir. Özellikle askıda pişirilen malzemelerde yüksek deformasyon ürün gövdesinde deformasyonlara (sünmelere) sebep olabilmektedir. Bir başka etkisi özellikle büyük kütleli yüksek gerilim izolatörlerinin, pişme esnasında kendi ağırlıklarına dayanamamaları sonucu şekil bozukluklarına sebebiyet vererek ürünlerin ıskartaya ayrılmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle porselen izolatör bünyelerinde kullanılan kuvars tane boyutu nihai ürün özelliklerini doğrudan etkilemektedir.





Şekil 4. a)Sinterlenme öncesi izolatörlerin dizilme şekli, b)Sinterlenme sonrası izolatörlerin kendini askıya almış hali

Sırlı ve sırsız bünyelere ait kuru mukavemet değerleri Şekil 4 'de gösterilmiştir. Bünyelerde kuvars tane boyutu en düşük olan reçeteden, en yüksek olana doğru kuru mukavemet değerlerinde düşüş göstermektedir. Porselen bünyelerin mukavemetini etkileyen ana faktörden biri de kuvarın tane boyutu olarak kabul edilir [Kane, S. C. et al. (1951), Braganca, S. R. et al. (2003)]. Kuvars termal ve boyutsal stabiliteyi artırır, böylece deformasyonu önler. Bununla birlikte, porselen gibi camsı malzemeler için eğilme mukavemetini etkileyen temel faktör kuvars tane boyutudur [Turkmen O et al.(2012), Kane, S. C. et al. (1951), Braganca, S. R. et al. (2003), Boussouf L. et al. (2018)] Porselen bünyelerde kullanılan kuvarın tane boyutu küçüldükçe camsı fazda çözünen kuvars miktarı artacağından, camsı yapı oluşumunu kuvvetlendirir ve daha az sayıda kapalı porozite oluşumuna neden olur [Stathis G. et al.(2004)]. Ayrıca; kuvars partiküllerinin küçük olması mikro çatlakların da küçük ve daha az yoğun olmasına neden olur bu da eğilme mukavemetini arttıran bir durum olarak gösterilebilir[Braganca, S. R. et al. (2003), Boussouf L. et al. (2018), Tarhan, B. et al. (2017)]. Eğilme mukavemeti, 10-30 μm aralığında kuvars partikül büyüklüğü ile artar [Stathis G. et al.(2004), Tarhan, B. et al. (2017), W.D. Kingery, et al. (1976)].

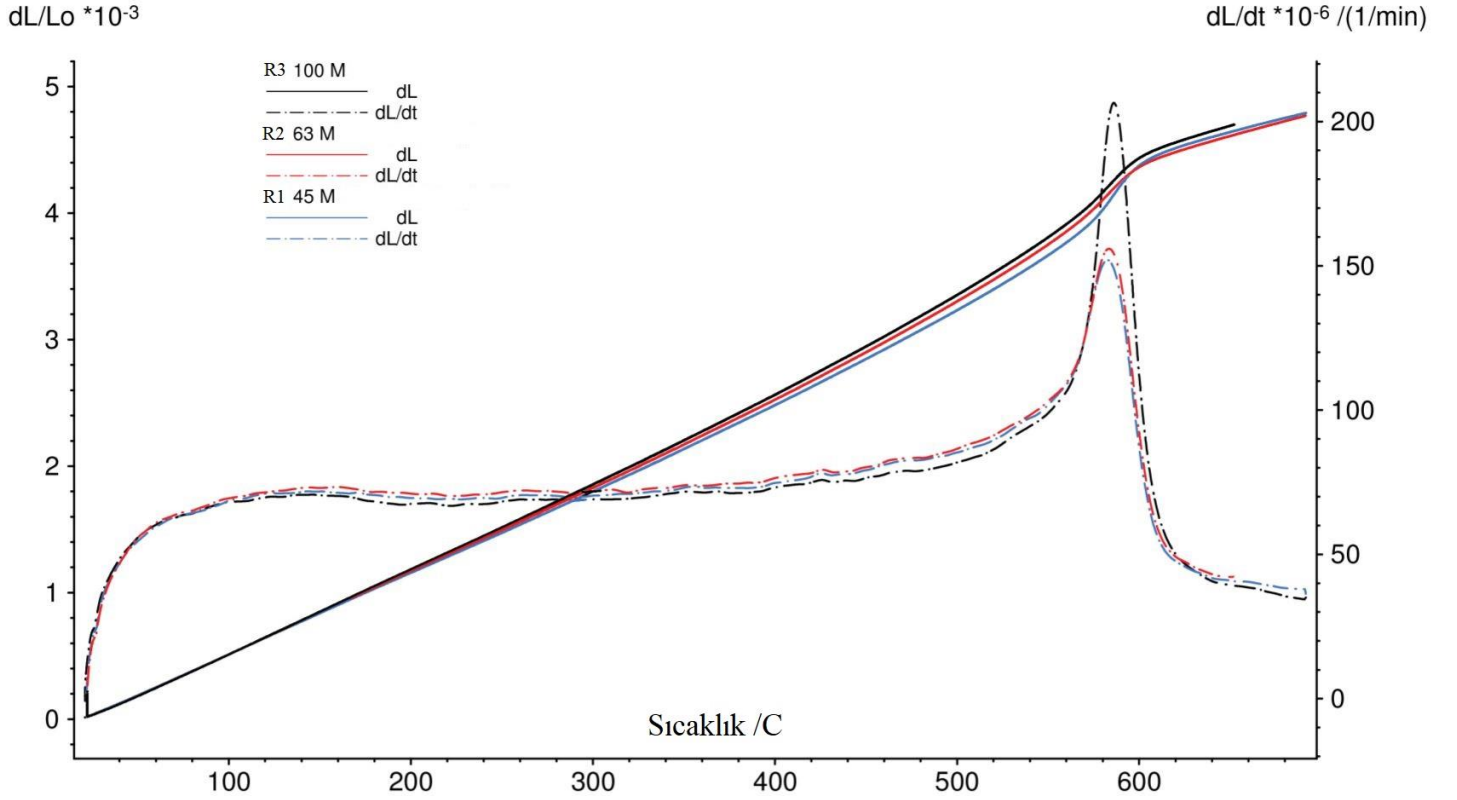


Şekil 4. R1, R2 ve R3 bünyelerine ait 45 μm üzeri elek bakiyelerine göre sırlı-sırsız pişme mukavemeti grafiği

3.2 Termal Özellikler

Farklı kuvars tane boyutunda hazırlanan reçetelere ait termal genleşme katsayısı ölçümleri Şekil 5'de verilmiştir. Kil bazlı seramik bünyelerde sinterleme sonrası bünyede kalan serbest kristal kuvars, termal genleşme katsayısını yükseltir. Temel olarak kristal kuvars fazı polimorfik dönüşümü genleşme katsayısını önemli ölçüde artırır[Tarhan, M. et al. (2016), Tarhan M. et al. (2019)]. Reçeteler hazırlanırken kullanılan kuvars tane boyutu düştükçe termal genleşme katsayısı azalmaktadır (Tablo 6). Bu davranış kalıntı kuvars miktarı ile açıklanabilir. Şekil 5'de 560-640°C aralığının birincil türevi incelendiğinde R3 reçetesinin bu aralıktaki pik yüksekliğinin fazla olması sistemdeki kristal kuvars miktarının fazla olduğunu göstermektedir. R1 ve R2 kompozisyonlarındaki kalıntı kuvars miktarı birbirine benzer olmakla birlikte 45 mikron altı kuvars boyutunda hazırlanan reçetede en düşük kristal kuvars miktarına sahip olduğu belirlenmiştir. Kuvars tane boyutunun düşmesiyle daha fazla kuvars çözünerek amorf faz oluşunu arttırmakta ve su emme

değeri de düşmektedir. Termal genişleme katsayıları Tablo 5'te verilmiştir. Kuvars tane boyutu yükseldikçe termal genişleme katsayısı da yükselmektedir.



Şekil 5. Farklı kuvars tane boyutu kullanılarak hazırlanan reçetelere ait termal genişleme katsayısı ölçümleri grafiği

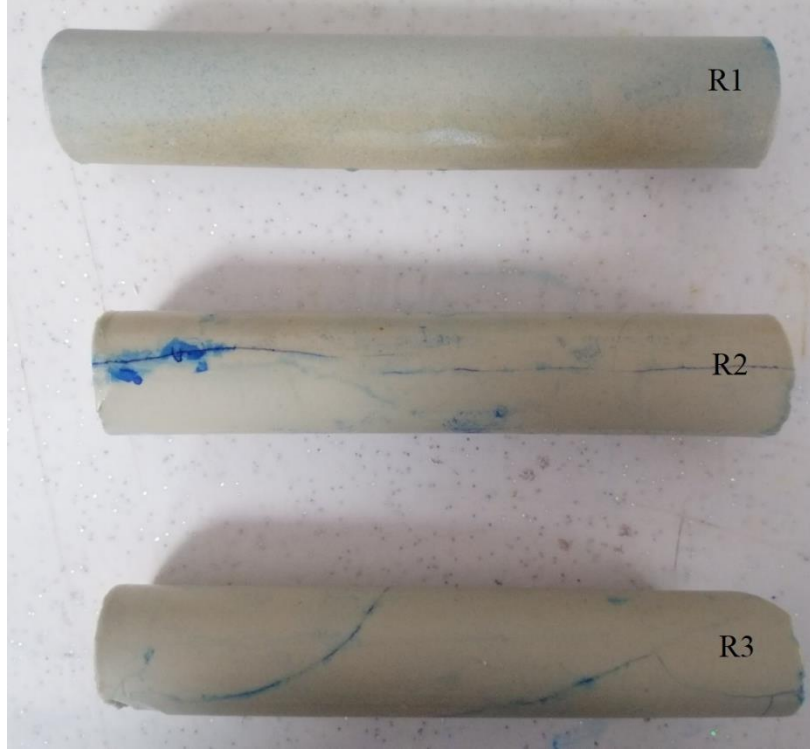
Tablo 6. Reçeteler ait termal genişleme katsayıları

Reçete Kodları	α 300x10 ⁻⁷	α 400x10 ⁻⁷	α 500x10 ⁻⁷	α 600x10 ⁻⁷
R1	64,3	65,3	67,4	75,6
R2	65,3	66,5	68,9	75,4
R3	66,4	67,6	70,0	76,7

Termal şok dayanımlarının belirlenmesi için sırasıyla 140, 150 ve 160 °C sıcaklık farkı olacak biçimde etüvde ısıtılarak sabit sıcaklığa getirilen ekstrüzyonda hazırlanmış numuneler oda sıcaklığındaki suya atılarak test edilmişlerdir. Yapılan test sonucunda R3 kodlu numune 150 °C'de çatlamaya başlarken 160 °C sıcaklığa dayanan R1 kodlu numune olmuştur. Numune aniden soğuk su içine atıldığında, numunenin içi ve dışı arasında bir sıcaklık farkı oluşur. Bu da numunede gerilmelere neden olur. Numunelerin bünyesinde bulunan mevcut çatlakların ilerlemesi nedeniyle kırılmayı kolaylaştırır ve şok kırılması meydana gelir[Tarhan, B. et al. (2017)]. Özellikle kuvars çevresinde var olan ya da termal şok testi sırasında oluşan ya da ilerleyen çatlaklar numunenin mukavemetini ve servis ömrünü etkilemektedir. Yapılan test sonucunda ΔT sıcaklık farkı sonucu olan çatlamlar bütün kompozisyonlar için işletme sınırları içindedir.

Tablo 7. Termal şok analiz sonuçları

ΔT (°C)	R1	R2	R3
140	Çatlak Yok	Çatlak Yok	Çatlak Yok
150	Çatlak Yok	Çatlak Yok	Çatlak Var
160	Çatlak Yok	Çatlak Var	Çatlak Var

**Şekil 6.** $\Delta T=160^{\circ}\text{C}$ 'de bünyelere yapılan termal şok testi sonucu

4.Genel Sonuçlar

Bu çalışmada 3 farklı tane boyutuna sahip kuvars kullanılarak hazırlanan porselen izolatör bünyelerinin teknolojik özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda kuvars tane boyutu düştükçe porozite ve su emme değerleri azalmaktadır. Pişme küçülme değeri yükselmiştir. Bu da bünyelerde kuvars tane boyutunun düşmesiyle bünye sinterlenme özelliklerinin geliştiğini göstermektedir. Deformasyon değeri de kuvars tane boyutunun düşmesiyle artmıştır ancak buna rağmen elde edilen deformasyon değeri üretim standartları içindedir. Ürün kalitesini ve elektrik santrallerindeki bağlanma noktalarını etkileyen bu değer değeri işletme standartları içindedir. Tane boyutunun düşmesiyle Mukavemet hem sırlı hem de sırsız değerlerinde gözle görülür bir artış belirlenmiştir. Kuvars tane boyutu arttıkça termal genişleme katsayısı da bir miktar yükselmiştir. Tane boyutu yükseldikçe termal sok dayanımları azalmıştır. Yapılan çalışma sonucunda kuvars tane 45 mikronun altında olması teknolojik özellikleri iyileştirdiği belirlenmiştir.

Referanslar

Agenor De Noni Junior, Dachamir Hotza, Vicente Cantavella Soler, Enrique Sanchez Vilches 'Effect of quartz particle size on the mechanical behaviour of porcelain tile subjected to different cooling rates' Journal of the European Ceramic Society Volume 29, Issue 6, April 2009, Pages 1039-1046

Andrew Ruys, "Alumina Ceramics Biomedical and Clinical Applications", 1st Edition, - October 20, 2018.

B. Tütmez, O. Bayat, 'Karolarda Su Emmenin İstatistiksel Kontrolü', 1999

Boussouf L, Zehani F, Khenioui Y, Boutaoui N (2018) Effect of Amount and Size of Quartz on Mechanical and Dielectric Properties of Electrical Porcelain. Trans Indian Ceram Soc 77: 132-137

- Braganc,a, S. R. and Bergmann, C. P., A view of whitewares mechanical strength and microstructure. *Ceram. Int.*, 2003, 29, 801–806
- Bragança, S.R., Bergmann, C.P., Hübner, H., “Effect of quartz particle size on the strength of triaxial porcelain”, *J. Eur. Ceram. Soc.*,26, 3761–3768, 2006
- German, R.M., Suri, P., and Park, S.J., “Review liquid phase sintering”, *J. Mater. Sci*, 44, 1-39,2009
- Johannes Liebermann, ' High-voltage Insulators: Basics and Trends for Producers, Users, and Students', 2012.
- Jos´e M. Amig, Francisco J. Serrano, Marek A. Kojdecki, Joaquin Bastida, Vicente Esteve, Maria Mercedes Reventos, Francisco Marti, ' X-ray diffraction microstructure analysis of mullite, quartz and corundum in porcelain insulators', *Journal of the European Ceramic Society*, 25, (2005), 1479–1486.
- Kane, S. C. and Cook, R. L., Effect of grinding and firing treatment on the crystalline and glass content and physical properties of whitewares bodies. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1951, 34, 145–151
- Kivitz, E., Palm, B., Heinrich, J.G., Blumm, J., Kolb, G., “Reduction of the porcelain firing temperature by preparation of the raw materials”, *J.Eur.Ceram. Soc.*, 29, 2691-2696, 2009
- Stathis G, Ekonomakou A, Stournaras CJ, Ftikos C (2004) Effect of firing conditions, filler grain size and quartz content on bending strength and physical properties of sanitaryware porcelain. *J Eur Ceram Soc* 24: 2357-2366
- T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, İzolatörler, Elektrik-Elektronik Teknolojisi, 2011.
- Tarhan B. ve Tarhan M. , "Çanakkale bölgesi alkali kaynağının seramik sağlık gereçleri bünyesi ısıl ve mikroyapı özellikleri üzerine etkisi", *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, c. 10, sayı. 2, ss. 675-687, Haz. 2019, doi:10.24012/dumf.504331
- Tarhan, B., Tarhan, M. Utilization of perlite as an alternative raw material in the production of ceramic sanitaryware. *J Therm Anal Calorim* 147, 3509–3518 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10784-5>
- Tarhan, B., Tarhan, M., & Aydın, T., (2017), Reusing sanitaryware waste products in glazed porcelain tile production. *Ceramics International*, 43(3), 3107-3112.
- Tarhan, M. & Tarhan, B. (2019). Sırlı Porselen Karo Üretimi için Alternatif Hammadde Olarak Eşme/Uşak Feldispatı . *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19 (2) , 429-438. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid/issue/48783/523365>
- Tarhan, M. (2019). Porselen Karo Üretimlerinde Konya Kili Kullanımı. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11 (2) , 705-712. DOI: 10.29137/umagd.556840
- Tarhan, M. Whiteness improvement of porcelain tiles incorporated with anorthite and diopside phases. *J Therm Anal Calorim* 138, 929–936 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08268-8>
- Tarhan, M., Tarhan, B. (2019). Afyon Kilinin Porselen Karo Bünyelerinde Kullanımının Araştırılması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11 (1) , 275-281 . DOI: 10.29137/umagd.433307
- Tarhan, M., Tarhan, B., & Aydın, T., (2016)., The effect of fine fire clay sanitaryware wastes on ceramic wall tiles. *Ceramics International*, 42(15), 17110-17115.
- Turkmen O, Kucuk A, Akpinar S (2015) Effect of wollastonite addition on sintering of hard porcelain. *Ceram Int* 41: 5505-5512
- W.D. Kingery, H.K. Bowen, D.R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, second ed., John Wiley & Sons Inc., New York, 1976, pp. 816-819



Darknet Web Traffic Classification via Gradient Boosting Algorithm

Fahrettin Horasan¹ , Ahmet Haşim Yurttakal² 

¹Kırıkkale University, Engineering Faculty, Department of Computer Engineering, Kırıkkale, Turkey
²Afyon Kocatepe University, Engineering Faculty, Department of Computer Engineering, Afyon, Turkey

Başvuru/Received: 16/05/2022 *Kabul / Accepted:* 29/07/2022 *Çevrimiçi Basım / Published Online:* 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Abstract

Classification of network traffic not only contributes to improving the quality of network services of institutions, but also helps to protect important data. Machine learning algorithms are frequently used in the classification of network traffic, since port-based and load-based classification processes are insufficient in encrypted networks. In this study, VPN and Tor network traffic combined in the Darknet category was classified with the Gradient Boosting Algorithm. 70% of the dataset is reserved for training and 30% for testing. 10 fold cross validation was applied in the training set. Network Flows in 8 different categories: Audio-Streaming, Browsing, Chat, E-mail, P2P, File Transfer, Video-Streaming and VOIP were classified with 99.8% accuracy. The proposed method automated the process of network analysis from the Darknet. It enabled organizations to protect the important data with high accuracy in a short time.

KeyWords

“Network flows, web traffic, darknet, gradient boosting, classification”

1. Introduction

The Internet is one of the greatest inventions in human history. Its development still continues today. According to a study on digital life, as of January 2021, the number of people using the internet in the world has increased by 7.3 percent compared to the previous year and has been determined as 4.66 billion (Anonymous, 2021). There are millions of web pages, databases and servers running constantly on the internet network. Websites that can be found on this network using known search engines are called the surface network. The network of hidden websites that can be accessed with a special web browser such as Tor is called the Darknet. Used to keep internet activity anonymous and private (Sui et al. 2015). The Darknet can contain malware such as keyloggers, botnets, ransomware. Analyzing Darknet traffic helps with early monitoring of malware before an attack and detecting malicious activity after an outbreak (Kaur and Randhawa, 2020).

Classification of web traffic flows is used effectively in areas such as network monitoring, service quality, intrusion detection and network security. Network flows created by packets that have the same source IP, port, destination IP, port, TCP, and UDP information are determined by which application they belong (Cao et al., 2014). One of the methods used to classify web traffic is the classification for the use of port numbers. It can be easily classified according to the port information determined by IANA. For example, HTTP uses port 80, SSH uses port 22, SMTP uses port 25. However, for some applications, there may not be a port number registered with IANA (Degermark et al. 1999). In addition, the use of dynamic port numbers or masking techniques has led to the inadequacy of port-based classification systems. Load-based classification systems, which is another classification method, gave more successful results than port-based systems after examining the content of the load. However, its insufficiency in encrypted networks has left its place to machine learning-based approaches due to costs (Karagiannis et al., 2004).

Machine learning is the general name for automated data analysis methods for statistical pattern recognition and modelling. It allows learning new information from data, finding hidden information or patterns (Petit et al. 2018). Successful studies have been made in classifying network traffic with machine learning techniques. Jun et al. (2007) proposed a method using Genetic Algorithm-based feature selection and machine learning algorithms such as C4.5, Random Forest, K Nearest Neighborhood. Liu et al. (2007), use K-Means Clustering to classify network traffic and achieve 90% accuracy.

The studies on the CICDarkNet2020 dataset have been examined in detail. Li and Lu (2021) performed a two-stage classification in their proposed deep learning model. In the first stage, VPN-nonVPN-Tor-nonTor classification was made, while in the second stage, an application-based classification was made. As a result, an accuracy of 97.65% was obtained. Li et al. (2021), CNN and K-means Clustering combined methods obtained 97.4% accuracy. Iliadis and Kaifas (2021), Benign and Darknet binary classification and Tor-nonTor-VPN-nonVPN multiclass classification. They obtained an average of 98% accuracy in their studies using the Random Forest Algorithm. Jadav et al. (2021) benign Darknet classification in their work, Synthetic Minority Oversampling Technique and Principal Component Analysis, after making classification with machine learning algorithms.

Recently, Rust-Nguyen and Stamp (2022) made classification with Support Vector Machines, Random Forest, Convolutional Neural Networks and Generative Adversarial Networks. Gupta, Jindal, and Pedi (2021) used the Extreme Gradient Boosting algorithm to divide the dataset into 3 classes: normal traffic, TOR traffic and VPN traffic. Júnior and Bianchi (2021) on the other hand, tested the performance of the Deep Reinforcement Learning Algorithm. Chang and Branco (2021) recommended Graph-based methods. In another study, Sarwar et al. (2021) achieved 96% accuracy in detecting darknet traffic via Convolutional Neural Network-Long Short Term Memory. Aswad and Sonuç (2020) reached 96.76% accuracy in their classification using Apache Spark and artificial neural networks. Singh et al. (2021) After transforming the time-based features into a three-dimensional image with the DeepInsight method, it classified with 10 different pre-trained models such as AlexNet and ResNet50. As a result, the VGG19 achieved 96% accuracy. Demertzis et al. (2021) proposed the weight agnostic neural networks method to classify real-time network traffic. As a result, it achieved 94% accuracy.

In this study, encrypted network traffic in VPN and DarkNet networks is classified by Gradient Boosting Algorithm. As a result, it achieved a high accuracy rate of 99.8%. In classification performance, the F1 Score value of each class has exceeded 99%. The proposed method is fast, highly accurate, time-saving, user-independent and inexpensive. In the second part of the article, the material method was presented, in the third part the experimental findings, and in the fourth part the discussion and conclusion were presented.

2. Material And Methods

2.1. Dataset

In this study, CICDarkNet2020 dataset was used. The dataset is a combination of ISCXTor 2016 and ISCXVPN2016 datasets covering Tor and VPN traffic. There are 8 different types of encrypted benign and dark network traffic data: Browsing, P2P, Audio-Streaming, Chat, File-Transfer, Video-Stream, Email, VOIP. It consists of 116711 rows and 69 columns (Lashkari et al. 2020). In Table 1, traffic types of the dataset, label numbers assigned to each traffic type and application examples are given.

Table 1. Traffic Types

Label ID	Traffic Category	Applications used
1	Browsing	Firefox and Chrome
2	P2P	uTorrent and Transmission (BitTorrent)
3	Audio-Streaming	Vimeo and Youtube
4	Chat	ICQ, AIM, Skype, Facebook and Hangouts
5	File-Transfer	Skype, SFTP, FTPS using Filezilla and an external service
6	Video-Stream	Vimeo and Youtube
7	Email	SMTPS, POP3S and IMAPS
8	VOIP	Facebook, Skype and Hangouts voice calls

2.2. Gradient Boosting Algorithm

Gradient boosting is one of the ensemble learning techniques used in classification and regression tasks. A collection of weak predictive models typically produces a prediction model in the form of decision trees. It builds the model incrementally, as other augmentation methods do, and generalizes it, allowing optimization of the loss function. They are algorithms that optimize a cost function over the function space by iteratively selecting a function pointing to the negative gradient direction. (Friedman, 2001).

2.3. Evaluation Metrics

In order to evaluate the performance of the gradient boosting model proposed in the study, the error matrix, in which the predictions of the target feature and the actual values are compared, was used. Figure 1 shows confusion matrix.

		Predicted labels	
		Negative (N)	Positive (P)
True labels	Negative (N)	TN	FP
	Positive (P)	FN	TP

Figure 1. Confusion matrix

In the confusion matrix, the terms given can be used to calculate various metrics. The formulas of the metrics used in the evaluation are given in the following equations (1-4).

$$\text{Recall} = TP / (TP + FN) \tag{1}$$

$$\text{Precision} = TP / (TP + FP) \tag{2}$$

$$\text{Accuracy} = (TP + TN) / (P + N) \tag{3}$$

$$\text{F1 Score} = 2TP / (2TP + FP + FN) \tag{4}$$

3. Experimental Results

The application was developed in an open source Python environment. 70% of the dataset is reserved for training and 30% for testing. The features in the dataset of network traffic were used in the classification. The training and test data numbers for each traffic type are given in Table 2.

Table 2. Train and Test Sets

Label ID	Traffic Type	Train Set	Test Set	Total
1	Browsing	22947	9736	32683
2	P2P	16776	7388	24164
3	Audio-Streaming	12535	5359	17894
4	Chat	8012	3450	11462
5	File-Transfer	7817	3276	11093
6	Video-Stream	6843	2874	9717
7	Email	4253	1884	6137
8	VOIP	2514	1047	3561
Total		81697	35014	116711

In the preprocessing phase, the timestap property is converted to seconds. All features used in classification have been digitized. In the classification phase, Gradient Boosting Algorithm hyper parameters have been determined. The learning rate is 0.1, the loss function

is log_loss, the boosting number is 100, and the maximum depth is 3. The confusion matrix resulting from the classification is given in Figure 2.

Confusion matrix

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	9728	0	0	0	6	2	0	0
2	3	7385	0	0	0	0	0	0
3	2	0	5339	17	1	0	0	0
4	3	0	0	3446	0	1	0	0
5	0	0	0	2	3260	0	14	0
6	0	0	0	0	0	2873	0	1
7	0	0	0	0	3	0	1881	0
8	0	0	1	0	0	0	0	1046
	1	2	3	4	5	6	7	8

Predicted

Figure 2. Confusion matrix

The dataset is trained with other machine learning algorithms. KNeighbors Algorithm reached 87%, Logistic Regression 78%, Random Forest 98%, Support Vector Machine 82%, Linear Discriminant Analysis 70%, Extra Tree Classifier 96% accuracy values. Gradient Boosting Algorithm achieved the most successful result with 99.8% accuracy. Other performance metrics obtained are given in Table 3. The proposed algorithm has achieved over 99% success in every metric for all classes.

Table 3. Performance metrics

Label Id	Class	Recall	Precision	F1-Score
1	Browsing	99.918	99.918	99.918
2	P2P	99.959	100.00	99.979
3	Audio-Streaming	99.627	99.981	99.803
4	Chat	99.884	99.452	99.667
5	File-Transfer	99.512	99.694	99.602
6	Video-Stream	99.965	99.896	99.930
7	Email	99.841	99.261	99.550
8	VOIP	99.904	99.904	99.904

Kim and Lee (2022) used XGBoost and LightGBM techniques for darknet traffic detection and classification. LightGBM algorithm showed faster and higher performance than XGBoost, reducing hyper parameter tuning time by more than 10 times. They achieved an F1 score of 94% for Browsing. Sridhar and Sanagaravapu (2021) performed feature selection on the dataset with the Chi-Square method, and then used Generative Contradiction Networks to eliminate the imbalance of the classes. In the classification phase, they obtained an F1 score of 97.87% with the Random Forest classifier. Lan et al. (2022) obtained 92.22% accuracy and 92.10% macro F1 score as a result of the classification they made with Convolutional Neural Network and bidirectional Long Short Term Memory network. In this study, over 99% F1 score was obtained for all classes with the proposed methods and parameters.

4. Conclusion

Classification of network traffic is used to increase service quality, to analyze network traffic data properly, and to detect attacks. In this study, encrypted network traffic in VPN and DarkNet networks is classified. Network traffic is classified only on the basis of application. After all network features have been digitized, they have been classified with 7 different machine learning algorithms: KNeighbors Algorithm Logistic Regression, Random Forest, Support Vector Machine, Linear Discriminant Analysis, Extra Tree Classifier and Gradient Boosting Algorithm. As a result, the Gradient Boosting Algorithm achieved the highest success with an accuracy rate of 99.8%. The proposed method saves time and is user-independent and has a high accuracy rate. The obtained results are encouraging for future studies.

Acknowledgements

There is no conflict of interest. There is no funding. The authors approved the final version of the article.

References

- Aswad, S. A., & Sonuç, E. (2020, October). Classification of VPN network traffic flow using time related features on Apache Spark. In 2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT) (pp. 1-8). IEEE.
- Cao, Z., Xiong, G., Zhao, Y., Li, Z., & Guo, L. (2014, November). A survey on encrypted traffic classification. In International Conference on Applications and Techniques in Information Security (pp. 73-81). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Chang, L., & Branco, P. (2021). Graph-based Solutions with Residuals for Intrusion Detection: the Modified E-GraphSAGE and E-ResGAT Algorithms. arXiv preprint arXiv:2111.13597.
- de Araújo Júnior, S. R., & Bianchi, R. A. (2021, November). A Model for Traffic Forwarding through Service Function Chaining using Deep Reinforcement Learning Techniques. In Anais do XVIII Encontro Nacional de Inteligência Artificial e Computacional (pp. 619-630). SBC.
- Degermark, M., Nordgren, B., & Pink, S. (1999). RFC2507: IP header compression. RFC Editor.
- Demertzis, K., Tsiknas, K., Takezis, D., Skianis, C., & Iliadis, L. (2021). Darknet traffic big-data analysis and network management for real-time automating of the malicious intent detection process by a weight agnostic neural networks framework. *Electronics*, 10(7), 781.
- Digital 2021: the latest insights into the state of digital - We Are Social UK, We Are Social UK, Jan. 27, 2021. [Online]. Available: <https://wearesocial.com/uk/blog/2021/01/digital-2021-the-latest-insights-into-the-state-of-digital/>. [Accessed: May 16, 2022]
- Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Annals of statistics*, 1189-1232.
- Gupta, N., Jindal, V., & Bedi, P. (2022). Encrypted Traffic Classification Using eXtreme Gradient Boosting Algorithm. In International Conference on Innovative Computing and Communications (pp. 225-232). Springer, Singapore.
- HabibiLashkari, A., Kaur, G., & Rahali, A. (2020, November). DIDarknet: A Contemporary Approach to Detect and Characterize the Darknet Traffic using Deep Image Learning. In 2020 the 10th International Conference on Communication and Network Security (pp. 1-13).
- Iliadis, L. A., & Kaifas, T. (2021, July). Darknet Traffic Classification using Machine Learning Techniques. In 2021 10th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST) (pp. 1-4). IEEE.
- Jun, L., Shunyi, Z., Yanqing, L., & Zailong, Z. (2007, August). Internet traffic classification using machine learning. In 2007 Second International Conference on Communications and Networking in China (pp. 239-243). IEEE.
- Karagiannis, T., Broido, A., Faloutsos, M., & Claffy, K. C. (2004, October). Transport layer identification of P2P traffic. In Proceedings of the 4th ACM SIGCOMM conference on Internet measurement (pp. 121-134).
- Kaur, S., & Randhawa, S. (2020). Dark web: A web of crimes. *Wireless Personal Communications*, 112(4), 2131-2158.
- Kim, J., & Lee, S. J. (2022). Darknet Traffic Detection and Classification Using Gradient Boosting Techniques. *Journal of the Korea Institute of Information Security & Cryptology*, 32(2), 371-379.
- Lan, J., Liu, X., Li, B., Li, Y., & Geng, T. (2022). DarknetSec: A novel self-attentive deep learning method for darknet traffic classification and application identification. *Computers & Security*, 116, 102663.
- Li, Y., & Lu, Y. (2021). ETCC: Encrypted two-label classification using CNN. *Security and Communication Networks*, 2021, 1-11.
- Li, Y., Lu, Y., & Li, S. (2021, May). EZAC: Encrypted Zero-day Applications Classification using CNN and K-Means. In 2021 IEEE 24th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD) (pp. 378-383). IEEE.
- Petit, C., Bezemer, R., & Atallah, L. (2018). A review of recent advances in data analytics for post-operative patient deterioration detection. *Journal of clinical monitoring and computing*, 32(3), 391-402.
- Rust-Nguyen, N., & Stamp, M. (2022). Darknet Traffic Classification and Adversarial Attacks. arXiv preprint arXiv:2206.06371.
- Sarwar, M. B., Hanif, M. K., Talib, R., Younas, M., & Sarwar, M. U. (2021). DarkDetect: darknet traffic detection and categorization using modified convolution-long short-term memory. *IEEE Access*, 9, 113705-113713.
- Singh, D., Shukla, A., & Sajwan, M. (2021). Deep transfer learning framework for the identification of malicious activities to combat cyberattack. *Future Generation Computer Systems*, 125, 687-697.
- Sridhar, S., & Sanagavarapu, S. (2021, November). DarkNet Traffic Classification Pipeline with Feature Selection and Conditional GAN-based Class Balancing. In 2021 IEEE 20th International Symposium on Network Computing and Applications (NCA) (pp. 1-4). IEEE.
- Sui, D., Caverlee, J., & Rudesill, D. (2015). *The deep web and the darknet*. Washington DC: Publication of the Wilson Center.



Waypoint-Based Path Tracking Approach For Self-Organized Swarm Robots

Oğuz Mısır¹ , Muhammed Çelik² , Levent Gökrem² 

¹ Turhal Vocational High School Electronics and Automation Dept., Tokat Gaziosmanpaşa University, Tokat, TURKEY

² Faculty of Engineering and Architecture Mechatronics Eng. Dept., Tokat Gaziosmanpaşa University, Tokat, TURKEY

Başyuru/Received: 18/05/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Abstract

In this paper, a waypoint-based path tracking approach is suggested for the swarm robots to follow the desired path in an organized way. In the study, the applicability of the waypoint-based path tracking on the swarm robots that show flexible and scalable behavior has been demonstrated. To evaluate the proposed path planning approach with regard to scalability and flexibility, simulations have been applied in with/without obstacle arenas with different numbers of robots and according to different lookahead distances. With the proposed approach, each swarm robots exhibit swarm behavior in an organized manner depending on the distance of the lookahead to the path to track in the with / without obstacle arenas.

Key Words

“Self organizing, waypoints, path following, swarm robots, pure pursuit method, collision avoiding”

1. Introduction

Path tracking is one of the most important tasks for autonomous vehicles and mobile robots. Path tracking for a mobile robot is the determination of the path that a robot will travel from the starting position to the final position it will reach (J. Kim & Kim, 2020). The path tracking approach can consist of multiple points for the robot to follow to reach the target point. These points are named as waypoints (Saeed et al., 2020).

The increase in the number of mobile robots and the development of each robot's abilities to perform tasks have increased the ability of robots to perform difficult tasks by collaborating in a coordinated manner (Gong et al., 2020). In recent years, the increase in research on the collaboration of robots in multiple robot systems in a coordinated manner has been remarkable.

The robots encounter obstacles and other robots in the process of following the desired path and they are expected to reach their final positions without collision (Oliveira et al., 2013). It is aimed that the robots follow the shortest distances in the desired path trajectory and the path under the most suitable conditions according to the robot characteristics. Optimum conditions at the path tracking stage includes criteria such as robot velocity, avoidance of obstacles and robot collisions, orbital planning suitable for robot kinematics and dynamics (Chen et al., 2018).

Path tracking control approaches generally include geometric and model based (kinematic and dynamic) methods (Cibooglu et al., 2017). Geometric path tracking is based on geometric correlation between the robot and the desired path. Depending on the distance the robot will follow, the movement of the robot is determined based on the lookahead distance (Bacha et al., 2017; Cibooglu et al., 2017). Geometric path tracking methods can be done by controllers that enable the robots to move in the path orbit they will follow. The most researched and studied geometric path tracking methods are listed as Pure-Pursuit (Craig Coulter, 1990), Stanley (Thrun et al., 2006) and Vector Pursuit (Yeu et al., 2006). Pure-Pursuit algorithm is more preferred in terms of applicability and efficiency among the geometric path tracking methods. Pure-Pursuit algorithm makes geometric calculations to follow the desired path of the robot or vehicle (Lal et al., 2018). In these calculations, the robot determines its movement according to the relative position of the robot to the center of gravity of the path to be followed and applies the path tracking according to the viewpoint of the distance between the robot and the path and the heading direction of the robot. In the literature, the robot heading direction distance is called Lookahead Distance (Horvath et al., 2019). Model tracking methods provide path tracking control depending on the kinematic and dynamic model structure of the robot / vehicle in path tracking (Cibooglu et al., 2017; Patle et al., 2019). Kinematic path tracking methods use position, speed, and acceleration parameters to enable the robot to track the path. In dynamic path tracking methods, the robot behavior is determined depending on the dynamic effects of the robot along the trajectory that the robot will follow (Morgansen et al., 2007; Patle et al., 2019; Zhou et al., 2017).

Most of the work on path tracking is done with single mobile robots. The increase of work efficiency of multiple robot systems in recent years has brought the popularity of swarm robots to the fore. Multiple robot systems can consist of heterogeneous robot sets with different abilities or swarm robot sets with similar features (Bayindir & Şahin, 2007). It is noteworthy that the studies on the coordinated path tracking of the swarm robots are limited (Heo et al., 2018).

Swarm robot systems are a robotic approach that aims to perform robots with simple features by using collaboration power together (Heinrich et al., 2019). The main and the most important feature of the swarm robotic approach is that the robots move without any central control unit (Mısır et al., 2020). Robots with simple features are required to be flexible, robust and scalable during the tasks they carry out (Bayindir, 2016). Swarm robots determine their own organization according to the conditions around them and this show that they are flexible in the task they perform. Despite the increase or decrease of the number of robots their performance shows that they are scalable. The fact that the swarm robots show a strong behavior in the face of the problems they face while performing the tasks reveals their robust characteristics (Soysal et al., 2007).

The main source of motivation of this study is to demonstrate the applicability of waypoint-based path tracking on swarm robots that exhibit flexible and scalable behavior. The main contribution of this study is to examine the Pure-Pursuit path tracking algorithm in the literature on robots that move in a swarm that has simple and same features. In the study, an approach is proposed for the swarm robots to cooperate in an organized way on a desired path and to track the waypoint-based path. In this approach, the error of the path distance according to the reference trajectory is minimized by keeping the swarm motion of each of the swarm robots and it is ensured that the swarm robots reach the waypoints. The Vector Field Histogram (VFH) method is used to avoid collisions and obstacles when each robot is close enough to collide an obstacle or neighboring robots. With the proposed approach, each swarm robots exhibit organized swarm behavior based on the lookahead distance to the path it will follow. In the study, several systematic experiments have been applied to evaluate the proposed path tracking approach in terms of scalability and flexibility. These systematic experiments were carried out in a simulated environment with different numbers of robots and different look ahead distances in the with/without obstacle arena.

This paper is organized as follows; related works are explained in section 2. In the 3rd section, the proposed approach in addition to swarm robot kinematics, Pure-Pursuit and VFH methods is explained. In section 4, it includes experimental setup and problem definition. Experimental results are given in section 5. Section 6 consists of results.

2. Related Works

Path tracking studies generally focus on geometrical and model-based methods. In addition to these studies, current intuitive and evolutionary control methods are also available. In this section, studies on current path tracking are examined.

(Chandrasekhar Rao et al., 2018) have improved Krill Herd (KH) in order to create efficient path navigation by using KH behaviors. They expressed the algorithm that they developed as Improved KH (IKH). They compared KH and Differential Evolution (DE) algorithms to evaluate the efficiency of their proposed algorithm. According to their results, they reported that the HR algorithm yielded better results in the experimental and simulation environment compared to other algorithms.

In a recent study by (Lee et al., 2019) the model-based Linear Quadratic Gauss (LQG) is proposed with an adaptive Q-matrix for noise, path-related errors and problems in the process of tracing control. It is noteworthy that the proposed method is adaptable even if the vehicle technical and dynamic characteristics change. It has been stated that the experimental results obtained at various speeds give better results than other conventional path tracking algorithms.

(Wang et al., 2019) proposed model predictive control (MPC) using the fuzzy adaptive weight approach. They used MPC to monitor paths with minimal errors and to increase ride comfort during the path tracking process. With the MPC approach they have proposed, they have achieved control according to the dynamic structure of the vehicle they use. They also compared their approach with one of the other traditional approaches and achieved improvements.

(Zhang et al., 2019) study, an edible path tracking method based on Double Deep Q Network (Double DQN) is presented. The proposed approach applied the DQN based controller both with a robot used in lawn applications and in the simulation environment. They compared the Pure-Pursuit algorithm to test the performance of their proposed DQN-based controller.

(Yaguchi & Tamagawa, 2020) propose waypoint navigation that can avoid obstacle and robot collisions using the artificial potential method (APF). They proposed a new waypoint method with random priority APF method for waypoint-based path tracking method. Shan et al. (Shan et al., 2015) proposed a new Pure-Pursuit-based method called CF-Pursuit. To reduce the fitting error with the proposed method, a clothoid "C" ¹ curve is used to change the curve used in Pure-Pursuit. This improvement has helped to reduce tracking errors in Pure-Pursuit. Compared to some other geometric controllers, the CF-Pursuit performed better in stability, tracking errors and stability.

Many studies have demonstrated that it is very difficult to achieve a balance between accuracy and stability for most traditional path tracking methods (Ohta et al., 2016; H. G. Park et al., 2018; M. Park et al., 2015). To solve this problem, (Yu et al., 2020) proposed a Pure-Pursuit based path tracking method, called Fuzzy Pure-Pursuit Control with Front Axle Reference (FPPC-FAR). The method was applied on a bus. Firstly, the reference point was moved from the rear axle to the front axle. Secondly, a fuzzy-based parameter setting method has been applied to increase the accuracy and robustness of the tracing controller. Thirdly, a feedback-feedforward control algorithm that improves speed monitoring efficiency has been designed.

(Morales et al., 2009) proposed an effective and generally applicable approach for reactive motion control, based on Pure-Pursuit and commonly used distance detection sensors. In this approach, they tried to make the control of the steering angle more precise and to soften the vehicle response by choosing the distance to look forward. An additional advantage of the approach is the possibility to use the basic Pure-Pursuit strategy as a common framework to track any combination of closed and / or open paths that can be efficient in large-scale environments.

(Bibuli et al., 2014) proposed a swarm-based path tracking guidance system for marine vehicles. The main purpose of the study is to create a formation while maintaining the distance between each other while proceeding along the path as well as the swarm approaching the desired reference path and to protect this formation along the way. The study also shows an aggregation behavior based on the virtual push / pull forces used in another aspect.

(Zhao et al., 2018) proposed self-adaptive collective motion algorithms that enable swarm robots to move towards a certain target on a pre-planned path. The proposed algorithm makes decisions using information from neighboring robots and operates without a central control. The proposed algorithm has been tested in 3 different ways. These are 1) no obstacles or leaders, 2) with a leader and no obstacle, 3) with obstacles (with and without a leader).

3. Method

In this section, waypoint-based path tracking approach is examined in cooperation of swarm robots. Pure-Pursuit is used for waypoint-based path tracking and VFH methods are used to avoid obstacle / collision. An approach that determines the behavior of each swarm robot is suggested in order for the swarm robots to follow the path in cooperation.

3.1. Kinematics of differential drive swarm robot

The modeling of a differential driven mobile robot consists of three steps: kinematic modeling, dynamic modeling and actuator modeling. Kinematic modeling deals with the geometric relations of the model and examines the mathematical structure of the motion, regardless of the effects of external forces (Buccieri et al., 2009; Campion et al., 1996; Oriolo et al., 2002). Dynamic modeling is based on the study of the movement in which forces and energies are included. The actuator must also be modeled to find the relationship between the control signal and the input of the mechanical system. As shown in Figure 1, the configuration of a differential driven mobile robot with two wheels with radius "R" placed at a distance $\frac{L}{2}$ from the robot center can be defined by generalized coordinate.

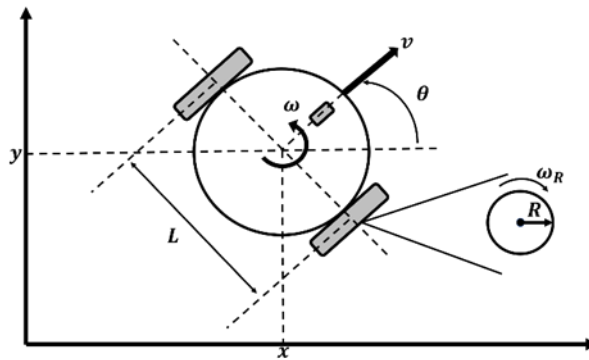


Figure 1. A two-wheeled differentially driven swarm robot and reference parameters

$$q = [x, y, \theta]^T \tag{1}$$

q , represents the generalized coordinate and using the above expression, the kinematic model is represented by Equation (2).

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega \tag{2}$$

As shown in Figure 1, v , represents the linear velocity of the robot and ω , represents the angular velocity of the robot. For the left and right wheels, there is a relationship between the angular velocity and the linear velocity of the two wheels indicated by ω_L and ω_R , respectively, as shown in the following equations.

$$v = \frac{R(\omega_L + \omega_R)}{2} \quad \omega = \frac{R(\omega_L - \omega_R)}{L} \tag{3}$$

Here, the angular velocities ω_L and ω_R are obtained.

$$\omega_L = \frac{v - \left(\frac{L}{2}\right) \omega}{R} \quad \omega_R = \frac{v + \left(\frac{L}{2}\right) \omega}{R} \tag{4}$$

3.2. The Pure-Pursuit method

Pure-Pursuit method is one of the most frequently used methods due to basic and superior(Cibooglu et al., 2017). It is a geometric path planing method in which the mobile robot creates a turning radius to return to the reference path (D. H. Kim et al., 2010). The main purpose of the Pure-Pursuit method is to determine the steering angle that allows the vehicle to go through this target point by determining a continuous target point on the predetermined path. In this way, the path planing problem becomes a simple geometry problem.

The rotation angle that will allow the vehicle to go through the target point is obtained as shown in Equation (5).

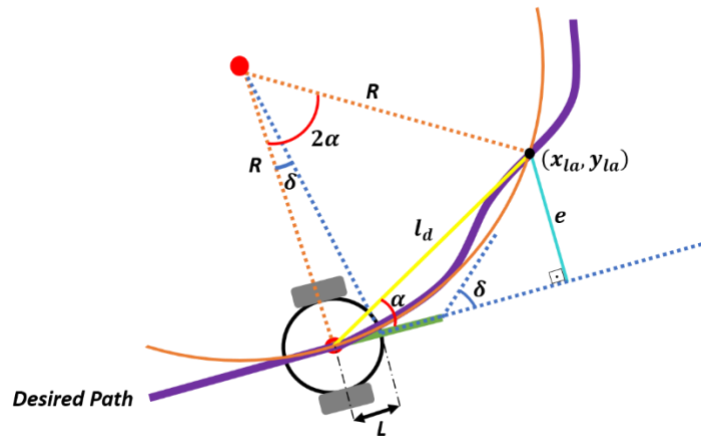


Figure 2. Geometric examination of Pure-Pursuit method

$$\delta_{pp}(t) = \tan^{-1} \left(\frac{2L \sin(\alpha(t))}{l_d} \right) \quad (5)$$

where $\alpha(t)$ is the angle between L and l_d . l_d is the distance between the vehicle's center of axle and the target point (the yellow line in Figure 2). L is the radius of the physical structure of the robot.

Thus, the Pure-Pursuit algorithm can be identified by the pseudocode below (Chen et al., 2018).

Algorithm 1 Pure-Pursuit

- 1: Determine the current position of the vehicle (x, y)
 - 2: Find the closest path tracking position to the vehicle
 - 3: Search to target point (x_{la}, y_{la})
 - 4: Convert the target position to vehicle position
 - 5: Calculate the robot rotation angle for tracking target path
 - 6: Update Vehicle Position
-

The parameter to be set in the Pure-Pursuit method is the lookahead distance (l_d). In this sense, l_d acts as proportional gain (Cibooglu et al., 2017). If l_d is chosen small, the vehicle tracks the path quite precisely, but the control signal, that is, the steering angle, changes rapidly, which can cause oscillations in the response (Snider, 2009). When kept large, the response becomes smoother, but in some cases large corner bends can be seen, which reduce the quality and safety of monitoring. l_d can be adjusted according to the vehicle's path geometry and speed, as shown in previous studies (Hoffmann et al., 2007; Snider, 2009).

3.3. Vector Field Histogram (VFH)

Avoiding obstacles and collisions is one of the most basic tasks in mobile robot systems. To accomplish this task, a real-time obstacle avoidance approach Virtual Force Field (VFF) algorithm has been developed by Borenstein and Koren (Borenstein & Koren, 1989) for fast mobile robots. This approach relates to the orientation of the robot in order to ensure that a mobile robot moving towards the target avoids collisions by detecting unknown obstacles. A grid map approach is used in the proposed approach. In this map, each cell occupied by obstacles creates a virtual force on the robot. In line with the virtual forces that are formed, the mobile robot tries to advance without hitting the obstacles by producing a rotation angle in the direction where the force is low. However, some deficiencies have emerged in this approach (Survey, 2005). The most important of these deficiencies is that the robot cannot move between obstacles close to each other (De Ryck et al., 2020). In order to prevent this, it has been demonstrated that a more effective control is required for local minimum and narrow transitions as well as correcting the control of the rotation angle. Borenstein and Koren introduced the Vector Field Histogram (VFH) algorithm as a new approach to solve these problems (Borenstein & Koren, 1991). VFH is an object-

oriented method of avoiding obstacles. Specifically, VFH is used to represent the environment surrounding the mobile robot, and the next direction of movement is selected based on the cost function of each direction (Qu et al., 2015). The histogram shows the obstacle density seen from the robot perspective. A density of obstacles is constantly calculated in every possible direction. The direction of the robot is towards the region where the obstacle density is low. In addition, this algorithm is not concerned with kinematic and dynamic constraints (Qu et al., 2015).

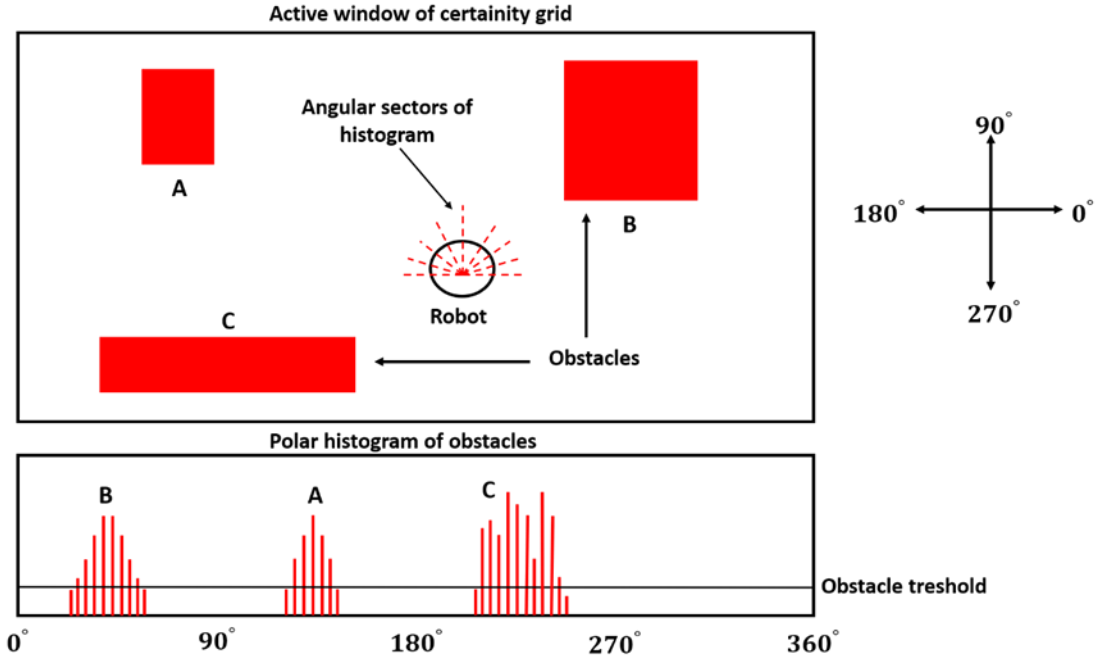


Figure 3. Vector Field Histogram (VFH)(Survey, 2005)

The content of each of the active cells in Figure 3 is represented as an obstacle vector at any (i, j) coordinate. The direction of the obstacle vector is obtained by the expression in equation (6).

$$\beta_{i,j} = \tan^{-1} \left(\frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \right) \quad (6)$$

(x_0, y_0) represents the current position of the robot. (x_i, y_i) represents the coordinates of the cell occupied by an obstacle. The magnitude of the vector in any coordinate (i, j) is obtained by the following equation.

$$m_{i,j} = C(i, j)^2 (a - bd(i, j)) \quad (7)$$

Here $C(i, j)$ represents the precision value of the cell occupied by the obstacles. a and b are positive constant coefficients, and $d(i, j)$ is the distance between the robot and the active cell. The histogram consists of a series of sectors (k) at an arbitrarily chosen angle resolution (Survey, 2005). The sum of the magnitudes of these vectors, which belong to each angle sector, defines their value in the histogram.

$$h_k = \sum_{i,j} m_{i,j} \quad (8)$$

As seen in Figure 3, the resulting histogram consists of peaks and low-value points on the histogram map according to the position and shape of the obstacle. Any histogram value that falls below a predetermined histogram threshold is defined as a candidate low-value point. The algorithm chooses the candidate low value point and moves the robot in this direction. VFH, like other potential field methods, provides a smooth control according to histogram density without any filtering (Survey, 2005).

3.4. Collaboration-based path tracking approach using Pure-Pursuit and VFH for swarm robots

The main parameter used for path tracking in the Pure-pursuit algorithm is lookahead distance (l_d). l_d is the distance from the target point determined by the vehicle for the path to be followed. Depending on the l_d of the vehicle that tracks the path, the heading direction

and speed are determined. Figure 4 shows the collaboration-based path tracking approach flow chart diagram using Pure-Pursuit and VFH methods. Collaboration based path tracking approach using Pure-Pursuit and VFH provides organized path tracking of swarm robots. With the proposed approach, they can follow the predetermined path in a scalable way, depending on the number change of the swarm robots. The swarm robots that follow the paths in an organized way can exhibit flexible behaviors depending on the surrounding obstacles and conditions.

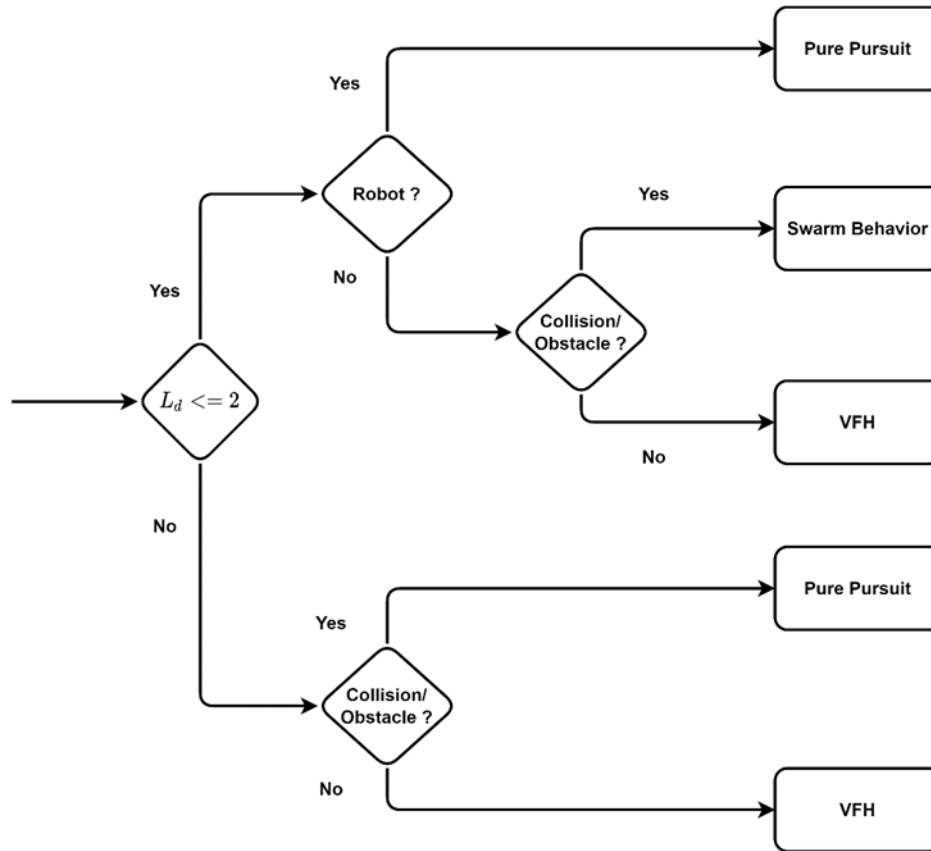


Figure 4. Collaboration based path tracking approach flow chart diagram using Pure-Pursuit and VFH

In the proposed approach, each of the swarm robots decides how path to follow, depending on l_d . Each robot checks if l_d is less than 2 units to the predetermined path. If the l_d value of the swarm robot is more than 2 units, it checks whether there is an obstacle or robot in collision distance around it. If the swarm robot encounters an obstacle or robot under these conditions, it is directed by VFH method in the direction where there is no obstacle or robot. If the swarm robot does not encounter an obstacle or robot, it follows the path with Pure-Pursuit method.

If the l_d value of the swarm robot is less than 2 units, it is checked whether there is a robot in the robot detection area. If there are robot or robots in the detection area of the swarm robot, it approaches the direction of these robots. If the swarm robot gets close enough to collide with an obstacle or robot with this condition, it moves away from the obstacle with the VFH algorithm. Otherwise, it follows the predetermined path with Pure-Pursuit algorithm.

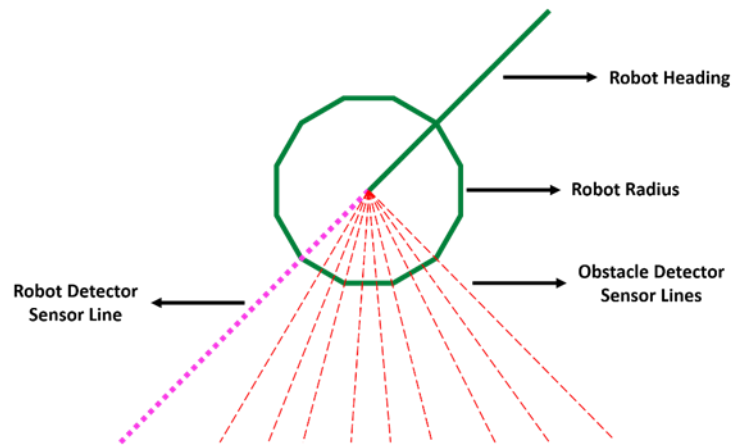
4. Experimental Setup and Problem Definition

In this section, covers systematic experiments and results applied on a predetermined path for the proposed approach. Experiments were conducted using different robot numbers to test the scalability of the proposed approach, and different arena (with/without obstacle) conditions to test their flexible behavior. In the proposed approach, it is examined how the swarm robots influence path tracking due to the change of the value of l_d used in the Pure-Pursuit algorithm. In the systematic experiments, the number of robots, the arena conditions with and without disabilities and the value of l_d are examined for how long the swarm robots have completed the predetermined path. The experiments are carried out with the non-holonomic swarm robot shown in Table 1. Experiments are carried out in MATLAB simulation environment.

Table 1. *Swarm robot features*

<i>Properties</i>	<i>Ranges</i>
Robot Model	Non-Holonomic, 2 Wheels
Robot Detection	[0 8] units, 360 degree
Obstacle Detection	[0 8] units, 360 degree
Robot-robot Communication	[0 8] units
Robot radius	0.4 radian units

Each swarm robots can detect obstacles and robots within the detection range. They can detect the angle and distance information of obstacles and neighboring robots. A swarm robot can exchange data with robots within the detection range. In Figure 5 shows the swarm robot model used in the simulation environment. The swarm robot moves with a two-wheel differential drive system with a circular structure of 0.4 unit radius.

**Figure 5.** *A non-holonomic swarm robot*

4.1. Problem definition

In this section, the path tracking problem of swarm robots is defined. In the with and without obstacles arena, it is aimed to track the paths depending on the change of the number of robots of the swarm robots and the l_d value determined by the Pure-Pursuit algorithm of the swarm robots. It is aimed for the swarm robots to cooperate in an organized way and follow the path by passing the waypoints placed sequentially on the predetermined path. Swarm robots should be able to move without colliding each other and obstacles during path tracking.

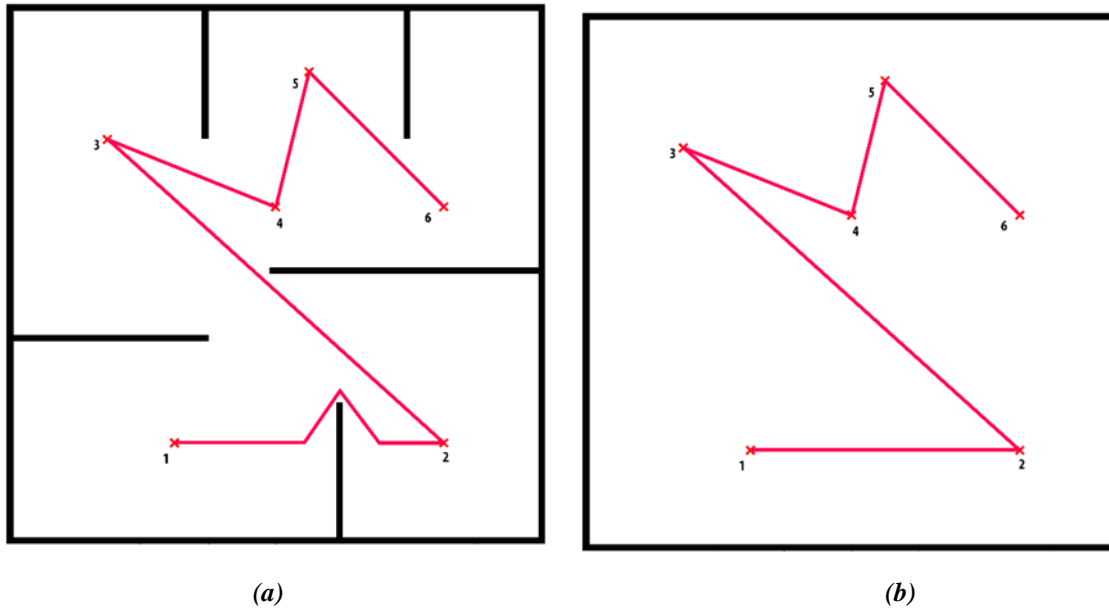


Figure 6. (a)with obstacle and (b)without obstacles arenas for path tracking

The swarm robots are aimed to follow the path consisting of 6 waypoints placed in a row as shown in Figure 6. The path tracking, which consists of 6 waypoints, is also implemented in with and without obstacle arena shown in Figure 6 (a) and (b). The obstacles have been specially selected to examine how the swarm robots behave on the path created with 6 waypoints.

Swarm robots are asked to follow the path determined from the 1st waypoint to the 6th waypoint in with and without obstacle arena given in Figure 6. In with and without obstacle arena, all of the different number of swarm robots should be able to follow the path starting from the 1st waypoint to the 6th waypoint.

5. Results

In the study, the path tracking process consisting of predetermined sequential waypoints of swarm robots in with and without obstacles arenas is examined. Following the waypoints-based predetermined path, experiments are carried out according to the different number of swarm robots and the l_d value determined by the Pure-Pursuit algorithm used. Experiments include different systematic applications for 3, 5 and 7 robots with 0.3, 0.5 and 1 unit l_d values. Experiments were repeated 50 times. The applied systematic experiments are carried out in with and without obstacles arenas given in Figure 6. Arena sizes are selected as 80 x 80 square units. After the swarm robots have passed 6 determined waypoints, the experiments are ended. The time until the experiments are terminated (number of iterations) measures the performance of the experiment. In the results obtained through systematic experiments, the scalability and flexibility of swarm robots are examined in terms of path tracking behavior.

The systematic experiment results applied for the 0.3 unit l_d value determined in the approach proposed in Figure 7 are shown. Repeated experiments for 0.3 unit l_d value is systematically implemented in with and without obstacles arenas with 3, 5 and 7 swarm robots. The data obtained from the applied systematic experiments are expressed with box plots. The lines in the middle of the box plots show the median value of the completed iteration times of the systematic experiments applied. In systematic experiments applied for 0.3 unit l_d value and 3, 5 and 7 robots, the lowest median value was realized with 3 robots in the without obstacles arena as 1360.5 steps and the highest median value was with 7 robots in the with obstacles arena in 2015.5 steps. Considering these values, the experiments carried out in with obstacles arena took longer than those without obstacles. The main reason for this result is that when the swarm robots encounter the obstacle while they follow the path in an organized way, they determine the path both without colliding obstacles and colliding each other. In addition, the distance to the waypoints determined sequentially increases when the robots encounter the obstacle. When the experiments are compared in terms of the number of robots according to the 0.3 unit l_d value, the increase in the number of robots causes an increase in the duration of the experiment.

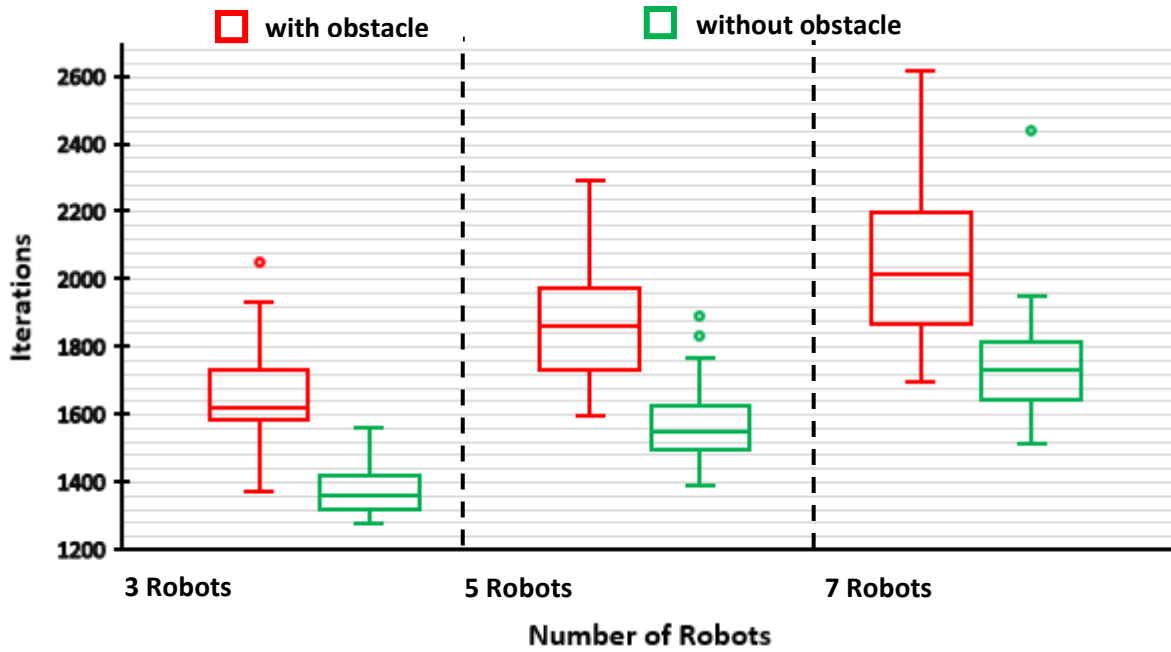


Figure 7. Systematic test results applied for 0.3 unit l_d value

Figure 8 shows the systematic test results applied in with and without obstacles arenas for 0.5 l_d value with 3, 5 and 7 robots. In the systematic experiments applied for 3,5 and 7 robots, the lowest median value was realized with 3 robots in the without obstacle arena as 1340.5 steps, and the highest median value was 1885.5 steps with 7 robots in with obstacles arena. According to the results of experiments applied in with and without obstacles arenas, the experiments applied in the disabled arena take longer than the experimental results applied in the without obstacle arena, similar to the results of the experiment applied with a value of 0.3 unit l_d . Similarly, the increase in the number of robots causes an increase in the duration of the experiment. Experimental results applied for 0.5 unit l_d value is obtained at more (wide) time intervals than 0.3 unit l_d value.

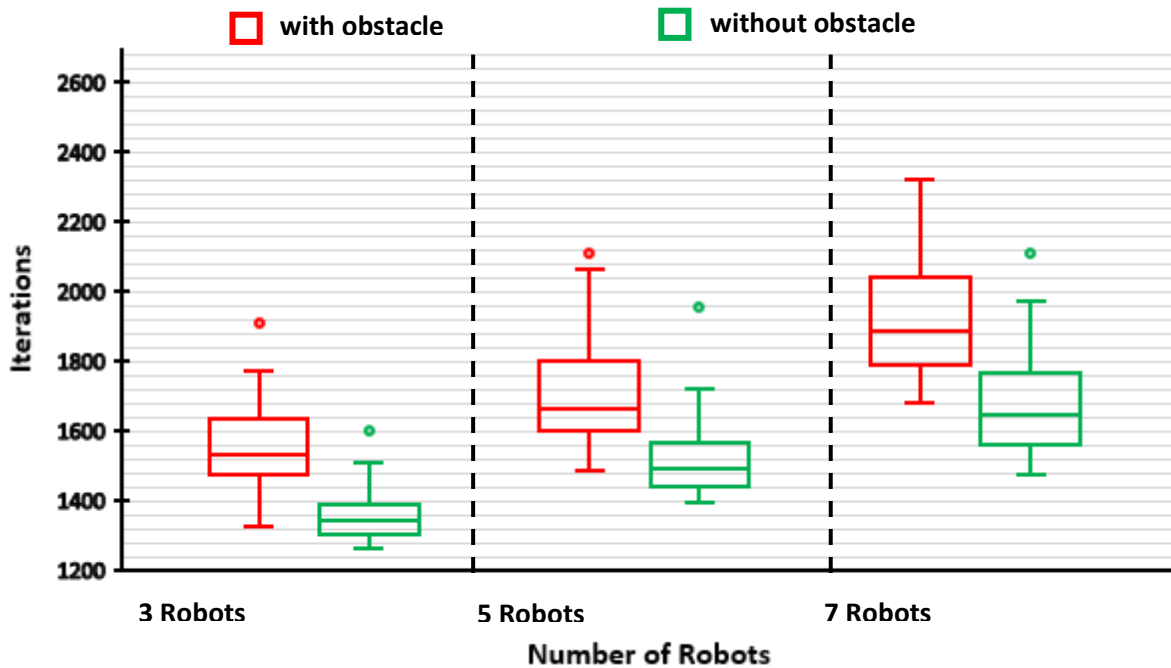


Figure 8. Systematic test results applied for 0.5 unit l_d value

Figure 9 shows the systematic test results applied in with and without obstacle arena for 1 unit l_d value with 3, 5 and 7 robots. In the systematic experiments applied for 3,5 and 7 robots, the lowest median value was realized with 3 robots in the without obstacle arena as 1345.5 steps, and the highest median value was 1749.5 steps with 7 robots in with obstacle arena. Similar to the systematic experiments performed with the choice of 0.3 and 0.5 l_d the with obstacle test results lasted longer than the without obstacle test results. In addition, the increase in the number of robots causes an increase in the duration of the experiment. Unlike 0.3 and 0.5 l_d selection in the systematic experiments applied depending on the 1 unit l_d selection, the time intervals for the completion of the experiment are shorter. Due to the increase in l_d value, the decrease in its oscillation in path following does not cause major changes in the duration of the experiment completion. With the oscillation that occurs during path tracking, the collision status of the robots decreases. With this situation, the time for each robot to follow the path without colliding each other decreases.

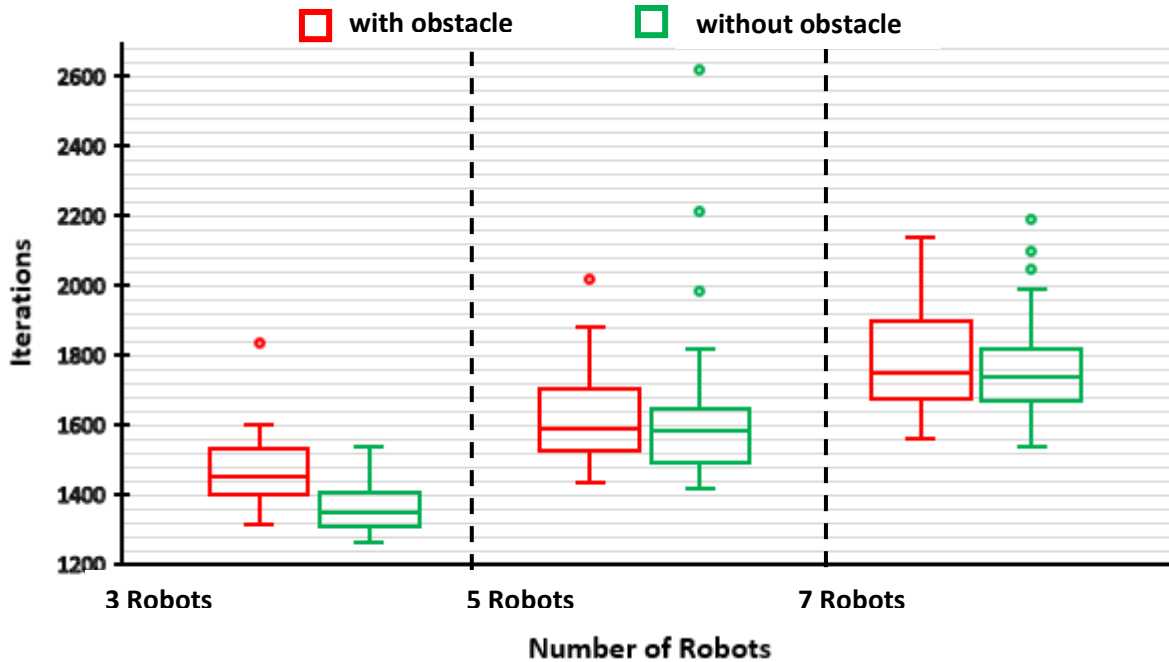
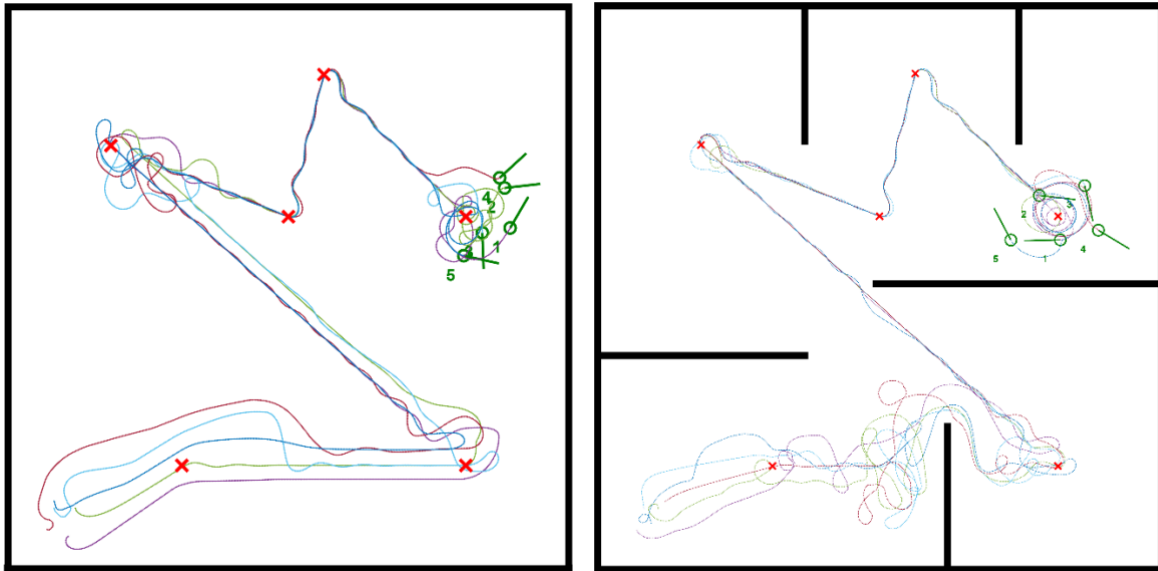


Figure 9. Systematic test results applied for 1 unit l_d value

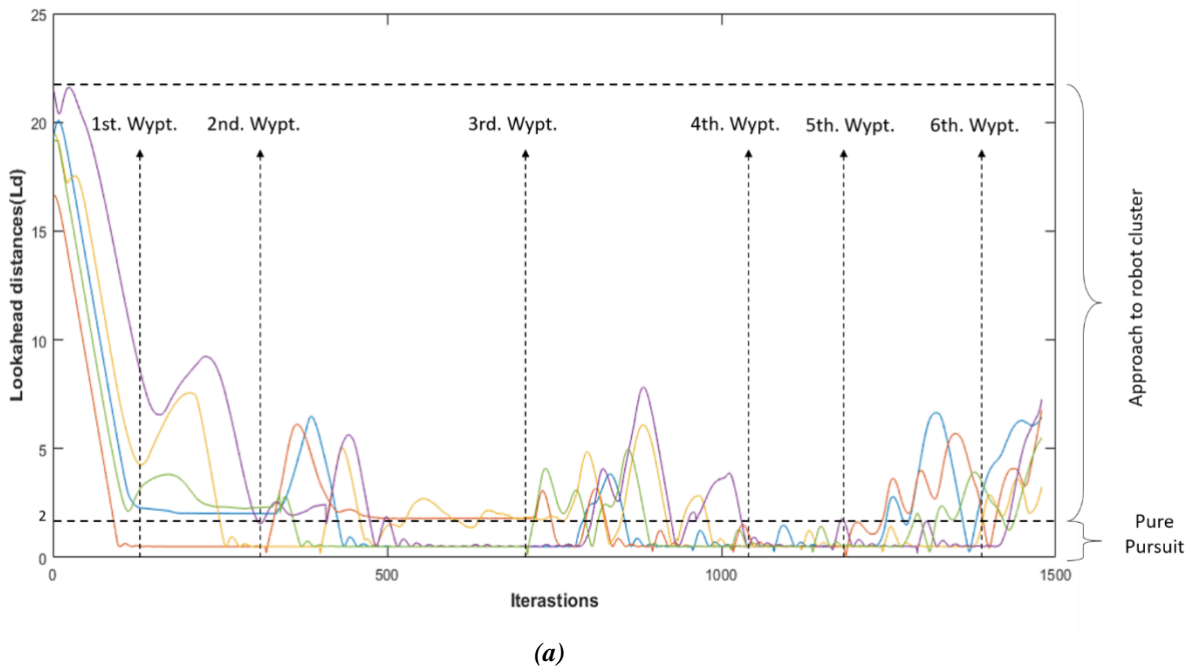
When the applied systematic experiments are evaluated depending on the change of the l_d selection, the time to complete the experiment decreases as the distance l_d increases. When the l_d value increases, collision situations decrease because the swarm robots oscillate less on the desired path.

In Figure 10 (a) and (b), 5 swarm robots, whose l_d value is chosen as 0.5 units, and two of the systematic experiments performed in the with and without obstacle arena are shown. In the with and without obstacle experiments, the path trace of each of the swarm robots along the path they follow is shown in Figure 10 (a) and (b). In the systematic experiments applied, the robots are randomly positioned at the beginning of the experiment at the area bounded by 10x10 unit square of 80x80 unit square arena. This determined location is behind the 1st waypoint. In Figure 10 (a) the experiment applied in the without obstacle arena was completed in 1479 iterations. The experiments applied in the without obstacle arena, the swarm robots follow the path determined from the 1st waypoint to the 6th waypoint sequentially. In this experiment, swarm robots move in an organized way without colliding each other on the path with sharp turns. The experiment applied in with obstacle arena in Figure 10 (b) was completed in 1716 iterations. In this experiment, swarm robots are observed both for sharp path turns and how the robots follow when they encounter an obstacle.



(a) (b)
Figure 10. (a)With and (b)without obstacles arena experiment results for $l_d = 0.5$ unit

In Figure 11 (a) and (b) show the values l_d of each of the swarm robots during with and without obstacle path tracking shown in Figure 10. As shown in Figure 11 (a), it shows the conditions for approaching the swarm and applying the Pure-Pursuit algorithm, as indicated in the proposed approach during path tracing of the swarm robots. As in the proposed approach, if the distance of the swarm robots to the path they will follow is over 2 units, it approaches the robots it detects. If it is under 2 units, Pure-Pursuit algorithm is used.



(a)

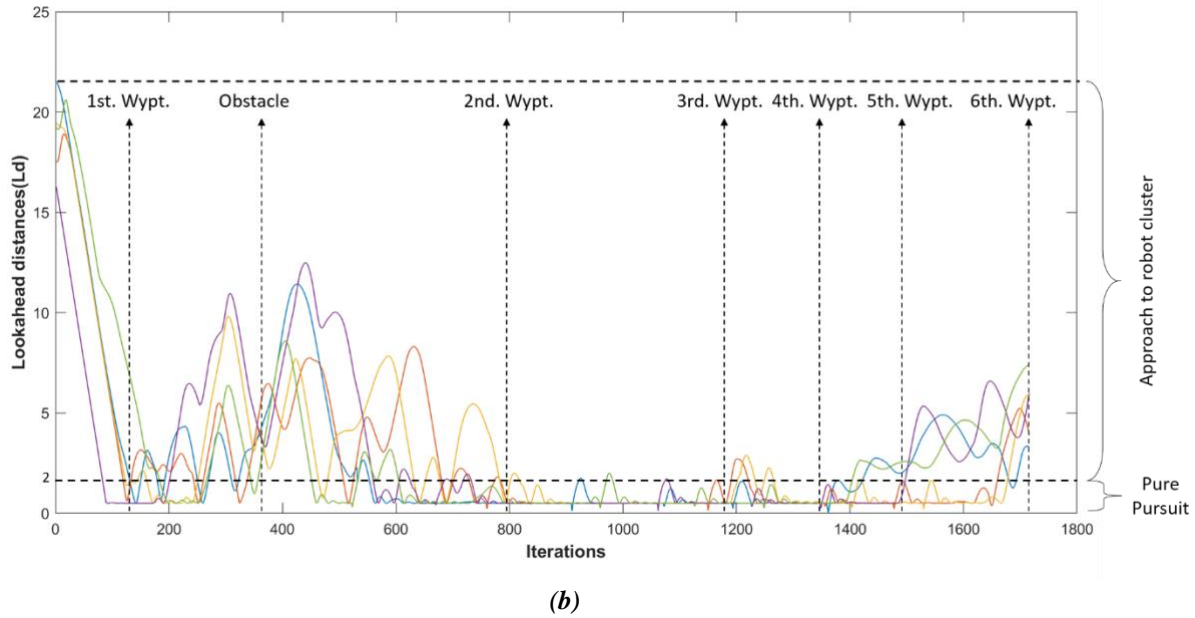


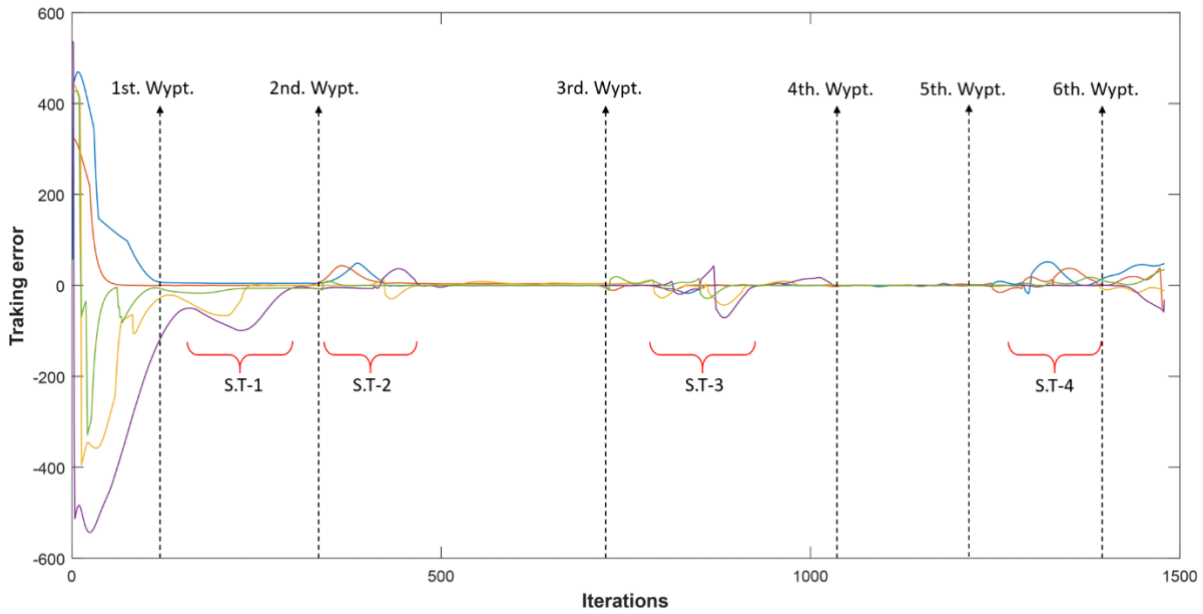
Figure 11. Lookahead distance test results for $l_d = 0.5$ unit in (a)with and (b)without obstacles arenas

In Figure 11 (b), the graph shows the values of l_d from the experiment applied in the arena in Figure 10 (b). In addition, the obstacles that each swarm robot encounters during path tracking and the waypoints they pass through are indicated. When an obstacle or sharp turn encountered by the swarm robots during path tracking, the distance to the determined path increases and this can be seen by looking at the distances l_d . As in the proposed approach, when the l_d value of each of the swarm robots is above 2 units, the robots approach each other in an organized way, and they track the desired path.

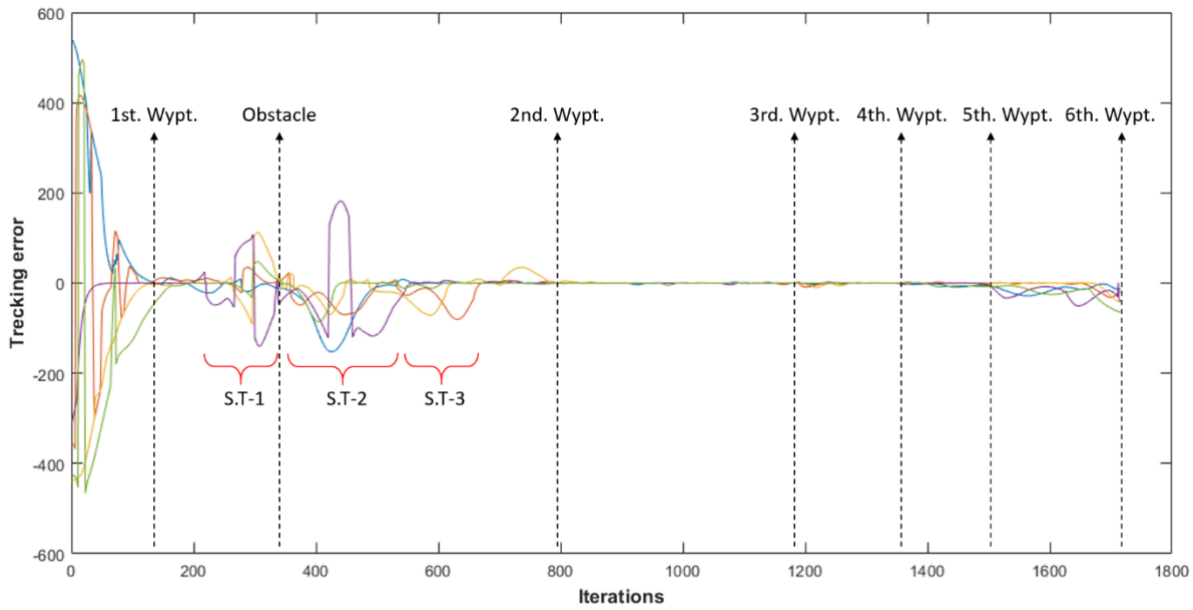
The graphs in Figure 11 show the tracking errors obtained from the experiments performed in with and without obstacle arenas shown in Figure 10. Tracking error, as expressed in equation (9), is the perpendicular distance of the swarm robot to the tracking path.

$$e = \frac{\tan(\delta_{pp}(t)) \cdot l_d^2}{2L} \tag{9}$$

As shown in Figures 11 (a) and (b), a tracking error at the time of an obstacle or sharp turn (S.T) is observed as each swarm robot passes through the specified waypoints. The distance of the swarm robots to the path increases to follow when they encounter an obstacle or (S.T). Each swarm robots that are rotating and avoiding obstacles are moving in an organized way to get closer to the path they will follow. In the proposed approach, in the event that swarm robots encounter obstacles, priority is determined to avoid obstacles rather than following the path.



(a)



(b)

Figure 12. Tracking errors test results for $l_d = 0.5$ unit in (a)with and (b)without obstacles arenas

6. Conclusion

In this paper, a waypoint-based path tracking approach is recommended for self-organized swarm robots. Each swarm robots act according to the behavior of neighboring robots, which they perceive individually during path tracking. To evaluate the proposed path tracking approach in terms of scalability and flexibility, systematic experiments have been carried out in with and without obstacle arena with different numbers of robots and depending on different lookahead distances. With the proposed approach, each swarm robots exhibit swarm behavior in an organized manner depending on the distance of the lookahead to the path to follow in the with / without obstacle arenas.

According to the proposed approach, robots are not supposed to collide each other and obstacles. This condition affects the time to complete path tracking. In the results obtained from the systematic experiments, it was observed that the path following completion time increases as the number of robots increases.

As observed from the systematic experiments applied in the with obstacle arenas, the completion time of the experiment is extended as the robots escape from the obstacle on the path. According to the results obtained from the systematic experiments, the path following completion time of the swarm robots in with obstacle arena is more than the in without obstacle arena.

Increasing the l_d value also increases the distance to the path that the swarm robot will follow. In this way, the colliding situations of the swarm robots are also reduced. Thus, each swarm robots complete the specified path more quickly. According to the results of the experiment, as l_d value increases, the time for the swarm robots to complete the path tracking decreases.

Using the proposed approach, the results from systematic experiments showed that swarm robots can track path in a flexible and scalable way. Swarm robots also decide under which conditions to apply the Pure-Pursuit algorithm, depending on the neighboring robots they detect, and the individual l_d values.

In future studies, it is aimed to design a path tracking controller according to the dynamic lookahead distance according to the neighboring robots detected by the swarm robots and the surrounding obstacle and collision conditions for path tracking.

7. References

- Bacha, S., Saadi, R., Ayad, M. Y., Aboubou, A., & Bahri, M. (2017). A review on vehicle modeling and control technics used for autonomous vehicle path following. *International Conference on Green Energy and Conversion Systems, GECS 2017*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/GECS.2017.8066221>
- Bayindir, L. (2016). A review of swarm robotics tasks. *Neurocomputing*, 172, 292–321. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.05.116>
- Bayindir, L., & Şahin, E. (2007). A review of studies in swarm robotics. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 15(2), 115–147. <http://dergipark.gov.tr/tbtkelektrik/issue/12085/144468>
- Bibuli, M., Bruzzone, G., Caccia, M., Gasparri, A., Priolo, A., & Zereik, E. (2014). Swarm-based path-following for cooperative unmanned surface vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 228(2), 192–207. <https://doi.org/10.1177/1475090213516108>
- Borenstein, J., & Koren, Y. (1989). Real-Time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 19(5), 1179–1187. <https://doi.org/10.1109/21.44033>
- Borenstein, J., & Koren, Y. (1991). The Vector Field Histogram—Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(3), 278–288. <https://doi.org/10.1109/70.88137>
- Bucciari, D., Perritaz, D., Mullhaupt, P., Jiang, Z. P., & Bonvin, D. (2009). Velocity-scheduling control for a unicycle mobile robot: Theory and experiments. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(2), 451–458. <https://doi.org/10.1109/TRO.2009.2014494>
- Campion, G., Bastin, G., & D'Andréa-Novel, B. (1996). Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(1), 47–62. <https://doi.org/10.1109/70.481750>
- Chandrasekhar Rao, D., Kabat, M. R., Das, P. K., & Jena, P. K. (2018). Cooperative Navigation Planning of Multiple Mobile Robots Using Improved Krill Herd. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(12), 7869–7891. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3216-0>
- Chen, Q., Wang, X., & Yang, J. (2018). Optimal Path-Following Guidance with Generalized Weighting Functions Based on Indirect Gauss Pseudospectral Method. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3104397>
- Cibooglu, M., Karapinar, U., & Soylemez, M. T. (2017). Hybrid controller approach for an autonomous ground vehicle path tracking problem. *2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2017*, 583–588. <https://doi.org/10.1109/MED.2017.7984180>
- Craig Coulter, R. (1990). *Implementation of Pure Pursuit Path Tracking Algorithm*. Camegie Mellon University.
- De Ryck, M., Versteyhe, M., & Debrouwere, F. (2020). Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques. *Journal of Manufacturing Systems*, 54(December 2019), 152–173. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.12.002>
- Gong, Z., Xie, F., Liu, X. J., & Shentu, S. (2020). Obstacle-crossing Strategy and Formation Parameters Optimization of a Multi-tracked-mobile-robot System with a Parallel Manipulator. *Mechanism and Machine Theory*, 152, 103919. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103919>

- Heinrich, M. K., Soorati, M. D., Kaiser, T. K., Wahby, M., & Hamann, H. (2019). Swarm robotics: Robustness, scalability, and self-X features in industrial applications. *IT - Information Technology*, 61(4), 159–167. <https://doi.org/10.1515/itit-2019-0003>
- Heo, S. N., Lu, S. Y., Shin, J. S., & Lee, H. H. (2018, November 27). Multi-Robot-Multi-Target Path Planning and Position Estimation for Disaster area. *2018 International Conference on Information and Communication Technology Robotics, ICT-ROBOT 2018*. <https://doi.org/10.1109/ICT-ROBOT.2018.8549910>
- Hoffmann, G. M., Tomlin, C. J., Montemerlo, M., & Thrun, S. (2007). Autonomous automobile trajectory tracking for off-road driving: Controller design, experimental validation and racing. *Proceedings of the American Control Conference*, 2296–2301. <https://doi.org/10.1109/ACC.2007.4282788>
- Horvath, E., Hajdu, C., & Koros, P. (2019). Novel Pure-Pursuit Trajectory Following Approaches and their Practical Applications. *10th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications, CogInfoCom 2019 - Proceedings*, 597–602. <https://doi.org/10.1109/CogInfoCom47531.2019.9089927>
- Kim, D. H., Kim, C. J., & Han, C. S. (2010). Geometric path tracking and obstacle avoidance methods for an autonomous navigation of nonholonomic mobile robot. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 16(8), 771–779. <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2010.16.8.771>
- Kim, J., & Kim, B. K. (2020). Cornering Trajectory Planning Avoiding Slip for Differential-Wheeled Mobile Robots. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(8), 6698–6708. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2941156>
- Lal, D. S., Vivek, A., & Selvaraj, G. (2018). Lateral control of an autonomous vehicle based on Pure Pursuit algorithm. *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Technological Advancements in Power and Energy: Exploring Energy Solutions for an Intelligent Power Grid, TAP Energy 2017*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/TAPENERGY.2017.8397361>
- Lee, K., Jeon, S., Kim, H., & Kum, D. (2019). Optimal Path Tracking Control of Autonomous Vehicle: Adaptive Full-State Linear Quadratic Gaussian (LQG) Control. *IEEE Access*, 7, 109120–109133. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2933895>
- Mısır, O., Gökrem, L., & Serhat Can, M. (2020). Fuzzy-based self organizing aggregation method for swarm robots. *BioSystems*, 196, 104187. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2020.104187>
- Morales, J., Martínez, J. L., Martínez, M. A., & Mandow, A. (2009). Pure-pursuit reactive path tracking for nonholonomic mobile robots with a 2D laser scanner. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2009. <https://doi.org/10.1155/2009/935237>
- Morgansen, K. A., Triplett, B. I., & Klein, D. J. (2007). Geometric methods for modeling and control of free-swimming fin-actuated underwater vehicles. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(6), 1184–1199. <https://doi.org/10.1109/LED.2007.911625>
- Ohta, H., Akai, N., Takeuchi, E., Kato, S., & Edahiro, M. (2016). Pure pursuit revisited: Field testing of autonomous vehicles in urban areas. *Proceedings - 4th IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications, CPSNA 2016*, 7–12. <https://doi.org/10.1109/CPSNA.2016.10>
- Oliveira, T., Encarnacao, P., & Aguiar, A. P. (2013). Moving path following for autonomous robotic vehicles. *2013 European Control Conference, ECC 2013*, 3320–3325. <https://doi.org/10.23919/ecc.2013.6669459>
- Oriolo, G., De Luca, A., & Vendittelli, M. (2002). WMR control via dynamic feedback linearization: Design, implementation, and experimental validation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 10(6), 835–852. <https://doi.org/10.1109/TCST.2002.804116>
- Park, H. G., Ahn, K. K., Park, M. K., & Lee, S. H. (2018). Study on Robust Lateral Controller for Differential GPS-Based Autonomous Vehicles. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 19(3), 367–376. <https://doi.org/10.1007/s12541-018-0044-9>
- Park, M., Lee, S., & Han, W. (2015). Development of steering control system for autonomous vehicle using geometry-based path tracking algorithm. *ETRI Journal*, 37(3), 617–625. <https://doi.org/10.4218/etrij.15.0114.0123>
- Patle, B. K., Babu L, G., Pandey, A., Parhi, D. R. K., & Jagadeesh, A. (2019). A review: On path planning strategies for navigation of mobile robot. In *Defence Technology* (Vol. 15, Issue 4, pp. 582–606). China Ordnance Society. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.04.011>
- Qu, P., Xue, J., Ma, L., & Ma, C. (2015). A constrained VFH algorithm for motion planning of autonomous vehicles. *IEEE*

Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings, 2015-Augus(Iv), 700–705. <https://doi.org/10.1109/IVS.2015.7225766>

Saeed, R. A., Recupero, D. R., & Remagnino, P. (2020). A Boundary Node Method for path planning of mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 123, 103320. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.103320>

Shan, Y., Yang, W., Chen, C., Zhou, J., Zheng, L., & Li, B. (2015). CF-Pursuit: A Pursuit Method with a Clothoid Fitting and a Fuzzy Controller for Autonomous Vehicles. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 12(9). <https://doi.org/10.5772/61391>

Snider, J. M. (2009). Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking. In *Work* (Issue February). http://www.ri.cmu.edu/pub_files/2009/2/Automatic_Steering_Methods_for_Autonomous_Automobile_Path_Tracking.pdf

Soysal, O., Bahçeci, E., & Şahin, E. (2007). Aggregation in Swarm Robotic Systems : Evolution and Probablistic Control. *TURKISH JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING & COMPUTER SCIENCES*, 15(2), 199–225. <http://dergipark.gov.tr/download/article-file/125895>

Survey, A. (2005). *Local Navigation for Unmanned Ground*. December.

Thrun, S., Montemerlo, M., Dahlkamp, H., Stavens, D., Aron, A., Diebel, J., Fong, P., Gale, J., Halpenny, M., Hoffmann, G., Lau, K., Oakley, C., Palatucci, M., Pratt, V., Stang, P., Strohband, S., Dupont, C., Jendrossek, L. E., Koelen, C., ... Mahoney, P. (2006). Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge. *Journal of Field Robotics*, 23(9), 661–692. <https://doi.org/10.1002/rob.20147>

Wang, H., Liu, B., Ping, X., & An, Q. (2019). Path Tracking Control for Autonomous Vehicles Based on an Improved MPC. *IEEE Access*, 7, 161064–161073. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2944894>

Yaguchi, Y., & Tamagawa, K. (2020). A waypoint navigation method with collision avoidance using an artificial potential method on random priority. *Artificial Life and Robotics*, 25(2), 278–285. <https://doi.org/10.1007/s10015-020-00583-w>

Yeu, T. K., Park, S. J., Hong, S., Kim, H. W., & Choi, J. S. (2006). Path tracking using vector pursuit algorithm for tracked vehicles driving on the soft cohesive soil. *2006 SICE-ICASE International Joint Conference*, 2781–2786. <https://doi.org/10.1109/SICE.2006.314707>

Yu, L., Yan, X., Kuang, Z., Chen, B., & Zhao, Y. (2020). Driverless bus path tracking based on fuzzy pure pursuit control with a front axle reference. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/app10010230>

Zhang, W., Gai, J., Zhang, Z., Tang, L., Liao, Q., & Ding, Y. (2019). Double-DQN based path smoothing and tracking control method for robotic vehicle navigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166, 104985. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104985>

Zhao, H., Liu, H., Leung, Y. W., & Chu, X. (2018). Self-Adaptive Collective Motion of Swarm Robots. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 15(4), 1533–1545. <https://doi.org/10.1109/TASE.2018.2840828>

Zhou, H., Guvenc, L., & Liu, Z. (2017). Design and evaluation of path following controller based on MPC for autonomous vehicle. *Chinese Control Conference, CCC*, 9934–9939. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2017.8028942>



Al 6061/B₄C/GNP Hibrit Kompozitin İşlenmesinde Takım Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

Investigation of Tool Wear Behaviors in The Machining of Al 6061/B₄C/GNP Hybrid Composite

Selçuk Yağmur¹ , Muharrem Pul^{2*} 

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Müh. Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

²Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 71450 Kırıkkale

Başyuru/Received: 31/03/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Bu çalışmada Al 6061 alaşımı içerisinde farklı oranlarda bor karbür (B₄C) ve grafen nanoplaka (GNP) takviye edilen hibrit kompozit malzemenin tornada işleme deneyleri yapılarak kullanılan kesici takımların aşınma davranışları incelenmiştir. B₄C ve GNP katkısının takım aşınması üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmanın ilk aşamasında vortex yöntemiyle farklı B₄C ve GNP takviye oranlarında hibrit kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen kompozit numuneler üzerinde kuru işleme koşullarında, sabit kesme derinliğinde, üç farklı kesme hızı ve ilerleme değeri kullanılarak CNC tornada işleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. İşleme deneylerinde kullanılan kesici takımların dijital mikroskop görüntüleri çekilerek aşınma davranışları değerlendirilmiştir. Hibrit kompozit yapı içerisindeki B₄C takviye oranının artışına bağlı olarak, tüm kesme parametrelerinde takım aşınmalarında önemli miktarlarda artışlar olduğu görülmüştür. Kompozit yapı içerisindeki GNP katkısının işlenebilirliği bir miktar kolaylaştırdığı, grafinin katı yağlayıcı özellik sergilediği ve takım aşınmalarını azaltıcı etki gösterdiği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Al 6061 alaşımı, B₄C, GNP, Kompozit, İşlenebilirlik, Takım aşınması”

Abstract

In this study, the wear behavior of the used cutting tools was investigated by performing lathe machining experiments of the hybrid composite material reinforced with bor carbide (B₄C) and graphene nanoplate (GNP) in different proportions into the Al 6061 alloy. It was aimed to determine the effect of B₄C and GNP additives on tool wear. In the first stage of the experimental study, hybrid composite materials with different B₄C and GNP reinforcement ratios were produced by the vortex method. Machining experiments were carried out on the produced composite specimens in dry machining conditions, at constant cutting depth, using three different cutting speeds and feed rates. The wear behavior of the cutting tools used in machining experiments was evaluated by taking digital microscope images. Due to the increase in the B₄C reinforcement ratio in the hybrid composite structure, significant increases in tool wear were observed in all cutting parameters. It has been understood that the GNP additive in the composite structure facilitates the machinability somewhat, graphene exhibits solid lubricant properties and reduces tool wear

Key Words

“Al 6061 alloy, B₄C, GNP, Composite, Machinability, Tool wear”

1.Giriş

Günümüzde geleneksel mühendislik malzemelerine alternatif olarak geliştirilen farklı özellikteki kompozit malzemelerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bunlardan biriside metal esaslı ve seramik parçacık takviyeli kompozit malzemelerdir. Metal matrisli kompozitlerde (MMK) en çok tercih edilen matris malzemelerinin başında alüminyum ve magnezyum gibi hafif metaller gelmektedir. 1930'lardan beri, alüminyum alaşımları uçak parçalarının üretimi için tercih edilen malzeme olmuştur. Daha iyi şekillendirilebilirlik, kaynak edilebilirlik, korozyona ve aşınmaya karşı direnç ve düşük maliyet ile birlikte bu alaşım serisinin sunduğu dikkate değer mukavemet/ağırlık oranı, onu hafif araçların üretimi için potansiyel bir malzeme haline getirmektedir. AA 6061 popüler alaşımlardan biridir ve uygun ısı ile kompozit mukavemetini değiştirme olasılığı nedeniyle matris malzemesi olarak kullanılmaktadır (Kareem vd, 2021). Bu metaller içerisine takviye edilen güçlendirici elemanlar ise Al_2O_3 , SiC, B_4C , TiC, MgO, TiB_2 vb. seramik esaslı metal oksitler ve karbürlerdir. Bu tür takviye elemanlarının katıldığı alüminyum matrisli kompozitler en yaygın MMK çeşidini oluşturmaktadır. Son zamanlarda MMK kompozitlerin içerisine ikinci bir takviye elemanı da ilave edilerek hibrit kompozitler üretilmeye başlanmıştır. Nano grafen plaka (GNP) bu ikinci takviye elemanlarından birisidir. Karbon esaslı nano malzemelerin takviye edildiği hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin araştırıldığı çalışmalar literatürde yer almaktadır (Khan vd, 2021; Ammisetty vd, 2021; Patil vd, 2022; Ergül vd, 2020). Farklı yöntemler ile üretilen bu tür MMK malzemelerin nihai kullanım yerlerine göre işlenerek şekillendirilmesi gerekmektedir. Ancak kompozit yapı içerisindeki çok sert fazda olan seramik esaslı takviye elemanları sebebiyle talaşlı imalatlarında birtakım zorluklar yaşanmaktadır. İşlenebilirlik terimi, kesme kuvvetleri, takım aşınması, talaş oluşumu ve yüzey kalitesi gibi faktörlerle tanımlanır. Bu faktörlerin oluşumuna; malzemenin özellikleri, kesici takımın tipi, kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve kesme sıvısının kullanılıp kullanılmadığı gibi parametreler etki eder. Talaşlı imalatta genellikle minimum takım aşınma oranı, düşük enerji tüketimi ve iyi yüzey kalitesi beklenir. Takım ömrünü ve talaş kaldırma oranını artırmak için optimum kesme parametreleri ve kesme koşullarının sağlanması gerekir (Anthony ve Ajith Kumar, 2017). Özellikle kesici takım maliyetleri toplam işleme maliyeti içerisinde önemli bir yer tutar. Artan enerji maliyetleri ve imal edilen parçaların ekonomikliği açısından MMK malzemelerin işlenebilirliği ve kesici takım aşınma davranışlarının incelenmesi konusundaki araştırmalar giderek artmaktadır. Yapılan çalışmalarda kesici takımlar üzerinde genel olarak, yanak aşınması ve yığıntı talaş (BUE) oluşumundan söz edilmektedir (Gökkaya ve Nalbant, 2007). Literatürdeki benzer bir çalışmada Al/SiC-MMC'nin yüksek hızda ve düşük kesme derinliğinde işlenmesi sırasında BUE oluşmadığı ifade edilmiştir. Ancak düşük kesme hızında kesici takımlarda yanak aşınması ve BUE oluştuğu belirtilmiştir (Mannaa ve Bhattacharayya, 2003). Talaşlı imalatlar sırasında oluşan takım aşınmalarının en önemli nedeni olarak kompozit yapı içerisindeki takviye elemanlarının çok sert fazda olmasına dikkat çekilmektedir. Konuyla ilgili literatür incelendiğinde, talaşlı işlemlerde farklı aşınma mekanizmalarının etkili olduğu, kesme hızının artmasına bağlı olarak takım aşınmasının da arttığı ve kesici takım ucunda BUE oluştuğundan bahsedilmektedir (Verma vd, 2019; Davima vd, 2007; Kannan ve Kishawy, 2008; Özçalbaş 2003; Kılıçkap, 2005; Pedersen ve Ramulu, 2006). Yapılan bir çalışmada karıştırmalı döküm yöntemiyle AA7075/B4C ve AA7075/B4C/RHA hibrit kompozitler üreterek tornada işleme deneyleri yapmıştır. Deneyler sonucunda takım aşınmasında kesme hızının en etkili parametre olduğu ifade edilmiştir (Verma vd, 2019). Yapılan çalışmalarda genel olarak kesme hızı ve ilerlemenin artmasına bağlı olarak takım aşınma miktarlarının da arttığı ifade edilmektedir (Kannan ve Kishawy, 2006; Zhang, 2000; Najem, 2013).

Bu deneysel çalışmada ilk aşamada, Al 6061 matrisli ve farklı oranlarda B4C+GNP takviyeli kompozit malzemeler karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilmiştir. Daha sonra CNC tornada işlenebilirlik deneyleri yapılarak kullanılan kesici takımlardan çekilen dijital mikroskop görüntüleri üzerinden aşınma davranışları incelenmiştir.

2.Malzeme ve Yöntem

Bu deneysel çalışmada hibrit kompozit malzemelerin üretiminde matris malzemesi olarak kullanılan Al 6061 alaşımı ile takviye elemanları bor karbür (B4C) ve grafen nano plaka (GNP)'nin bazı teknik özellikleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Deney malzemelerinin teknik özellikleri

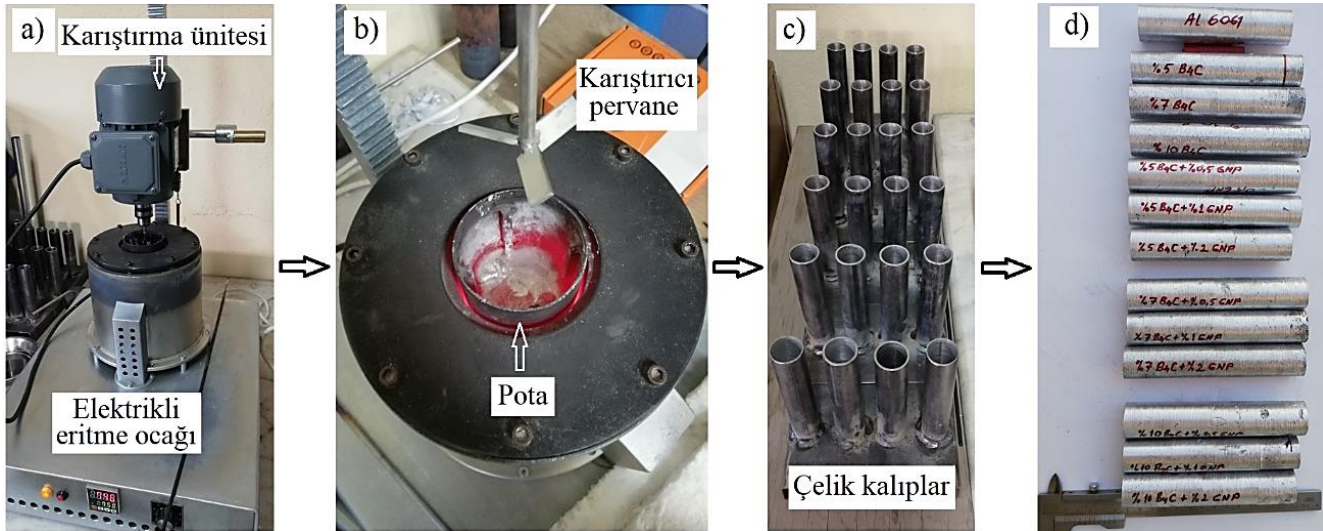
Al 6061								
%Fe	%Si	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%Ti	%Cr	%Al
0,70	0,40-0,80	0,60-1,10	0,15	0,80-1,20	0,25	0,15	0,04-0,35	Kalan
Yoğunluk			Sertlik		Erime Noktası		Çekme Dayanımı	
2,52 g/cm ³			2650 Knoop		2760°		-44 µm	
B4C								
%B						%C		
78,28						21,72		
Yoğunluk			Sertlik		Erime Noktası		Tane Boyutu	
2,52 g/cm ³			2650 Knoop		2760°		-44 µm	
GNP								
Yoğunluk			Tane Boyutu		Erime Noktası		Çekme Dayanımı	
1,19 g/cm ³			6-16 nm		3600°		130 000 MPa	

Deney tasarımında kullanılan matris malzemesi Al 6061 ile takviye elemanları B4C ve GNP'nin karışım oranları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Hibrit kompozit karışım oranları

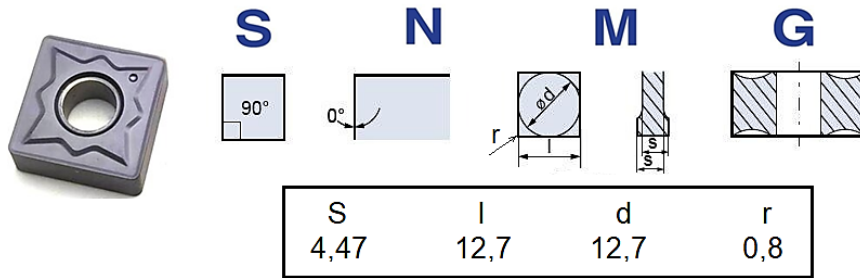
Malzeme	Hibrit kompozit numunelerin matris ve takviye oranları % wt												
	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13
%Al 6061	100	95	93	90	94,5	94	93	92,5	92	91	89,5	89	88
%B4C	-	5	7	10	5	5	5	7	7	7	10	10	10
%GNP	-	-	-	-	0,5	1	2	0,5	1	2	0,5	1	2

Hibrit kompozit malzemelerin üretiminde vorteks (karıştırmalı döküm) yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla ilk olarak külçe halindeki matris malzemesi Al 6061 alaşımı eritme ocağı içerisinde 750°C'ye kadar eritme işlemine tabi tutulmuştur. Bu sırada 300°C ön ısıtma işlemi yapılan B4C ve GNP takviye elemanları ocak potasındaki sıvı Al 6061 içerisine ilave edilerek 900 rpm hızda 5 dakika süre ile karıştırma işlemi yapılmıştır. Son olarak 30 mm çapında ve 150 mm boyundaki çelik kalıplar içerisinde dökülerek soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan hibrit kompozitler kalıplar içerisinde çıkarılarak işlenebilirlik deneyleri için kaba tornalama işlemleri yapılmıştır. Şekil 1'de üretimi tamamlanmış olan hibrit kompozit malzemeler ile hibrit kompozitlerin vorteks yöntemiyle üretimleri sırasında çekilen fotoğraflar verilmektedir.



Şekil 1. Vorteks döküm ünitesi a), Karıştırıcı pervane ve döküm potası b), Kompozitlerin döküldüğü çelik kalıplar c), Kalıplardan çıkarılarak ön tornalama işlemi yapılan kompozit numuneler d)

Üretimi tamamlanan hibrit kompozit malzemelerin tornada işlenebilirlik deneyleri başlatılmıştır. İşleme deneyleri Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda bulunan JOHNFORD TC 35 marka, Bilgisayar Sayısal Denetimli (CNC) torna tezgahı'nda yapılmıştır. İşleme deneylerinde Lamina marka SNMG 12 04 08 NN LT 10 kodlu kesici takımlar kullanılmıştır. Kesici takım geometrik özellikleri Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 2. Tornalama deneylerinde kullanılan SNMG 12 04 08 NN LT 10 kodlu kesici takım

Bu deneysel çalışmadaki tornalama deneylerinde 3 farklı kesme hızı, 3 farklı ilerleme değeri ve sabit kesme derinliği kullanılmış olup tüm işleme deneyleri kuru kesme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Her numune için yapılan işleme deneylerinde kullanılan kesme parametreleri ve deney sayısı Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. İşleme parametreleri

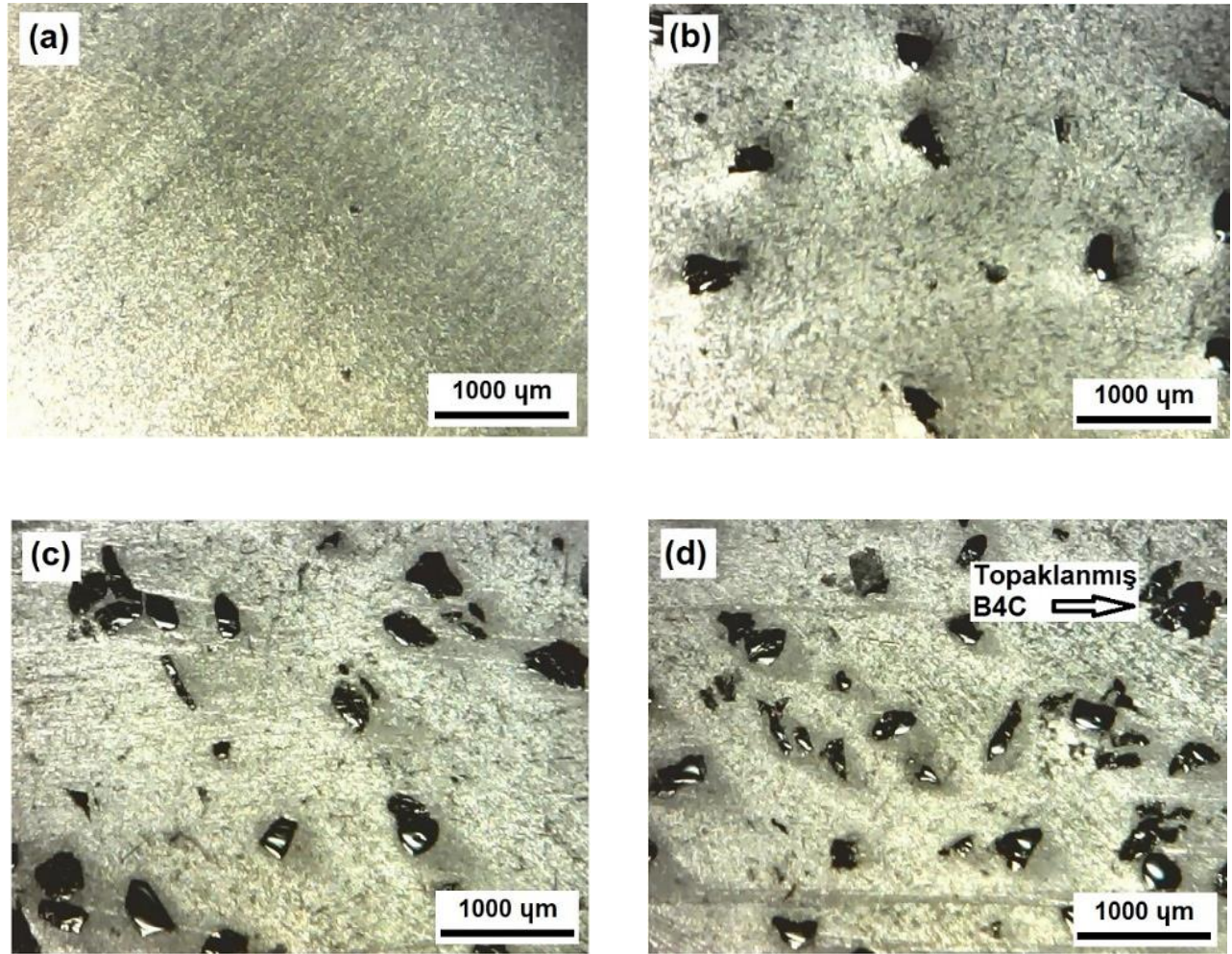
	İşleme (mm/dev)			Kesme derinliği
	0,08	0,12	0,16	
Kesme Hızı (80 m/dak)	0,08	0,12	0,16	1 mm
Kesme Hızı (120 m/dak)	0,08	0,12	0,16	
Kesme Hızı (160 m/dak)	0,08	0,12	0,16	

Tablo 3'te görüldüğü gibi her numune için 9 deney, 13 farklı malzeme için toplamda 117 işleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Her işleme deneyi yeni ve hiç kullanılmamış kesici uç ile yapılmıştır. İşleme deneylerinde kullanılan kesici uçların dijital mikroskop ile görüntüleri çekilerek aşınma davranışları incelenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Mikroyapıların Değerlendirilmesi

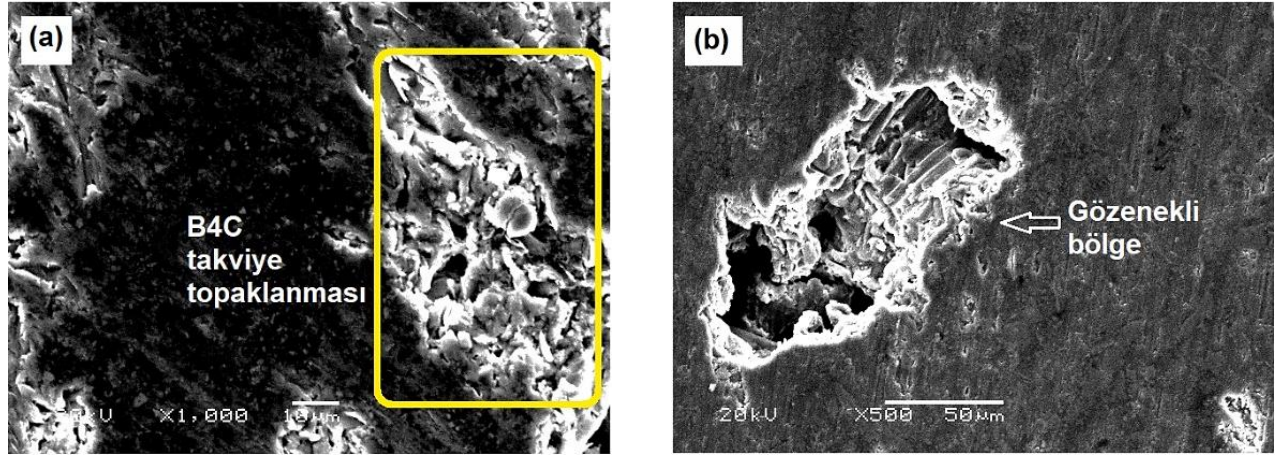
Vorteks yöntemiyle üretilen kompozitlerin mikroyapılarını incelemek üzere dijital mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleri çekilmiştir. Şekil 3'te dijital mikroskop, Şekil 4'te ise SEM görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 3. (a) Al 6061 matris malzemesi, (b) %5 B4C takviyeli Al 6061 matrisli kompozit, (c) %7 B4C takviyeli Al 6061 matrisli kompozit, (d) %10 B4C takviyeli Al 6061 matrisli kompozit

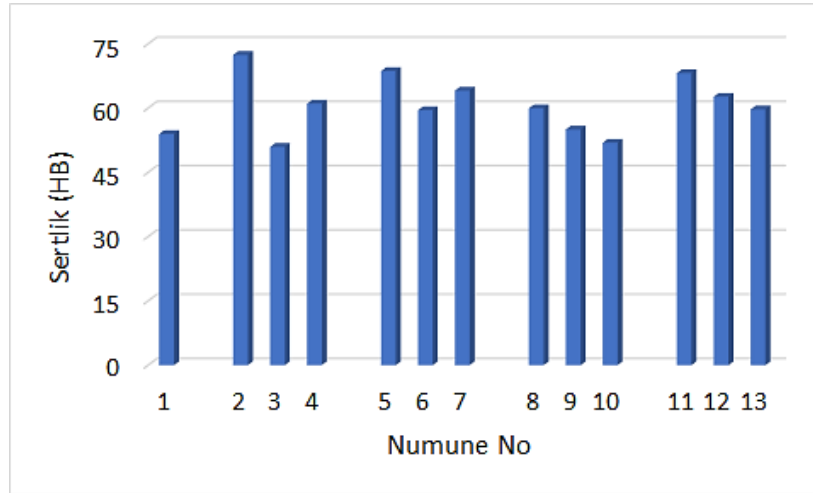
Şekil 3'te yer alan dijital mikroskop görüntülerine bakıldığında kompozit yapı içerisindeki takviye elemanı B4C parçacıklarının dağılımı görülmektedir. B4C takviye oranının artmasıyla parçacık dağılımındaki homojenlik bir miktar daha iyileşmekte olduğu anlaşılmaktadır. Ancak Al 6061 matris malzemesi içerisindeki B4C parçacıklarının miktarındaki artışla birlikte yer yer takviye topraklanmalarının meydana geldiği anlaşılmaktadır. B4C takviye topraklanmasının bu tür parçacık takviyeli metalik kompozitlerde çok sık rastlanan bir malzeme davranışı olduğu bilinmekte ve literatürde yer almaktadır (Tabandeh-Khorshid vd, 2016; Na, 2019). Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan vorteks yöntemi kolay uygulanması ve maliyetinin daha az olması gibi avantajlarının yanında, düşük homojenite ve düzensiz takviye dağılımı gibi bazı dezavantajları da olmaktadır. Özellikle karıştırma sırasında ve potadan kalıplara dökülmesi aşamalarında sıvı matris içerisindeki takviye parçacıklarının belli bir yöne doğru hareket etmesi veya

toplanması mümkün olabilmektedir. Bu olumsuz durum aynı zamanda kompozit yapı içerisinde gözenekli bölgelerin oluşmasına da neden olarak malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Takviye toplanması ve/veya beraberinde oluşan gözeneklilik aynı zamanda işlenebilirlik yönündende istenmeyen bir durumdur. Talaşlı işlem sırasında sıradışı kesme davranışları görülmekte ve istikrarlı sonuçların elde edilmesi zorlaşmaktadır. Şekil 4'teki SEM görüntülerinde kompozit yapı içerisindeki B4C takviye toplanması ve gözenekli bölgeler gösterilmiştir.



Şekil 4. (a) Topaklanmış B4C takviye elemanı SEM görüntüsü, (b) Gözenekli bölge SEM görüntüsü

Bu tür metal matrisli kompozit yapıların mekanik davranışlarının en önemlilerinin başında sertlik değeri olduğu bilinmektedir. Talaşlı imalatta malzemenin işlenebilirliğini etkileyen önemli faktörlerden biriside malzemenin sertliğidir. Üretilen kompozit malzemelerin sertlik değerlerinin belirlenmesi amacıyla Brinell yöntemi kullanılarak sertlik ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen değerlere göre Şekil 5'teki grafik oluşturulmuştur.

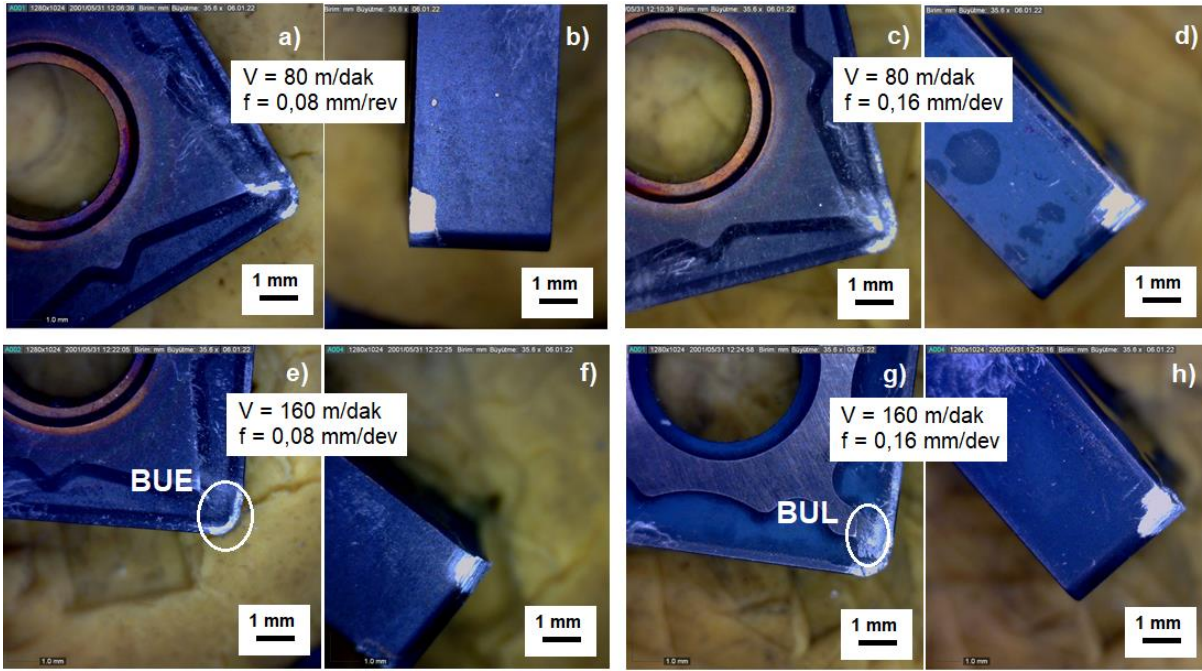


Şekil 5. Deney numuneleri sertlik değerleri

Şekil 5'teki grafik incelendiğinde en yüksek sertlik değerlerinin %5 B4C takviyeli kompozit numunelerden elde edildiği anlaşılmaktadır. Her ne kadar sert fazdaki B4C oranı yükselmiş olsada, kompozit yapının sertlik değerinde aynı oranda yükselme olmadığı görülmektedir. Yapı içerisindeki B4C parçacıklarının artmasıyla birlikte toplanmaya bağlı olarak gözeneklilik artmakta, böylece bir bütün olarak bakıldığında kompozit yapının sertlik değeri düşmektedir. Ancak 1 numaralı saf Al 6061 numuneye göre sertlik değerlerinin genel olarak arttığı ifade edilebilir. En yüksek sertlik değeri %5 B4C takviyeli numunede 72,4 HB olarak ölçülürken, en düşük sertlik değeri %7 B4C takviyeli numunede 50,9 HB olarak ölçülmüştür. Kompozit yapı içerisine B4C ile birlikte takviye edilen GNP nano malzemenin sertlik değerleri üzerinde bir miktar azaltıcı etki yaptığı da söylenebilir. Her üç B4C takviye oranında da GNP miktarının artmasıyla birlikte sertlik değerlerinde azalma olduğu Şekil 5'teki grafikten anlaşılmaktadır. Grafikten çıkarılacak diğer sonuç ise en düşük sertlik değerlerinin genel olarak %7 B4C takviyeli 3,8,9 ve 10 numaralı kompozit yapılardan elde edilmiş olmasıdır. Bu tür parçacık takviyeli alüminyum kompozit malzemelerde en sık karşılaşılan olumsuzlukların başında, homojen olmayan takviye dağılımı gelmektedir. Kompozit yapı içerisindeki toplanmaların mekanik özellikleri azalttığı literatürde yer almaktadır (Şenel ve Gürbüz, 2021; Güler ve Bağcı, 2020). Bu çalışmada üretilen kompozit malzemelerin içerisinde en düşük homojenitenin %7 B4C takviyeli numunelerde meydana geldiği söylenebilir. Homojen olmayan dağılım sonucunda yapı içerisindeki takviye elemanlarının belli bölgelerde toplanarak gözeneklilik değerlerini yükselttiği ifade edilebilir. Sertlik değerlerindeki bu kararsız durumun işlenebilirlik deneylerinden elde edilecek sonuçlar üzerinde de etkili olacağı anlaşılmaktadır.

3.2. Kesici Takım Aşınma Davranışlarının Değerlendirilmesi

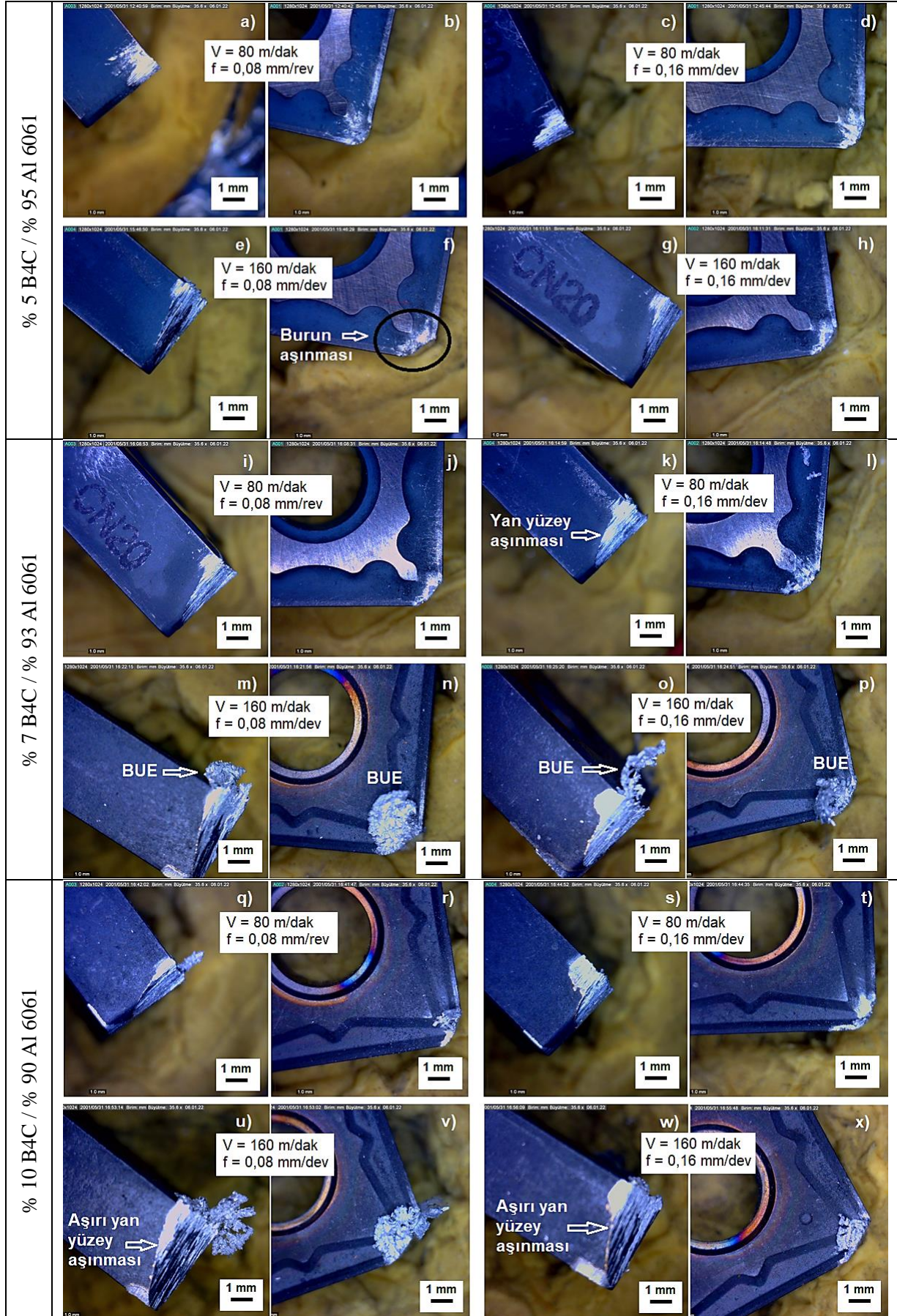
Vorteks yöntemiyle üretilen Al 6061 matrisli, B4C ve GNP takviyeli kompozitlerin tornada işleme deneyleri sonrası kesici takımların üst ve yan yüzeylerinden çekilen mikroskop görüntüleri Şekil 6-10'da verilmiştir. İşleme deneylerinde 3 farklı kesme hızı ve 3 farklı ilerleme değeri kullanılmıştır. Ancak takım aşınmalarındaki farkların daha net incelenebilmesi amacıyla, en düşük kesme hızı 80 m/min ile en yüksek kesme hızı 160 m/min ve en düşük ilerleme değeri 0,08 mm/dev ile en yüksek ilerleme değeri olan 0,16 mm/dev'deki işlemlerde kullanılan kesici takımların mikroskop görüntülerinin seçilmiştir.



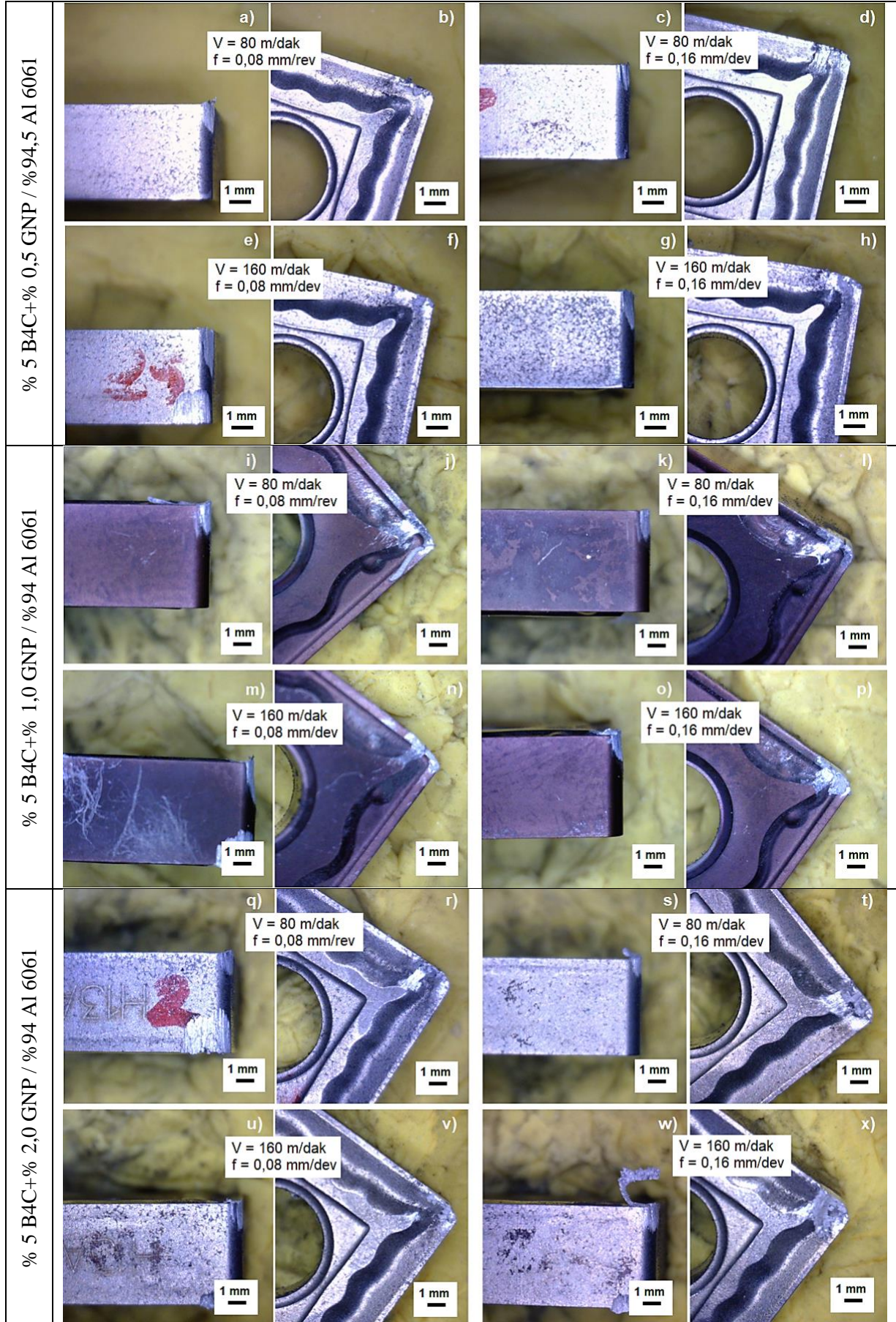
Şekil 6. Saf Al 6061 matris malzemesinin işlenmesinde kullanılan kesici takımlar

Şekil 6'daki kesici takım görüntülerine bakıldığında, tüm kesici takımlarda az miktarda yığıntı talaş (BUE) olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 6.e ve Şekil 6.g). Özellikle yumuşak ve sünek malzemelerin talaşlı imalatlarında BUE oluşumu çok sık rastlanmaktadır. Talaşlı imalat işleminde, iş parçası malzemesi kesici takım üzerine iki şekilde yapışmaktadır. Birincisi, kesici kenar üzerine iş parçası malzemesinin yapışmasıdır. Bu durum BUE oluşumu olarak adlandırılmaktadır. İkincisi, iş parçası malzemesi kesici takım talaş yüzeyinde geniş bir alana yayılarak yığıntı katmanı (BUL) yapışma mekanizması oluşturmuştur. İşleme sırasında talaşın takım yüzeyine sürtünmesiyle oluşan yüksek sıcaklık, talaşın kesici takımın üst yüzeyine yapışmasını kolaylaştırmakta ve BUE/BUL meydana gelmektedir. Alüminyumun talaşlı imalatı sırasında takım ucunda meydana gelen BUE ve BUL oluşumları literatürde yer alan farklı çalışmalarda ifade edilmiştir (Verma vd, 2019; Davima vd, 2007; Kannan ve Kishawy, 2008; Özçatalbaş 2003; Kılıçkap, 2005; Pedersen ve Ramulu, 2006). Ancak Şekil 6'da yer alan takım görüntüleri incelendiğinde hem ilerleme hem de kesme hızındaki değişimlerin, takım aşınmaları üzerinde çok fark oluşturmadığı ifade edilebilir. Takım aşınma mekanizmasından ziyade alüminyum malzemenin takım ucuna sıvanması ve yapışması şeklinde bir etki meydana geldiği söylenebilir. Zira, işleme deneylerinde kullanılan kesici takımın malzemesinin alüminyum ve alüminyum alaşımlarının işlenmesinde kolay aşınmayacak yapıya ve sertliğe sahip olduğu rahatlıkla ifade edilebilir.

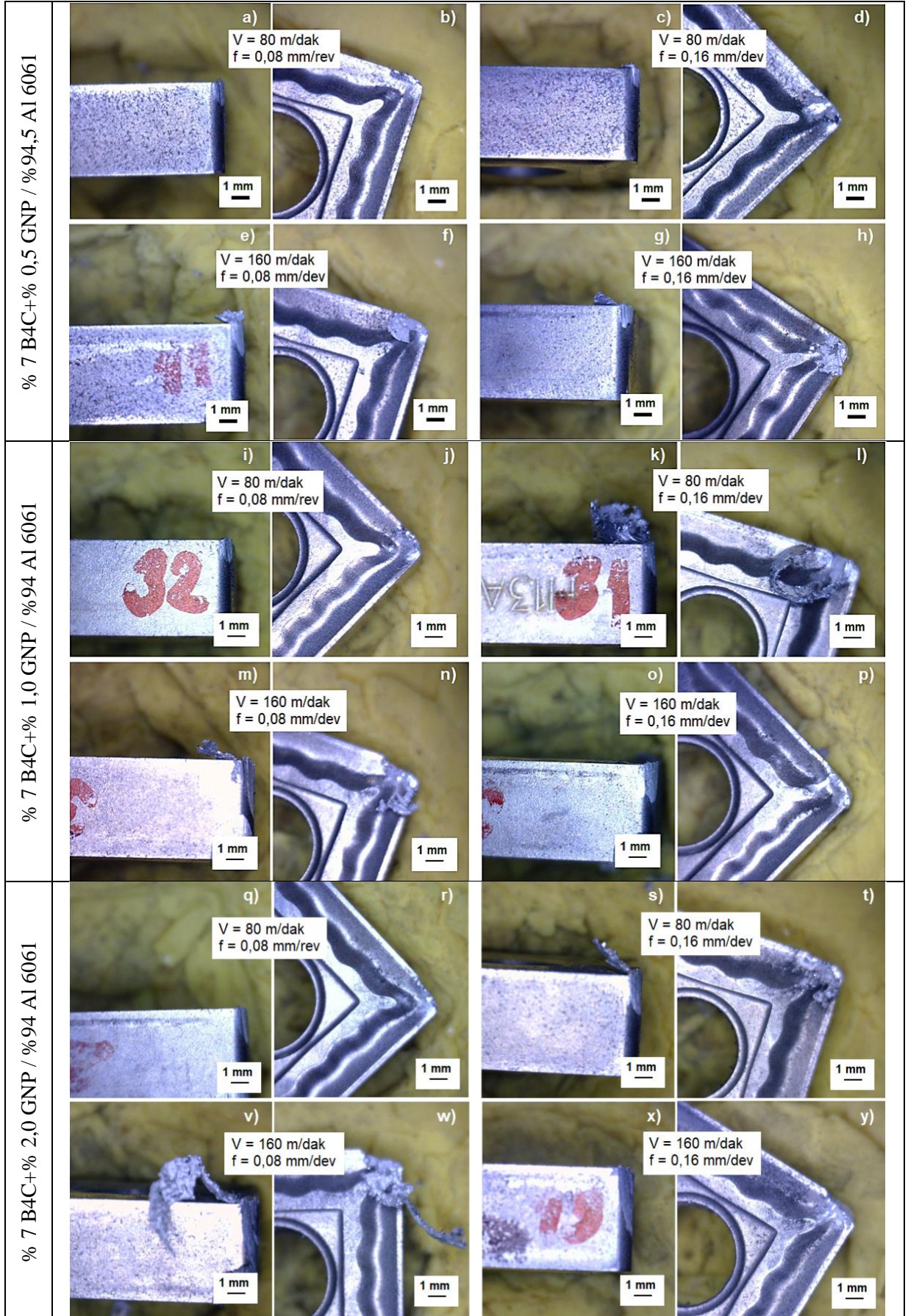
BUE ve BUL oluşumu üzerinde etkili olan diğer husus ise kesici takımın geometrik yapısıdır. SNMG takımlardaki talaş kırıcı form ve düz olmayan talaş yüzeyi nedeniyle BUL oluşumu daha az miktarda gerçekleşmiştir. Çıkan talaşların düz talaş yüzeyine sahip takımlara göre daha az sürtünme maruz kalmaktadır. SNMG takımlarda talaş kırıcı formun etkisiyle, çıkan talaş akışının daha kolay olmakta ve takım yüzeyini daha kısa sürede uzaklaşmaktadır. Dolayısıyla SNMG takımlarda ısı ve sürtünmenin etkisiyle meydana gelen takım aşınmaları ve BUE/BUL oluşumu, düz talaş yüzeyine sahip takımlara göre daha az gerçekleşmektedir.



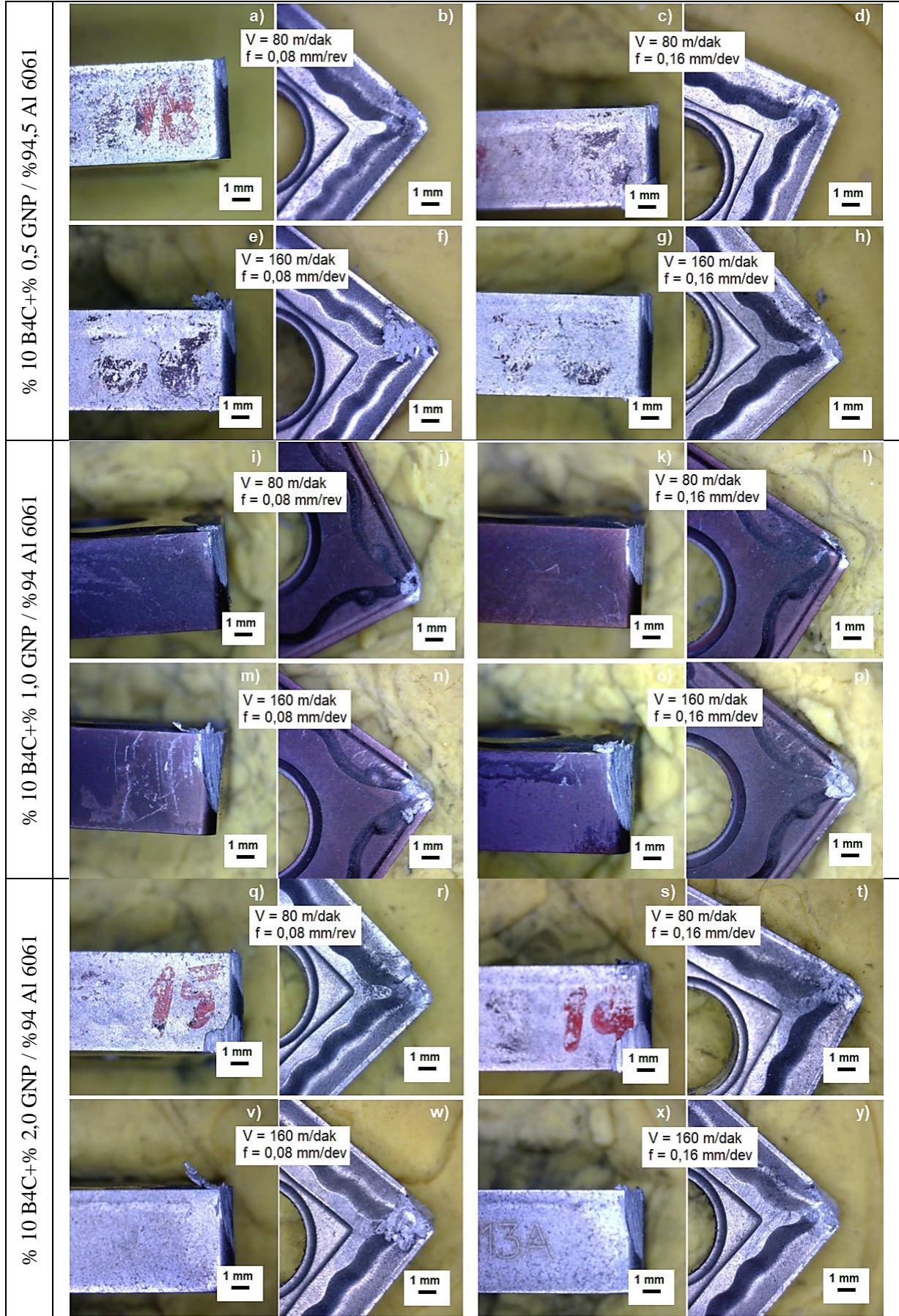
Şekil 7. B4C takviyeli Al 6061 kompozit malzemenin işlenmesinde kullanılan kesici takımlar



Şekil 8. %5 B4C/GNPtakviyeli Al 6061 kompozit malzemenin işlenmesinde kullanılan kesici takımlar



Şekil 9. %7 B4C/GNPtakviyeli Al 6061 kompozit malzemenin işlenmesinde kullanılan kesici takımlar



Şekil 10. %10 B4C/GNPtakviyeli Al 6061 kompozit malzemenin işlenmesinde kullanılan kesici takımlar

Şekil 7-10'daki kesici takım uçları toplu olarak incelendiğinde iki cins takım aşınma mekanizmasının etkili olduğu görülmektedir. Bunların birincisi BUE, ikincisi yan yüzey aşınmasıdır. Şekil 7-10'daki kesici takım görüntülerinden anlaşılacağı üzere BUE'nin BUL'dan daha fazla etkili olduğu ifade edilebilir. Takım aşınmalarının değerlendirilmesini ilerleme miktarına, kesme hızına ve kompozit yapı içerisindeki takviye elemanlarına göre olmak üzere üç bölümde değerlendirilmiştir.

3.2.1. İlerleme Miktarının Etkisi

Talaş kaldırma işlemlerinde kesici takımların aşınması üzerinde etkili kesme parametreleri; ilerleme miktarı, kesme hızı, kesme derinliği, soğutma sıvısı kullanımı, malzeme ve kesici takım cinsi olarak sıralanabilir. Bu parametreler içerisinde kesmeyle ilgili olan ilerleme miktarının ayrı bir önemi vardır. İşleme sırasında genellikle talaş (kesme) derinliği sabit kalarak ilerleme miktarları değiştirilmektedir. İşlemede çıkan talaşın kesiti, takım aşınması ve özellikle BUE oluşumu üzerinde önemli etkiye sahiptir. İşleme sırasında çıkan talaş kesitindeki artışla birlikte BUE miktarlarının artacağı bilinmektedir. Talaş kesiti aşağıdaki eşitlikten hesaplandığına göre:

$$S=f \times a \quad (f=\text{ilerleme} \quad a = \text{talaş derinliği}) \quad (1)$$

İlerleme miktarının artmasıyla talaş kesit alanındaki artış sebebiyle, takım ucuna yığılan talaş miktarında da artış görülmesi normal bir sonuç olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca talaş kesitinin artmasıyla çıkan talaşların takım talaş yüzeyine, sürtünen miktarının daha fazla olduğu ifade edilebilir. Böylece takım-talaş ara yüzeyindeki sürtünme nedeniyle 2. deformasyon bölgesinde daha fazla sıcaklık meydana gelecektir. Dolayısıyla takımlarda ısı ve sürtünmenin etkisiyle meydana gelen talaş yapışmaları veya sıvanmaları artarak BUE/BUL oluşumu üzerinde etkili olmaktadır. Ayrıca, ilerleme miktarındaki artmasının tesiri ile takım ucundaki sıcaklığında artarak aşınmayı kolaylaştırdığı ifade edilebilir. Literatürde yer alan çalışmada benzer sonuçlar rapor edilmiştir (Lin vd, 2003).

Şekil 7-10 incelendiğinde, ilerleme miktarındaki artışın ilk etapta BUE ve BUL miktarları üzerinde daha fazla etki yaptığı ifade edilebilir. Bu durum genel olarak beklendiği gibi ilerleme miktarının artmasıyla BUE ve BUL miktarlarının da arttığı şeklindedir (Şekil 7 m-o, u-w, Şekil 8 e-g, i-k). Ancak yapılan bu deneysel çalışma ile bazı farklı sonuçlarda ortaya çıkmıştır. Hatta genel kanaatin aksine 0,08 mm/d ilerlemede 0,16 mm/d ilerleme göre daha az BUE ve BUL oluşumunun meydana geldiği deneyler söz konusudur (Şekil 7 m-o ve u-w). İlerleme miktarının artmasıyla çıkan talaş kesiti her ne kadar artmış olsa da, işleme sırasında fazla miktarda yığılan talaşın bir kısmı koparak takım ucundan uzaklaşabilmektedir. Böyle bir durumda düşük ilerleme miktarındaki BUE ve/veya BUL miktarı yüksek ilerlemeye göre azalmaktadır (Şekil 9 m-o ve v-x, Şekil 10 e-g ve v-x).

3.2.2. Kesme Hızının Etkisi

Kesme hızının artmasıyla kesme kuvvetleriyle birlikte takım aşınma miktarlarının da artmakta olduğu literatürde sıklıkla yer almaktadır. Karıştırımlı döküm yöntemiyle üretilen AA7075/B4C ve AA7075/B4C/RHA hibrit kompozitleri üzerinde tornada işlenebilirlik deneylerinin yapıldığı bir çalışmada takım aşınmasında kesme hızının en etkili parametre olduğu belirtilmektedir (Verma vd, 2019). Başka bir çalışmada, takım aşınmasının iki faktörden güçlü bir şekilde etkilendiği, bunların kesme hızı ve ardından kesme derinliği olduğu belirtilmiştir (Srivathsan vd, 2016). Kesme hızının artmasıyla genel olarak BUE miktarının azaldığı literatürde yer almaktadır. Artan kesme hızı ile kesici takım yüzeyindeki talaş yapışmalarının daha az oluştuğu gözlenmiştir. Kesme hızının artmasıyla, kesme bölgesinde artan sıcaklık nedeniyle plastik deformasyon meydana gelmektedir. Bu durumda artan sıcaklıkla birlikte kesme bölgesindeki yumuşama, takım-talaş ara yüzeyindeki sürtünmeyi azaltarak talaşın malzemeden ayrılmasını kolaylaştırmaktadır. Dolayısıyla talaş yüzeyini daha kolay terk eden talaşın yapışarak BUE veya BUL oluşturma eğilimi azalmaktadır.

Şekil 6-10'daki görüntüler incelendiğinde genel olarak yan yüzey aşınma mekanizmasının BUE ve BUL oluşumuna göre daha etkili olduğu ifade edilebilir. Bu durum takımların talaş yüzeylerinden çekilmiş olan görüntülerden daha net anlaşılmaktadır (Şekil 7 f-h, j-i, n-p, r-t, v-x, Şekil 10 i-k, m-o, v-x). Yan yüzey aşınmasıyla birlikte kesici takım uç kısmının da ciddi oranda aşındığı görülmektedir. Aşınma miktarı neredeyse karşı yüzdeki kesici kenarı etkileyecek miktara ulaşmıştır (Şekil 7 u-w). Kesme hızının artmasıyla birlikte takım-talaş ara yüzeyinde oluşan sıcaklıkta artmaktadır. Bu durumun takım aşınması üzerinde olumsuz etki yaptığı bilinmektedir. Benzer bir deneysel çalışmada, takım ve malzeme ara yüzünde işleme sırasında oluşan yüksek sıcaklığın takım aşınmasını artırdığını bildirilmiştir (Najem, 2013).

3.2.3. B4C ve GNP Takviye Elemanlarının Etkisi

Bu deneysel çalışmada üretilen hibrit kompozitler içerisinde takviye elemanı olarak ilave edilen B4C, tabiatta bulunan en sert üçüncü bileşik malzeme olarak bilinmektedir. Kompozit yapı içerisinde matris malzemesi Al 6061'e göre çok sert fazda bulunan B4C'nin etkisi çok açık olarak görülmüştür. Şekil 6'da yer alan saf Al 6061 malzemenin işlendiği kesici takım aşınma miktarları ile, Şekil 7'de yer alan farklı oranlarda B4C takviyeli kompozit malzemelerin işlendiği kesici takımların aşınmaları arasında çok önemli miktarda farkların olduğu görülmektedir. B4C oranının artmasına bağlı olarak takım aşınmalarında ciddi miktarda artışların olduğu Şekil 7'deki görüntülerden anlaşılmaktadır. Tüm B4C takviye oranlarında kayda değer takım aşınmaları meydana gelmiştir. Ancak %5 B4C takviyeli Al 6061 kompozitlerin işlendiği takımlar ile, %10 B4C takviyeli Al 6061 kompozitlerin işlendiği takımlar arasında neredeyse iki katı daha fazla aşınma olduğu, Şekil 7 a-c-e-g ile yine Şekil 7 q-s-u-x 'te yer alan takım görüntülerinden tespit edilebilir. Kompozit yapı içerisinde yer alan B4C tanecikleri yan yüzey aşınma mekanizmasını ortaya çıkarmıştır. Kesici takımlarda meydana gelen yan yüzey aşınmalarında abrasif aşınma mekanizmasının etkili olduğu ifade edilebilir. B4C çok yüksek sertlik değeri olan seramik bir malzeme türüdür. İşleme deneyleri yapılan kompozit malzemeler içerisindeki takviye elemanı B4C parçacıklarının kesici takım

kenarlarına sürtünerek adeta bir zımpara aşındırıcısı gibi etki yaptığı söylenebilir. Kompozit yapı içerisindeki B4C oranının yükselmesine birlikte, kesici takımlarda meydana gelen aşınma miktarlarında artış göstermiştir.

Ayrıca kesici takımlarda meydana gelen aşınma davranışlarında bazen sıra dışı durumların meydana gelmesi ise işlenen malzemenin karasız yapısıyla ilişkilendirilebilir. Kompozit yapı içerisindeki B4C'nin çok homojen olmayan dağılımı, yer yer oluşan B4C topaklanmaları ve/veya gözenekli mikro yapı bu tür takım davranışlarına neden olabilmektedir (Şekil 3 ve 4). Kompozit yapı içerisinde B4C ile birlikte yer alan diğer takviye elemanı GNP 'nin takım aşınmalarına etkisi Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da yer alan takım görüntülerinden anlamak mümkündür. Şekil 8, 9 ve 10'daki takımlar ile Şekil 4'teki takımların işlediği kompozit malzemeler içerisindeki B4C oranları aynıdır. Ancak Şekil 7'deki takım aşınma oranları Şekil 8, 9 ve 10'da yer alan takımlara göre daha fazla olduğu açıkça görülmektedir. İşleme deneylerinde aynı kesme derinliği, aynı ilerleme ve kesme hızı değerleri kullanılmış olmasına rağmen GNP katkılı hibrit kompozitlerin işlendiği takımlardaki aşınma miktarları azalmıştır. Bu durumun en önemli sebebi olarak, grafenin kuru yağlayıcı özelliğini göstermek mümkündür. Alüminyum içerisinde %0,5-%1 ve %1,5 GNP katılarak üretilen kompozitlerin işlenebilirlik çalışmasında da GNP 'nin yağlama özelliği gösterdiği ifade edilmiştir (Na vd, 2019). Özellikle Şekil 7'de yer alan takımlarda meydana gelen aşırı yanak aşınması miktarlarının azaldığı görülmektedir. Üç farklı hibrit kompozitin (Al7075+SiC+B4C+Grafen) işlenebilirlik deneylerinin yapıldığı çalışmada, B4C takviyeli kompozitlerde kullanılan kesici takımlarda genel olarak yanak aşınması görülürken, grafen takviyeli kompozitlerde kullanılan kesici takımlarda krater aşınmasının daha yaygın olduğu ifade edilmiştir (Ajithkumar ve Anthony Xavier 2019). Kompozit yapı içerisinde yer alan GNP oranının artmasıyla takım aşınmalarında önemli farklılıkların olmadığı Şekil 8, 9 ve 10'daki takım görüntülerinden anlaşılmaktadır. Bu durumda en düşük oran olan %0,5 GNP takviyesi ile kesici takımların aşınma miktarlarının önemli ölçüde azaltılabileceği söylenebilir. GNP takviye oranının %0,5'ten %2 oranına çıkması ile kesici takım aşınmalarında kayda değer bir farklılık meydana gelmemiştir. Al 6061 matrisli, B4C ve GNP takviyeli kompozitlerin işlenmesinde takım aşınma miktarları üzerinde asıl etkiyi B4C takviye elemanı yapmıştır. B4C takviye oranına bağlı olarak aşınma miktarları artarken, aynı kompozit yapılar içerisinde ilave edilen GNP 'nin yağlama özelliği göstererek takım aşınmalarını azalttığı ortaya çıkmıştır.

4.Sonuçlar

Vorteks yöntemiyle üretilen Al 6061 matrisli ve B4C/GNP takviyeli hibrit kompozitlerin işlenmesinde kesici takımların sergilediği aşınma davranışlarının incelenmesi çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Vorteks yöntemi uygulanarak hibrit kompozit deney numuneleri başarıyla üretilmiştir. Ancak Kompozit yapı içerisindeki B4C takviye elemanı dağılımında istenilen seviyede homojenlik elde edilememiştir. Kompozit yapı içerisinde yer yer B4C takviye topaklanmalarıyla birlikte gözenekli bölgeler meydana gelmiştir. Bu kompozit malzeme yapısı işlenebilirlik üzerinde bazı istikrarsız sonuçların elde edilmesinde etki yapmıştır. Genel olarak tüm işleme deneylerinde takım ucunda belli oranlarda BUE ve az miktarda BUL meydana gelmiştir. Özellikle ilerleme miktarındaki artışın BUE ve BUL miktarları üzerinde daha fazla etki yaptığı görülmüştür. Artan kesme hızı ile kesici takım yüzeyindeki talaş yapışmalarının daha az olduğu BUE ve BUL miktarlarının nispeten azaldığı tespit edilmiştir. Kesme hızının artmasıyla birlikte yan yüzey aşınmasının daha fazla etkili olduğu anlaşılmıştır. Kompozit yapı içerisindeki B4C oranının artmasına bağlı olarak takım aşınmalarında ciddi miktarda artışların olduğu, bu aşınmaların daha ziyade yan yüzey aşınma mekanizması olarak gerçekleştiği görülmüştür. Kompozit yapı içerisinde yer alan GNP nano takviye elemanının işlenebilirlik ve takım aşınmaları üzerinde olumlu etkisi olduğu anlaşılmıştır. Bu durumun, grafenin (GNP) kuru yağlayıcı özelliğinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Al 6061 matrisli, B4C ve GNP takviyeli kompozitlerin işlenmesinde takım aşınma miktarları üzerinde B4C takviye elemanının, ilerleme ve kesme hızına göre daha fazla etkili olduğu kanaatine varılmıştır.

Referanslar

Ajithkumar, J. P., & Anthony Xavier, M. (2019). Flank and crater wear analysis during turning of Al 7075 based hybrid composites, Mater. Res. Express, 6(8), 086560. doi:10.1088/2053-1591/ab196e

Ammisetty, S., Chintamreddy, V.K., & Reddy, K.H. (2021). Investigation on mechanical, microstructural and machining characteristics of B4C - graphene reinforced aluminium hybrid nanocomposites. Advances in Materials and Processing Technologies. 1-18. doi:10.1080/2374068X.2021.1946749

Anthony, X. M., & Ajith Kumar J. P. (2017). Machinability of Hybrid Metal Matrix Composite -A Review. Procedia Engineering, 174, 1110–1118. doi:10.1016/j.proeng.2017.01.264

Davima, J. P., Silva, J., & Baptista, A.M. (2007). Experimental cutting model of metal matrix composites (MMCs), J. Mater. Process. Technol., 183(2-3), 358–362. doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.10.025

Ergül, E., Kurt, H.E., Oduncuoğlu, M., Çivi C., & Eyici, G. (2020). Investigation Of Wear Weight Loss in Aluminum Matrix Composites. The International Journal of Materials and Engineering Technology. 003,160-170

- Gökkaya H., & Nalbant, M. (2007). Investigating the effects of cutting speeds over the built-up layer and built-up edge formation with SEM. *J. Fac. Eng. Arch. Gazi. Univ.*, 22(3), 481-488.
- Güler, Ö., & Bağcı, N. (2020). A short review on mechanical properties of graphene reinforced metal matrix composites. *J. Materres. Technol.* 9(3), 6808–6833. Doi:10.1016/j.jmrt.2020.01.077
- Kannan, S., & Kishawy, H.A. (2008). Tribological aspects of machining aluminium metal matrix composites. *Journal of Material Processing Technology*, 198(1-3), 399-406. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.07.021
- Kannan, S., & Kishawy, H.A. (2006). On the role of reinforcements on tool performance during cutting of metal matrix composites. *J. Manuf. Processes.*, 8(2), 67–75. doi.org/10.1016/S1526-6125(07)00006-0
- Kareem, A., Abdudeen, J.A.O.A., Ahammed, T., & Ziout, A. (2021). A Review on AA 6061 Metal Matrix Composites Produced by Stir Casting. *Materials*. 14, 175. <https://doi.org/10.3390/ma14010175>
- Kılıçkap, E., Çakır, O., Aksoy, M., & İnan, A. (2005). Study of tool wear and surface roughness in machining of homogenised SiC-p reinforced aluminium metal matrix composite. *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165, 862-867. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.02.109
- Khan, M., Din, R.U., Basit, M.A., Wadood, A., Husain, S.W., Akhtar, S., & Aune, R.E. (2021). Study of microstructure and mechanical behaviour of aluminium alloy hybrid composite with boron carbide and graphene nanoplatelets. *Materials Chemistry and Physics*, 271, 124936. doi:10.1016/j.matchemphys.2021.124936
- Lin, J.T., Bhattacharyya, D., & Kecman, V. (2003). Multiple regression and neural Networks analyses in composites machining. *Composites Science and Technology*, 63(3-4), 539-548. doi:10.1016/S0266-3538(02)00232-4
- Mannaa, A., & Bhattacharaya, B. (2003). A study on machinability of Al/SiC-MMC. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 711–716. doi:10.1016/S0924-0136(03)00905-1
- Najem S. H. (2013). Machinability of Al-2024 reinforced with Al₂O₃ and/or B₄C. *University of Babylon Journal*, 21, 84-96.
- Na, H.B., Xu, L.H., Han, G.C., Liu, S.K., Lu, L.H. (2019). Machinability Research on the Micro-Milling for Graphene Nano-Flakes Reinforced Aluminum Alloy. *Metals*, 9, 1102. doi:10.3390/met9101102
- Özcatalbaş, Y. (2003). Chip and built-up edge formation in the machining of in situ Al₄C₃-Al composite. *Materials & Design*, 24(3), 215–221. doi:10.1016/S0261-3069(02)00146-2
- Patil, A., Banapurmath, N.R., Hunashyal, A.M., Meti, V.K.V., & Mahale, R.S. (2022). Development and Performance analysis of Novel Cast AA7076-Graphene Amine-Carbon Fiber Hybrid Nanocomposites for Structural Applications. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 12(2), 1480-1489. doi:10.33263/BRIAC122.14801489
- Pedersen, W., & Ramulu, M. (2006). Facing SiCp/Mg metal matrix composites with carbide tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 172(39), 417-423. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.07.016
- Srivathsan, A., Srinivasa, P.R., & Vignesh, A. (2016). Machinability Studies on Turning Al 6061 alloy with 10% Reinforcement of B₄C on MMC. *MATEC Web of Conferences*. 40, 01002. doi:10.1051/mateconf/20164001002
- Şenel M.C., & Gürbüz, M. (2021). Investigation on Mechanical Properties and Microstructure of B₄C/Graphene Binary Particles Reinforced Aluminum Hybrid Composites. *Metals and Materials International*. 27, 2438–2449. Doi:10.1007/s12540-019-00592-w
- Tabandeh-Khorshid, M., Omrani, E., Menezes, P.L., & Rohatgi, P.K. (2016). Tribological performance of self-lubricating aluminum matrix nanocomposites: Role of graphene nanoplatelets. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(1), 463-469. doi:10.1016/j.jestch.2015.09.005
- Verma, N., Vettivel, S.C., Rao, P.S., & Zafar, S. (2019). Processing tool wear measurement using machine vision system and optimization of machining parameters of boron carbide and rice husk ash reinforced AA 7075 hybrid composite. *Mater. Res. Express*, 6(8), 0865f3. doi:10.1088/2053-1591/ab2509
- Zhang, H. (2000). Plastic Deformation and chip Formation Mechanics during Machining of Copper, Aluminium and an Aluminium Matrix Composite, PhD. Thesis, University of Windsor, Canada.



Kırıkkale İli Özelindeki Betonarme Konutların DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 Yönetmeliklerine Göre Depremisel Açından Mukayesesi

Seismic Comparison of Reinforced Concrete Houses in Kirikkale Province According to DBYBHY-2007 and TBDY-2018 Codes

Orhan Doğan¹, Yunus Genç², Filiz Doğan³, Necati Mert⁴

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

²Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

⁴Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 54050 Sakarya, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 01/05/2022

Kabul / Accepted: 08/06/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

1996 Deprem Bölgeleri Haritası'na göre ülkemizin alan ve nüfus olarak %90'dan fazlası deprem bölgesinde iken, 2018 yılında yayımlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritasına (TDTH) göre ülkemizin tamamı deprem riski altında bulunmaktadır. AFAD'a göre, yenilenen TDTH'de, deprem tehlikesi 46 il merkezinde düşürülürken 6 il merkezinde yükseltildiği ayrıca, en tehlikeli alanda bulunan yapı stokumuzun oranı %44 iken azalarak %26'ya düştüğü belirtilmektedir. TDTH'ye göre bazı bölgelerde deprem tehlikesi bir miktar azalmışsa da, yapı stokumuzun deprem performansının zayıf olabileceği düşünülerek, mevcut binaların depreme dayanıklı hale getirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında, Kırıkkale iline bağlı Merkez, Bahşılı, Balışeyh, Çelebi, Delice, Karakeçili, Keskin, Sulakyurt ve Yahşihan ilçe merkezi için planda simetrik, süneklik düzeyi yüksek ve betonarme çerçeveli 3, 4, 5, 6, 10 ve 14 katlı konutlar modellenmiştir. Hem Z1, Z2, Z3 ve Z4 yerel zemin sınıfları için Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'e (DBYBHY-2007) göre, hem de ZA, ZB, ZC, ZD ve ZE yerel zemin sınıfları için Türk Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY-2018) göre, SAP2000 analiz programı kullanılarak eşdeğer deprem yükleri ayrı ayrı hesap edilmiştir. Genel olarak, DBYBHY-2007'ye göre tasarlanmış binaların TBDY-2018'e göre daha güçlü oldukları görülürken, bazı ilçelerde zemin ve kat adedine göre bazı konutların deprem performans analizinin yeniden yapılması, performans şartını sağlamayan binaların da güçlendirilmesi gerektiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

"Deprem tehlike haritası, Taban kesme kuvveti, Eşdeğer deprem kuvveti, DBYBHY-2007, TBDY-2018, Yerel zemin sınıfları"

Abstract

According to the 1996 Earthquake Zones Map, more than %90 of our country is in the earthquake zone in terms of area and population, while according to the Turkey Earthquake Hazard Map (TDTH) published in 2018, our whole country is under the risk of earthquakes. According to AFAD, in the TDTH, it is stated that the earthquake hazard has been reduced for 46 cities and increased for 6 cities. According to TDTH, although the earthquake hazard has decreased somewhat in some regions, existing buildings should be strengthened against earthquake, considering that the earthquake performance of our building stock may not be enough.

Within the scope of this study, 3, 4, 5, 6, 10 and 14 storey houses with a symmetrical plan, high ductility level and reinforced concrete frame were modeled for Merkez, Bahsili, Baliseyh, Celebi, Delice, Karakeçili, Keskin, Sulakyurt and Yahsihan town centers in Kirikkale province. According to both the Regulations on Buildings to be Built in Earthquake Zones (DBYBHY-2007) for the local soil classes Z1, Z2, Z3 and Z4, and the Turkish Building Earthquake Code (TBDY-2018) for the local soil classes ZA, ZB, ZC, ZD and ZE equivalent earthquake loads were calculated separately using the SAP2000 analysis program. In general, it is seen that the buildings designed according to DBYBHY-2007 are stronger than those of TBDY-2018, while the earthquake performance analysis of some houses according to the number of floors and soils in some districts should be re-made and the buildings that do not have enough performance requirement should also be strengthened.

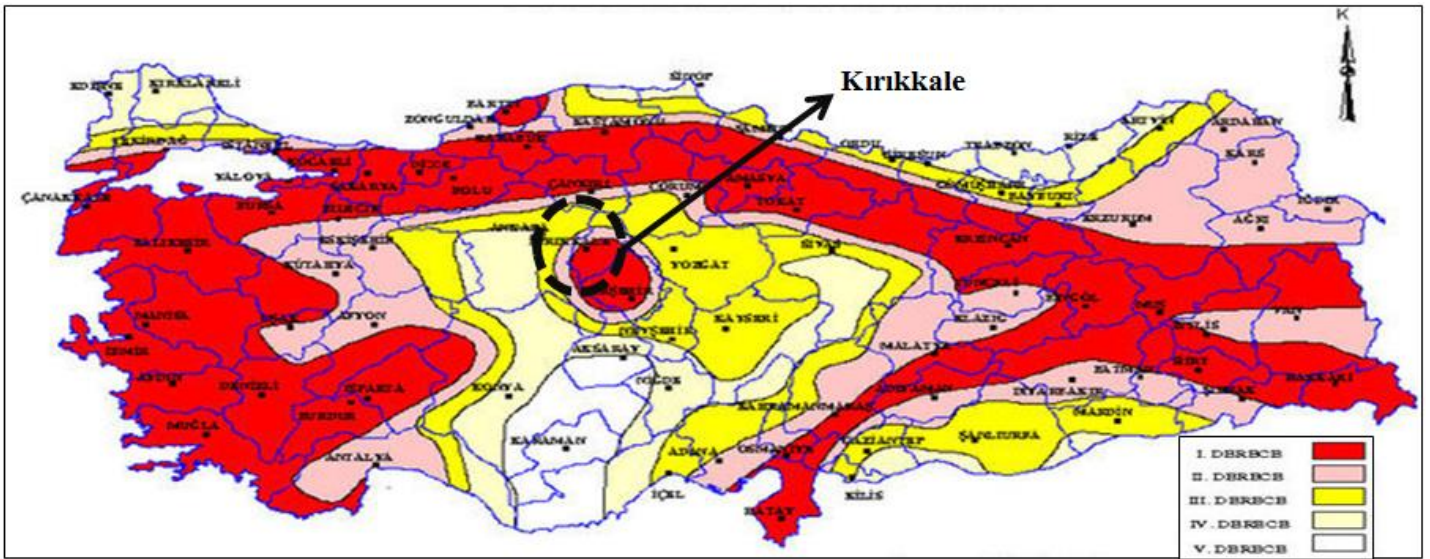
Key Words

"Earthquake hazard map, Base shear force, Equivalent earthquake force, DBYBHY-2007, TBDY-2018, Local soil classes"

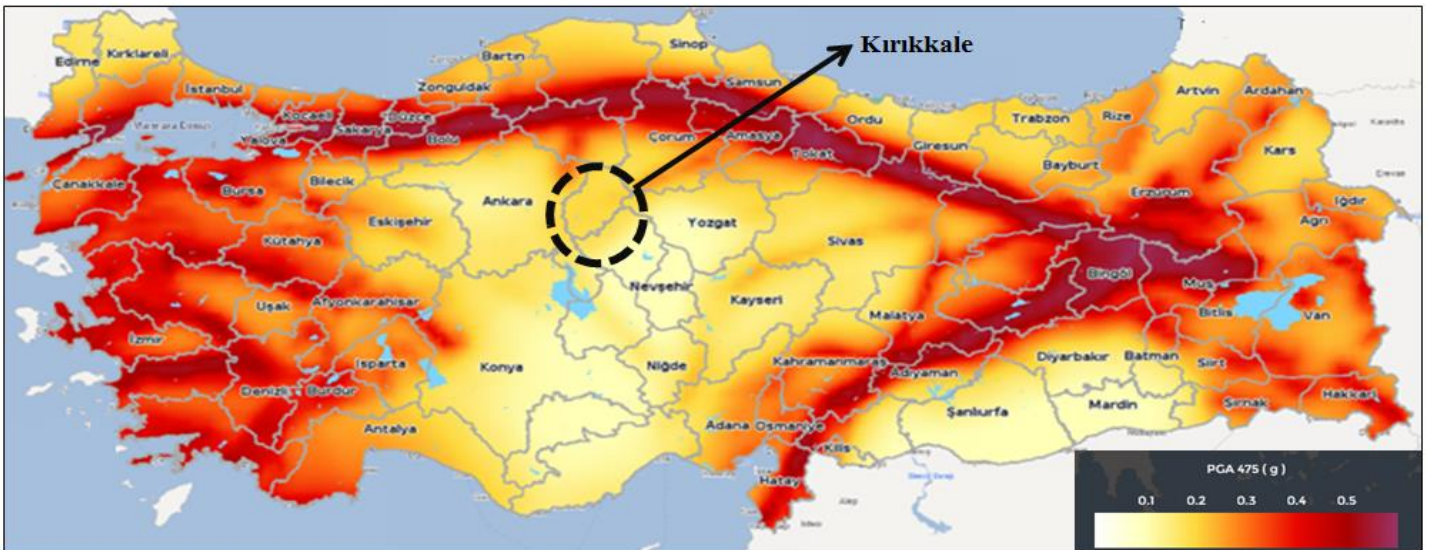
1. Giriş

Türkiye, diri fayların yer aldığı, sık ve büyük depremlerin meydana geldiği bir deprem ülkesidir. İçimizi derin bir şekilde sızlatan “*Sesimi duyan var mı?*” çığlıklarını, yaklaşık her 30 yılda bir yaşayan ülkemiz, en son yaşamış olduğu 17 Ağustos 1999 depremini ve beton yığınları altında can veren ve yakınlarını kaybeden binlerce insanımızın acılarını unutmuyarak, bu büyük depremden sonra, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007) hazırlanarak 2008 yılında yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmelik üzerine yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan yetersizlikler ve ülkemizde son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler sayesinde, yeni ihtiyaçlara karşılık verecek şekilde hazırlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) ise 2019 yılında yürürlüğe girmiştir (Genç, 2019).

1996 yılında yayımlanan Deprem Bölgeleri Haritası'na göre ülkemizin toplam alanının %90'dan fazlası deprem bölgesinde iken (Şekil 1), 2018 yılında yayımlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritasına (TDTH) göre ülkemizin her bir noktası deprem riski altında bulunmaktadır (Şekil 2). 2018 TDTH'de, 46 il merkezinde deprem tehlikesi azalırken 6 il merkezinde ise artmıştır. Bununla beraber, ülkemiz yüzölçümünün %47'si, yapı stokunun %44'ü ve nüfusunun ise %43'ü en tehlikeli alanda bulunurken, güncellenen harita ile bu oranlar ciddi şekilde azalarak sırasıyla %17'ye, %26'ya ve %27'ye düşmüştür (AFAD, 2022; URL-1, 2022). Bu veriler ışığında, güncellenen TDTH ile bazı bölgelerde deprem tehlikesi bir miktar azalmışsa da, yapı stokumuzun deprem performansının zayıf olmasından dolayı mevcut binalarımızı depreme dayanıklı hale getirmemiz gerekmektedir.



Şekil 1. Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası (TDBH, 2006)



Şekil 2. 50 Yıl İçerisinde Aşılma Olasılığı %10 Olan En Büyük Yatay Yer İvmeye Göre TDTH (URL-2, 2021)

Bazı deprem analiz parametreleri; koordinata göre harita spektral ivme katsayıları (S_s, S_1), yerel zemin etki katsayıları (F_s, F_1), tasarım spektral ivme katsayıları (S_{Ds}, S_{D1}), deprem tasarım sınıfları (DTS), bina yükseklik sınıfları (BYS), düşey deprem etkisi, bina performans hedefleri, değerlendirme/tasarım yaklaşımları, dayanım fazlalığı katsayısı ve etkin kesit rijitliği şeklinde TBDY-2018'de revize edilmiştir. Bunların yanı sıra, yeni yönetmelikte zemin sınıfları ile zemin grupları birleştirilerek ZA, ZB, ZC, ZD, ZE ve ZF yerel zemin sınıfları oluşturulmuştur (TBDY, 2018).

Betonarme binaların taşıyıcı sistem elemanlarının kesit tesirlerini doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biri yatay deprem kuvvetlerinin binada oluşturduğu taban kesme kuvvetidir (Öztürk, 2006; Kassem vd., 2021; Kassem vd., 2022). Literatürde, DBYBHY-2007 ile TBDY-2018 deprem yönetmelikleri arasında taban kesme kuvvetini (eşdeğer deprem kuvvetini) karşılaştırabilmek için yapılan güncel çalışmalarda binanın konumu, kat adedi (bina yüksekliği), yerel zemin sınıfı, taşıyıcı sistemi, bina önem kat sayısı gibi farklı değişkenler kullanılmıştır.

Ülkemizde farklı konumlar baz alınarak yapılan birtakım çalışmalarda, TBDY-2018'e göre yapılan çözümlerde DBYBHY-2007'ye kıyasla taban kesme kuvvetlerinde kayda değer azalma olduğu vurgulanmıştır (Tunç ve Tanfener, 2016; Nemutlu ve Sarı, 2018; Atmaca vd., 2019; Döndüren vd., 2021; Aksoylu ve Arslan, 2021; Adar vd., 2021).

DBYBHY-2007'ye göre 4 farklı deprem bölgesinde (Kırşehir-Merkez, Eskişehir-Merkez, Kayseri-Merkez ve Konya-Kampüs) Z2(ZB) ve Z4(ZE) zemin sınıflarında yer alan iki farklı periyot ve taşıyıcı sistemi olan betonarme bina modellerinde yapılan çalışmada, Kırşehir çevresinde zemin ivmesinin büyük ölçüde azaltıldığı ancak Konya çevresinde arttığı, TDTH'nin zayıf dayanıma sahip zeminlerde ve yapı periyotunun 1 saniyeden düşük olması durumunda spektral ivmeleri büyük ölçüde artırdığı vurgulanmıştır (Öztürk, 2018). 3. derece deprem bölgesi olan Afyonkarahisar Merkez için 59 farklı noktada 5 ve 10 katlı betonarme çerçeve bina modelleri üzerinde yapılan çalışmada ise, TBDY-2018'e göre belirlenen eşdeğer deprem yüklerinin DBYBHY-2007'ye göre 5 katlı modelde ZA, ZB, ZC, ZD zemin sınıfları için sırasıyla yaklaşık %58, %58, %37 ve %13 azaldığı fakat ZE zemin sınıfı için %34 arttığı, 10 katlı modelde ise ZA, ZB, ZC, ZD ve ZE zemin sınıfları için sırasıyla yaklaşık %62, %62, %43, %39 ve %18 azaldığı, bu azalışın kötü zeminden sağlam zemine gidildikçe daha fazla olduğu vurgulanmıştır (Başaran, 2018). Kırklareli ilinde 4 katlı bir bina modelinde ZC(Z3) ve ZE(Z4) zemin sınıfları değişken alınarak yapılan çalışmada ise, taban kesme kuvvetinin TBDY-2018'de arttığı, bu artışın daha kötü olan ZE(Z4) zemin sınıfında 3.26 kat olduğu belirtilmiştir (Keskin ve Bozdoğan, 2018).

Eski yönetmeliğe göre 1. derece deprem bölgesinde bulunan Osmaniye ve Sakarya illerinde Z3(ZD) zemin sınıfında bulunan 3 katlı bina modeli üzerinde yapılan bir başka çalışmada, TBDY 2018'e göre belirlenen taban kesme kuvvetinin Sakarya/Merkez için %10.40 oranında arttığı fakat Osmaniye/Merkez için %41.11 oranında azaldığı belirtilmiştir (Öztürk vd., 2019). Özellikle zayıf zeminlerde TBDY-2018'e göre hesaplanan tasarım spektral değerlerinin birçok il merkezinde arttığı, özellikle DBYBHY-2007'ye göre dördüncü derece deprem bölgesinde bulunan il merkezlerinde artışın daha fazla olduğu belirlenmiştir (Bozer, 2020). İstanbul'un Avcılar ilçesinde 3, 5, 7 ve 9 katlı betonarme çerçeve konut binası model alınarak yapılan bir çalışmada, TBDY-2018 yönetmeliği ile özellikle ZC, ZD ve ZE sınıfı gibi zayıf zeminlerde spektral ivme değerlerinin önemli ölçüde arttığı sonucuna varılmıştır (Aksoylu vd., 2020).

DBYBHY-2007'ye göre 4 farklı deprem bölgesinde bulunan Sakarya-Serdivan, Kocaeli-Kandıra, Eskişehir-Sivrihisar ve Ankara-Yenimahalle konumlarında, 4, 7 ve 10 katlı modeller üzerinde farklı zemin sınıfları dikkate alınarak yapılan çalışmada, taban kesme kuvvetinin genel olarak kat adedi arttıkça DBYBHY-2007'ye kıyasla daha düşük değerler verdiği hesaplanmıştır (Sümer ve Hamsici, 2020). İki farklı deprem bölgesinde bulunan Adana ve Adıyaman illerinde, Z1(ZA), Z3(ZD) ve Z4(ZE) zemin sınıflarında 5-30 kat arasındaki 26 adet model ile yapılan çalışmada, TBDY-2018 esas alınarak elde edilen taban kesme kuvveti değerlerinin DBYBHY-2007 esas alınarak elde edilen taban kesme kuvveti değerlerinden çok daha düşük olduğu belirlenmiştir (Ünsal vd., 2020). DBYBHY-2007'ye göre 1. derece deprem bölgesinde bulunan Malatya ilinde 5 katlı betonarme bir bina modeli üzerinde yapılan bir başka çalışmada, TBDY-2018'e göre belirlenen taban kesme kuvvetlerinde ZA, ZB, ZC, ZD ve ZE yerel zemin sınıfları için sırayla, %50.9, %50.9, %19.7, %18.6 ve %4.6 oranlarında azalma olduğu belirtilmiştir (Özmen ve Erkut, 2021).

Yukarıda yapılan çalışmalara bakıldığında; binanın bulunduğu koordinatına, yerel zemin sınıfına ve yüksekliğine bağlı olarak, DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 arasında binaya etkiyen deprem kuvvetleri bakımından ciddi oranlarda artış veya azalışların olduğu görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında, Kırıkkale iline bağlı Merkez, Bahşılı, Balışeyh, Çelebi, Delice, Karakeçili, Keskin, Sulakyurt ve Yahşihan olmak üzere toplam 9 adet ilçe merkezinde, ilçe merkezlerinin koordinatına göre belirlenen deprem parametreleri kullanılarak, planda simetrik, süneklik düzeyi yüksek ve betonarme çerçevesi 3, 4, 5, 6, 10 ve 14 katlı konut modellerin eşdeğer deprem yükleri, hem DBYBHY-2007'ye göre Z1, Z2, Z3 ve Z4 yerel zemin sınıfları, hem de TBDY-2018'e göre ZA, ZB, ZC, ZD ve ZE yerel zemin sınıfları için SAP2000 programı kullanılarak ayrı ayrı hesap edilmiştir. Kırıkkale-Merkez, Bahşılı, Balışeyh, Çelebi, Karakeçili ve Keskin ilçeleri hem DBYBHY-2007'ye hem de TBDY-2018'e göre eşdeğer deprem kuvvetlerinin birbirine yakın olması nedeniyle birlikte değerlendirilerek Kırıkkale-Merkez ilçesi için ve eşdeğer deprem kuvvetlerinin birbirinden farklı olması nedeniyle Delice, Yahşihan ve Sulakyurt ilçeleri için ayrı ayrı olmak üzere toplam 4 farklı ilçe merkezinde hesaplamalar yapılmıştır. Kırıkkale ili ve ilçelerindeki deprem performans analizi gerektiren binalar tespit edilmiştir.

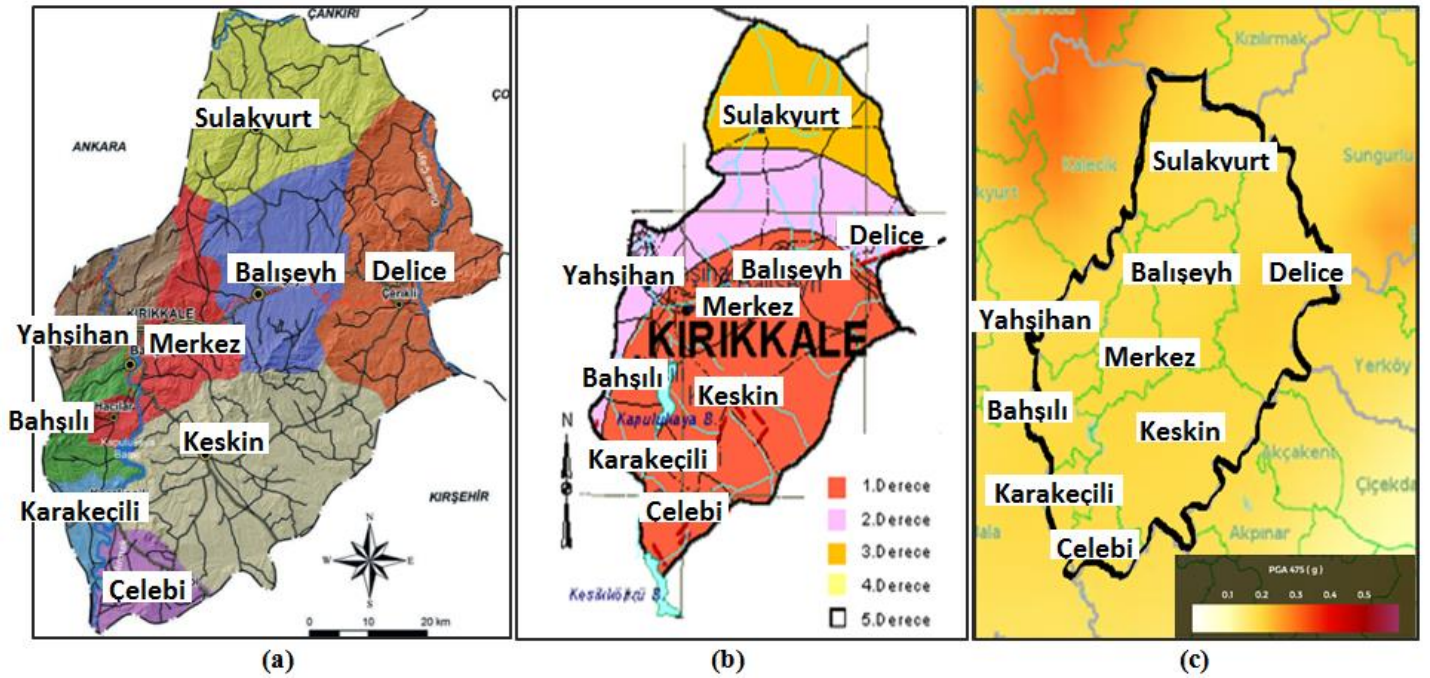
2. Yöntem (Method)

2.1. Çalışma alanı

Kırıkkale ili, kuzey yarım kürede 39° 20'-40° 20' kuzey paralelleri ile 33° 20'-34° 25' doğu meridyenleri arasında yer almakta olup 700 m rakıma, 4630 km² (ülkemiz topraklarının %0.62'si) yüzölçüme ve nüfus olarak 275,968 kişiye sahiptir (TÜİK, 2021). Ayrıca, kuzey-güney ve doğu-batı istikametlerinde ana ulaşım ağlarının üzerinde bulunmasından dolayı ulaşım açısından stratejik bir öneme sahiptir. Kırıkkale ili batısında Ankara, doğusunda Yozgat ve Çorum, kuzeyinde Çankırı, güneyinde ise Kırşehir illeri ile çevrilidir. Kırıkkale Merkez, Bahşılı, Balışeyh, Çelebi, Delice, Karakeçili, Keskin, Sulakyurt ve Yahşihan olmak üzere 9 ilçe ve 185 köyden oluşmaktadır (Kırıkkale, 2017).

Çalışma kapsamında değerlendirilecek olan Kırıkkale ili çevresinde, kuzeyde büyük depremleri oluşturan sağ yanal doğrultu atımlı Kuzey Anadolu Fay zonu, güneydoğuda Seyfe, doğuda Kırıkkale-Sungurlu, güneyde ise Tuz Gölü Fay Zonları ve Keskin Fayı, güneybatıda ise Bala ve Karakeçili Fayları bulunmaktadır (Sönmezer vd., 2015).

Kırıkkale ve çevresinde yapılaşma hızlı bir gelişim göstermektedir. Genellikle yapı stokunda yatay mimariye uygun olarak az katlı (3-6) yapılar bulunmaktadır. Ancak, son zamanlarda yüksek katlı yapıların sayısında artışlar görülmektedir. Kırıkkale ilinde belediyeler tarafından verilen yapı ruhsatlarından 2021 yılının ilk dokuz ayında bir önceki yıla göre, bina sayısının %28.69, yüzölçümünün %78.10, daire sayısının ise %68.58 arttığı görülmektedir (TÜİK, 2021).



Şekil 3. Kırıkkale ili (a) İl haritası, (b) Türkiye deprem bölgeleri haritası (TDBH, 2006), (c) 50 yıl içerisinde aşılma olasılığı %10 olan en büyük yatay yer ivmeye göre TDTH (URL-2, 2021)

DBYBHY-2007'ye göre Kırıkkale Merkez, Bahşılı, Balışeyh, Çelebi, Karakeçili ve Keskin ilçe merkezleri 1. derece, Delice ve Yahşihan ilçe merkezleri 2. derece, Sulakyurt ilçe merkezi ise 3. derece deprem bölgesi içerisinde kalmaktadır (TDBH, 2006). Ancak güncellenen TDTH'ye göre bu deprem bölgeleri kaldırılmış olup, yerel zemin sınıfına göre her bir koordinatın kendine özgü deprem yer ivmeleri yer almıştır (Şekil 3).

2.2. Eşdeğer deprem kuvvetlerinin belirlenmesi

DBYBHY-2007'de göz önüne alınan deprem doğrultusunda, binanın tamamına etkiyen toplam eşdeğer deprem yükü V_t , binanın birinci doğal titreşim periyodu kullanılarak Denklem 1'e göre belirlenmektedir (DBYBHY, 2007).

$$V_t = \frac{W A(T_1)}{R_a(T_1)} \geq 0.10 A_0 I W \quad (1)$$

Burada, $A(T_1)$ birinci doğal titreşim periyodu için spektral ivme katsayısını, $R_a(T_1)$ birinci doğal titreşim periyodu için deprem yükü azaltma katsayısını, A_0 etkin yer ivmesi katsayısını, I bina önem katsayısını, W ise binanın deprem yükü hesabında kullanılan toplam

ağırlığını ifade etmekte olup her bir katın ölü yükünün ve hareketli yük katılım katsayısı kullanılarak hesaplanan hareketli yükünün toplamıdır.

Spektral ivme katsayısı $A(T)$, etkin yer ivmesi katsayısı, bina önem katsayısı ve spektrum katsayısına bağlı olarak Denklem 2 ile; spektrum katsayısı $S(T)$, doğal titreşim periyoduna (T) ve spektrum karakteristik periyotlarına (T_A ve T_B) bağlı olarak Denklem 3 ile; deprem yükü azaltma katsayısı $R_a(T)$ ise, doğal titreşim periyoduna (T), taşıyıcı sistem davranış katsayısına (R) ve spektrum karakteristik periyoduna (T_A) bağlı olarak Denklem 4 ile hesaplanmaktadır (DBYBHY, 2007).

$$A(T)=A_0 I S(T) \tag{2}$$

$$S(T)=\begin{cases} 1+1.5\frac{T}{T_A} & (0 \leq T \leq T_A) \\ 2.5 & (T_A \leq T \leq T_B) \\ 2.5\left(\frac{T_B}{T}\right)^{0.8} & (T_B < T) \end{cases} \tag{3}$$

$$R_a(T)=\begin{cases} 1.5+(R-1.5)\frac{T}{T_A} & (0 \leq T \leq T_A) \\ R & (T_A < T) \end{cases} \tag{4}$$

TBDY-2018’de göz önüne alınan X-X deprem doğrultusunda, binanın tamamına etkiyen toplam eşdeğer deprem yükü $V_{IE}^{(X)}$, Denklem 5’e göre belirlenmektedir (TBDY, 2018).

$$V_{IE}^{(X)} = m_t S_{aR}(T_p^{(X)}) \geq 0.04 m_t g I S_{DS} \tag{5}$$

Burada, $S_{aR}(T_p^{(X)})$ binanın X-X deprem doğrultusunda hakim doğal titreşim periyodu (T_p) göz önüne alınarak hesaplanan azaltılmış tasarım spektral ivmesini, I bina önem katsayısını, S_{DS} kısa periyot için tasarım spektral ivme katsayısını, m_t binanın toplam kütesini ifade etmektedir. Binanın toplam kütesi, sabit kütle ve hareketli yük katılım katsayısı kullanılarak hesaplanan hareketli kütle toplamıdır.

Azaltılmış tasarım spektral ivmesi $S_{aR}(T)$, DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için belirlenecek yatay elastik tasarım spektral ivmesine ve deprem yükü azaltma katsayısına bağlı olarak Denklem 6 ile, yatay elastik tasarım spektral ivmesi $S_{ae}(T)$, tasarım spektral ivme katsayılarına (S_{DS} , S_{D1}), yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyotlarına (T_A , T_B ve T_L) ve doğal titreşim periyoduna (T) bağlı olarak yerçekimi ivmesi cinsinden Denklem 7 ile, deprem yükü azaltma katsayısı $R_a(T)$ ise, taşıyıcı sistem davranış katsayısına (R), dayanım fazlalığı katsayısına (D), bina önem katsayısına (I), binanın doğal titreşim periyoduna, spektrum köşe periyoduna (T_B) bağlı olarak Denklem 8 ile hesaplanmaktadır (TBDY, 2018).

$$S_{aR}(T)=\frac{S_{ae}(T)}{R_a(T)} \tag{6}$$

$$S_{ae}(T)=\begin{cases} \left(0.4+0.6\frac{T}{T_A}\right)S_{DS} & (0 \leq T \leq T_A) \\ S_{DS} & (T_A \leq T \leq T_B) \\ \frac{S_{D1}}{T} & (T_B \leq T \leq T_L) \\ \frac{S_{D1}T_L}{T^2} & (T_L \leq T) \end{cases} \tag{7}$$

$$R_a(T)=\begin{cases} \frac{R}{I} & (T > T_B) \\ D+\left(\frac{R}{I}-D\right)\frac{T}{T_B} & (T \leq T_B) \end{cases} \tag{8}$$

2.3. Yerel zemin sınıfları

TBDY-2018'de yer alan yerel zemin sınıfları için yeni kriterler getirilmiş olduğundan DBYBHY-2007'den farklı bir sınıflandırma yapılmıştır. DBYBHY-2007'de yerel zemin sınıfları, zemin grubuna ve en üst zeminin tabaka kalınlığına göre, en iyi zeminden en kötüye doğru sırasıyla Z1, Z2, Z3 ve Z4 olarak tanımlanmıştır (DBYBHY, 2007). TBDY-2018'de ise zemin grupları ve zemin tabaka kalınlıkları ifadesi çıkarılmış ve iyi zeminden kötü zemine doğru sırasıyla ZA, ZB, ZC, ZD, ZE ve ZF yerel zemin sınıfları tanımlanmıştır (TBDY, 2018).

Bu çalışmada, yapılan analiz sonuçlarının daha sağlıklı karşılaştırmasını yapabilmek için zeminin üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı ve ortalama standart penetrasyon darbe sayısı gibi parametreler esas alınarak TBDY-2018'deki ZA, ZB, ZC, ZD ve ZE yerel zemin sınıflarının DBYBHY 2007'deki karşılıkları sırasıyla Z1, Z1, Z2, Z3 ve Z4 olarak kabul edilmiştir. ZF sınıfı zeminler için sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektirdiğinden ve tasarım/gözetim kontrolüne tabi olduğundan bu çalışmada ZF yerel zemin sınıfı dikkate alınmamıştır.

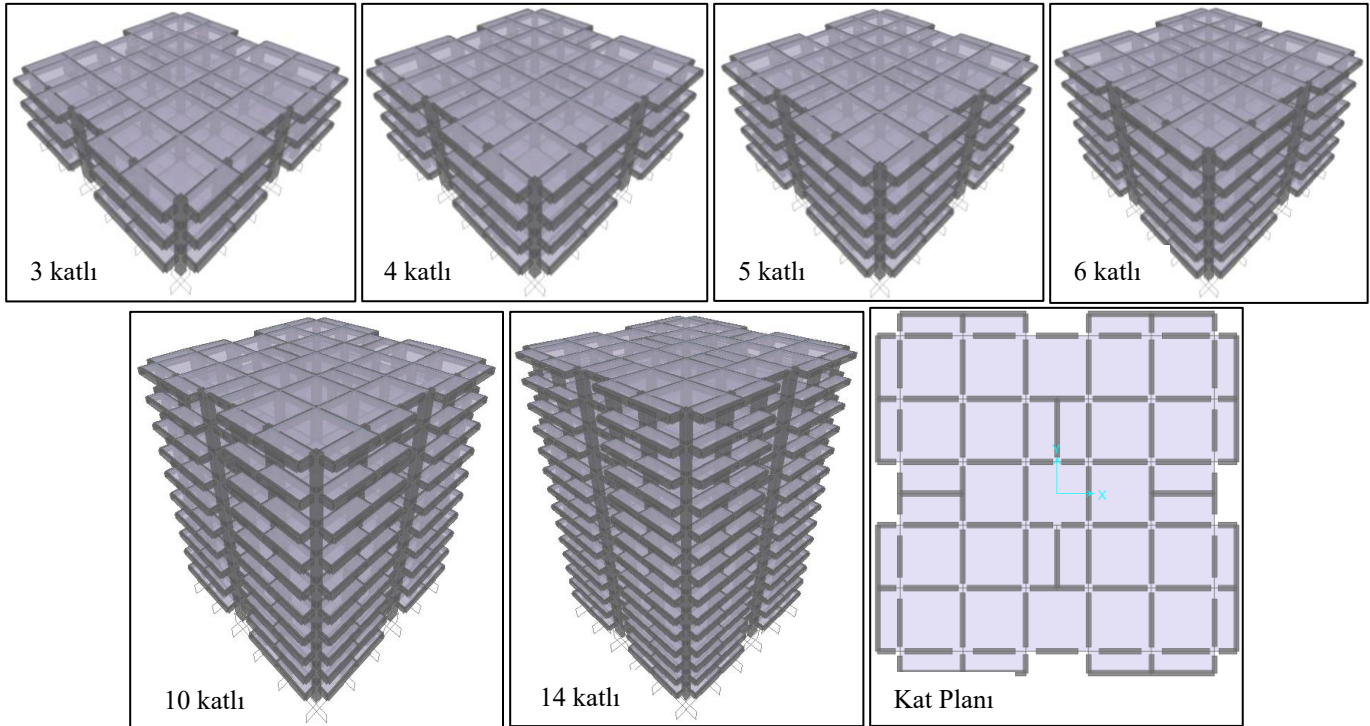
2.4. Bina geometrisi ve analize esas proje parametreleri

Bu çalışmada, TS-500, DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 kurallarına uygun tasarlanan ve literatürde (Doğan ve Genç, 2019) var olan planda simetrik olan betonarme çerçeveli toplam 5 katlı bir yapı örneği referans alınmıştır. Modelin kat plan alanı, balkonlar dâhil 812.25 m²'dir. Bu yapı örneği baz alınarak oluşturulan modellerde betonarme elemanların boyutları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Modellerde Kullanılacak Betonarme Elemanların Boyutları

Betonarme Eleman	Boyutlar (cm)
Köşe ve iç kolonlar	75x75
Dış çerçeve kolonlar (köşe ve iç kolonlar hariç)	170x60
Kirişler	40x60
Döşemeler	15

Referans alınan yapı örneği ilk önce 5 katlı olarak modellenmiş, daha sonra kat sayıları azaltılarak veya artırılarak, Kırıkkale ili genelindeki yapı stokunu yansıtabilecek şekilde 3, 4, 5, 6, 10 ve 14 katlı modeller oluşturulmuştur. Eşdeğer deprem yükü yöntemi, yönetmeliklerdeki koşulların sağlandığı durumlarda yatay deprem yüklerinin belirlenmesi için sıklıkla kullanılmaktadır. Tasarlanan modellerimizde burulma ve yumuşak kat düzensizliği bulunmadığı için, DBYBHY-2007'de maksimum 40 m, TBDY-2018'de ise maksimum 42 m yüksekliğe sahip binalarda eşdeğer deprem yükü yöntemine izin verilmektedir. Bu nedenle, 3,00 m kat yüksekliği dikkate alınarak maksimum kat adedi 14 olarak belirlenmiş ve eşdeğer deprem yükü yöntemi ile analizler yapılmıştır.



Şekil 4. Örnek Binaların SAP2000 Modelleri ve Kat Planı

Eşdeğer deprem yüklerinin hesabında ihtiyaç duyulan bina kütlesi ve birinci doğal titreşim periyotları, uluslararası geçerliliğe sahip SAP2000 yapısal analiz programı ile belirlenmiştir. Bunun için, 3, 4, 5, 6, 10 ve 14 kata sahip binaların modelleri, SAP2000 analiz

programında hazırlanmış olup, binaların SAP2000 modelleri ve kat planı Şekil 4’te verilmiştir (SAP2000, 2019). Programda, betonarme kiriş ve kolon elemanlar çubuk, döşeme ise kabuk eleman olarak modellenmiştir. TBDY-2018’e göre yapılan hesaplamalarda, taşıyıcı sistem elemanları olan kolon ve kirişler için etkin kesit rijitlikleri (kolon için 0.70, kiriş için 0.35) kullanılmıştır (TBDY, 2018). Kolonların temele ankastre olarak mesnetlendiği ve döşemelerin kat seviyelerinde rijit diyafram olarak çalıştığı kabul edilmiştir.

TS-498’e uygun olarak sabit ve hareketli yükler belirlenmiştir. Sabit yük olarak normal kat döşemeleri için 212 kg/m^2 , çatı katı döşemeleri için 150 kg/m^2 , hareketli yük olarak normal kat döşemeleri ve balkonlar için 200 kg/m^2 , çatı katı döşemeleri içinse 150 kg/m^2 alınmıştır. Beton sınıfı C25/30 seçilmiş ve birim hacim ağırlığı 2.50 ton/m^3 alınmıştır (TS498, 1997; TS500, 2000).

Kırıkkale ili genelinde kamu binalarına yönelik deprem performans analizi ve güçlendirme çalışmaları yapılırken, en büyük stok oranına sahip deprem perdeleri bakımından yetersiz konutlara bu çalışma ile dikkat çekilmek istenilmiş olup, deprem analizlerinde, eşdeğer deprem yükü yöntemine uygun deprem parametreleri seçilmiştir. DBYBHY-2007’de eşdeğer deprem yüklerinin belirlenmesinde, bina önem katsayısı konutlar için $I=1.00$, taşıyıcı sistem davranış katsayısı süneklik düzeyi yüksek için $R=8$, hareketli yük katılım katsayısı $n=0.30$ seçilmiş etkin spektrum katsayısı $S(T)$, deprem yükü azaltma katsayısı $R_a(T)$, spektral ivme katsayısı $A(T)$ ise sırasıyla Eşitlik 2, Eşitlik 3 ve Eşitlik 4’e göre hesaplanmıştır (DBYBHY, 2007). TBDY-2018’e göre yapılan deprem analizlerinde kontrollü hasar performans hedefini sağlamak üzere dayanıma göre tasarım (DGT) hesap esasları dikkate alınmış, konut için Bina Kullanım Sınıfı $BKS=3$, bina önem katsayısı $I=1.00$, sistem davranış katsayısı süneklik düzeyi yüksek için $R=8$; dayanım fazlalığı katsayısı $D=3$, hareketli yük katılım katsayısı $n=0.30$ seçilmiş, yatay elastik tasarım spektral ivmesi $S_{ae}(T)$, deprem yükü azaltma katsayısı $R_a(T)$, azaltılmış tasarım spektral ivmesi $S_{aR}(T)$ ise sırasıyla Eşitlik 6, Eşitlik 7 ve Eşitlik 8’e göre hesaplanmıştır (TBDY, 2018).

Analizlerde kullanılan modellerin, kat adedine bağlı bina yüksekliği, bina yüksekliğine ve Deprem Tasarım Sınıfına (DTS) bağlı Bina Yükseklik Sınıfı (BYS) ve deprem yüklerinin hesaplanmasında kullanılacak toplam ağırlığı ile ilgili bilgiler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Kat Adedine Bağlı BYS ve Bina Toplam Ağırlığı

Kat Adedi	Bina Yüksekliği (m)	BYS	Ağırlık, W (t)
3	9.00	7-8	2866.91
4	12.00	6-7	3842.28
5	15.00	6-7	4817.65
6	18.00	5-6	5793.02
10	30.00	4-5	9694.50
14	42.00	4-5	13595.98

DBYBHY-2007’de yer alan Türkiye Deprem Bölgeleri Haritasına göre 1., 2. ve 3. derece deprem bölgelerinde bulunan Kırıkkale ilinin 9 ilçe merkezine ait etkin yer ivme katsayısı ile bu yerlere ait koordinatların TDTH’ye göre belirlenen en yüksek yer ivmesi $PGA(g)$, 5 farklı yerel zemin sınıfı için 50 yıl içerisinde aşılma olasılığı %10 olan DD-2 deprem yer hareketi düzeyine ait kısa periyot ve 1.0 s periyot için tasarım spektral ivme katsayıları (S_{DS} ve S_{D1}) ile Bina Kullanım Sınıfı ve S_{DS} ’ye bağlı Deprem Tasarım Sınıfları (DTS) Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Kırıkkale İlçe Merkezlerinin DBYBHY-2007 İle TBDY-2018 Yönetmeliklerine Bağlı Deprem Parametreleri

Yer	Enlem/ Boylam	DBYBHY-2007			TBDY-2018		
		Deprem Bölgesi	Etkin Yer İvme Katsayısı, A_0	En Yüksek Yer İvmesi, $PGA(g)$	Yerel Zemin Sınıfı	S_{DS}/S_{D1}	DTS
Bahşılı	39.812791°/ 33.474489°	1	0.40	0.192	ZA	0.357/ 0.101	3
					ZB	0.401/ 0.101	3
					ZC	0.580/ 0.189	2
					ZD	0.644/ 0.296	2
					ZE	0.826/ 0.500	1
Balışeyh	39.909667°/ 33.716026°	1	0.40	0.193	ZA	0.358/ 0.105	3
					ZB	0.402/ 0.105	3
					ZC	0.581/ 0.197	2
					ZD	0.645/ 0.306	2
					ZE	0.826/ 0.514	1

Tablo 3 (devam). Kırıkkale İlçe Merkezlerinin DBYBHY-2007 İle TBDY-2018 Yönetmeliklerine Bağlı Deprem Parametreleri

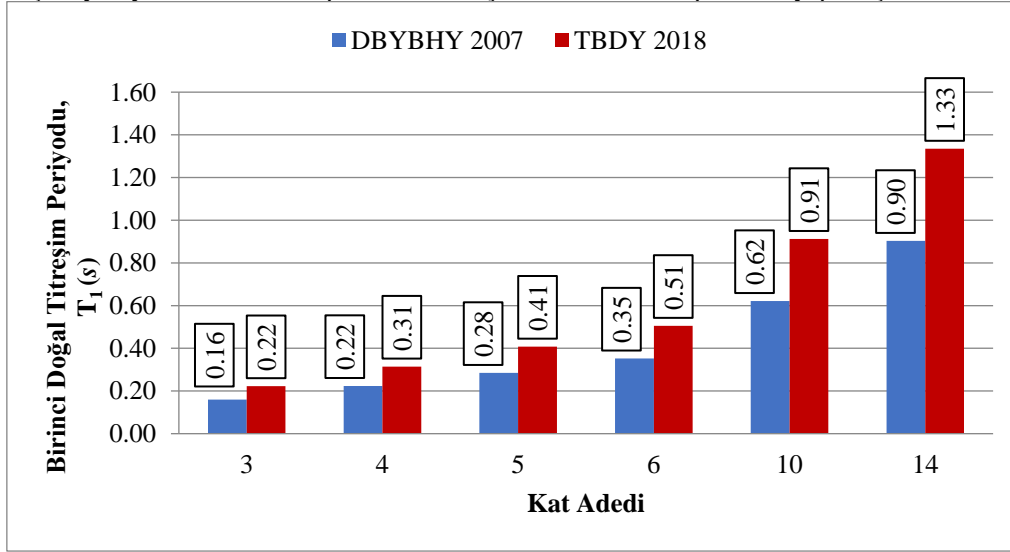
Yer	Enlem/ Boylam	DBYBHY-2007			TBDY-2018		
		Deprem Bölgesi	Etkin Yer İvme Katsayısı, A_0	En Yüksek Yer İvmesi, PGA (g)	Yerel Zemin Sınıfı	S_{DS} / S_{D1}	DTS
Çelebi	39.465665°/ 33.525057°	1	0.40	0.186	ZA	0.342/ 0.091	3
					ZB	0.385/ 0.091	3
					ZC	0.556/ 0.171	2
					ZD	0.624/ 0.270	2
					ZE	0.814/ 0.464	1
Karakeçili	39.596102°/ 33.382716°	1	0.40	0.191	ZA	0.354/0.094	3
					ZB	0.399/0.094	3
					ZC	0.576/ 0.177	2
					ZD	0.641/ 0.279	2
					ZE	0.824/ 0.476	1
Keskin	39.672795°/ 33.614026°	1	0.40	0.195	ZA	0.360/ 0.098	3
					ZB	0.405/ 0.098	3
					ZC	0.585/ 0.185	2
					ZD	0.648/ 0.290	2
					ZE	0.828/ 0.491	1
Kırıkkale Merkez	39.838778°/ 33.496521°	1	0.40	0.191	ZA	0.355/0.102	3
					ZB	0.400/0.102	3
					ZC	0.577/ 0.191	2
					ZD	0.642/ 0.298	2
					ZE	0.825/ 0.503	1
Delice	39.944099°/ 34.031805°	2	0.30	0.208	ZA	0.383/ 0.114	3
					ZB	0.431/ 0.114	3
					ZC	0.623/ 0.213	2
					ZD	0.679/ 0.329	2
					ZE	0.843/ 0.543	1
Yahşihan	39.860626°/ 33.453747°	2	0.30	0.189	ZA	0.353/ 0.102	3
					ZB	0.397/ 0.102	3
					ZC	0.573/ 0.191	2
					ZD	0.638/ 0.298	2
					ZE	0.822/ 0.503	1
Sulakyurt	40.159790°/ 33.718079°	3	0.20	0.191	ZA	0.358/ 0.115	3
					ZB	0.402/ 0.115	3
					ZC	0.581/ 0.216	2
					ZD	0.645/ 0.333	2
					ZE	0.826/ 0.548	1

Çalışmada kullanılan betonarme çerçevesel bina modelleri planda simetrik bir tasarıma sahip olduğundan dolayı, X-X ve Y-Y doğrultularındaki eşdeğer deprem kuvvetleri hemen hemen aynı çıkacaktır. Bu nedenle, analizlerde sadece X-X doğrultusu dikkate alınmıştır.

3. Bulgular ve Değerlendirme

Kırıkkale iline bağlı Merkez, Bahşılı, Balışeyh, Çelebi, Delice, Karakeçili, Keskin, Sulakyurt ve Yahşihan olmak üzere toplam 9 adet ilçe merkezinde yer alan, 3, 4, 5, 6, 10 ve 14 katlı bina modelleri için hem DBYBHY-2007'ye göre Z1, Z2, Z3 ve Z4 yerel zemin sınıfları, hem de TBDY-2018'e göre ZA, ZB, ZC, ZD ve ZE yerel zemin sınıfları dikkate alınarak ayrı ayrı eşdeğer deprem yükleri

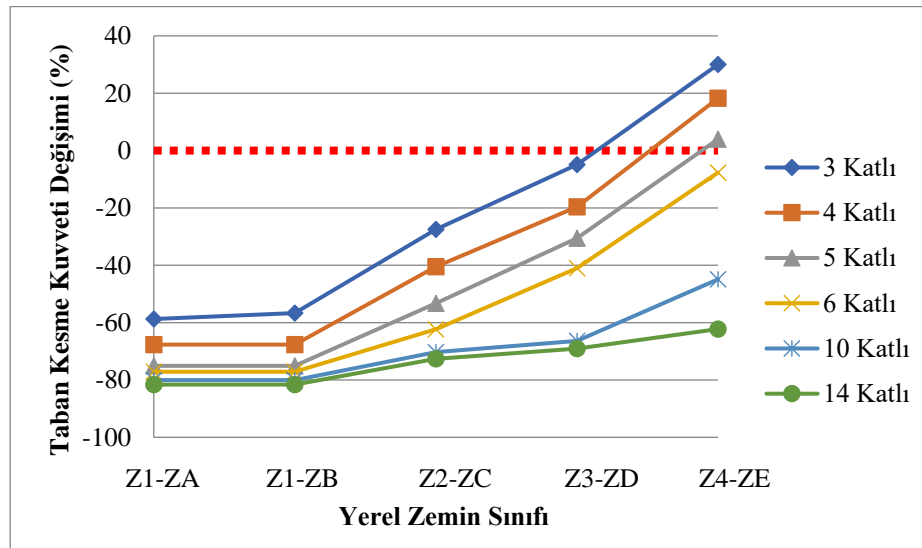
hesap edilmiştir. Tablo 3'te görüldüğü üzere, Kırıkkale-Merkez, Bahşılı, Balışeyh, Çelebi, Karakeçili ve Keskin ilçeleri hem DBYBHY-2007'ye hem de TBDY-2018'e göre eşdeğer deprem kuvvetlerinin birbirine yakın olması nedeniyle birlikte değerlendirilerek Kırıkkale-Merkez ilçesi için ve eşdeğer deprem kuvvetlerinin birbirinden farklı olması nedeniyle Delice, Yahşihan ve Sulakyurt ilçeleri için ayrı ayrı olmak üzere toplam 4 farklı ilçe merkezinde hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 5. Modellerin Kat Adedine Bağlı X-X Doğrultusundaki Birinci Doğal Titreşim Periyotları

Çalışmada kullanılan modellerin kat adedine bağlı X-X doğrultusundaki birinci doğal titreşim periyotları SAP2000 yapısal analiz programında hesaplanmış olup, her iki yönetmeliğe göre karşılaştırmalı olarak Şekil 5'te verilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, DBYBHY-2007'ye göre hesaplanan binanın birinci doğal titreşim periyodu 3, 4, 5, 6, 10 ve 14 katlı modellerde sırasıyla 0.16, 0.22, 0.28, 0.35, 0.62 ve 0.90 s iken, TBDY-2018'e göre bu periyotlar sırasıyla 0.22, 0.31, 0.41, 0.51, 0.91 ve 1.33 s bulunmuştur. TBDY-2018'e göre hesaplanan bina periyotlarının DBYBHY-2007'ye göre belirlenen periyotlardan daha büyük olduğu görülmüştür. TBDY-2018'de, deprem etkileri hesaplanırken etkin kesit rijitliği çarpanları kullanılmakta ve yük birleşimlerinde bu çarpanlar kullanılarak analizler yapılmaktadır. Taşıyıcı sistem elemanlarında azaltılmış etkin kesitleri kullanıldığından, yapının rijitliğinin azalmasına bağlı olarak taşıyıcı sistem periyodunun arttığı görülmektedir (Doğan vd., 2021).

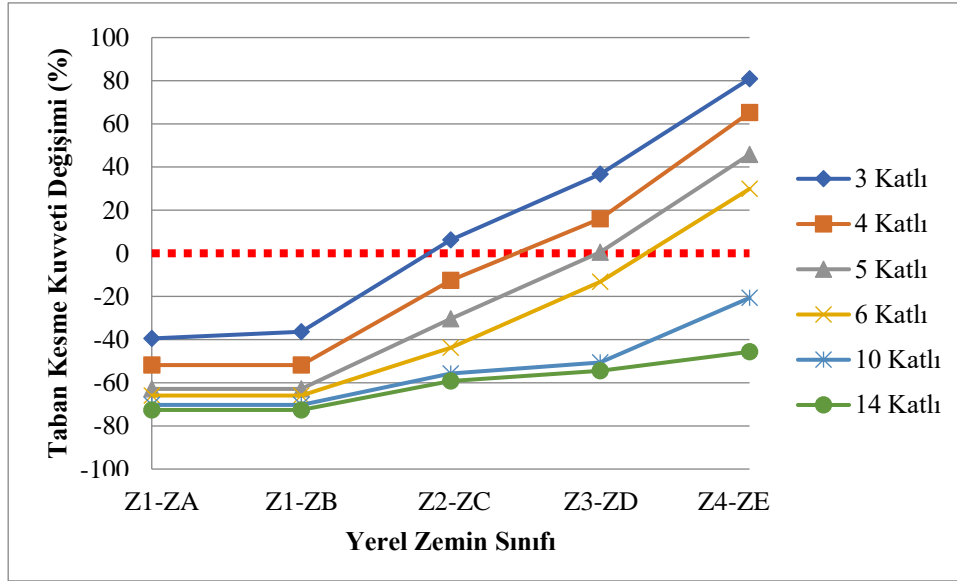
Kırıkkale ili genelinde, TDTH'de yerel deprem ivme değerleri azalmasına rağmen, binaların kat adedine ve zemin sınıflarına göre yatay elastik tasarım spektral ivme hesaplanırken, periyodun spektrum eğrisinde yatay kol üzerinde kalmasından dolayı S_{DS} katsayısının kullanılmasına ve periyodun T_B 'den büyük olmasından dolayı deprem yükü azaltma katsayısının düşmesine bağlı olarak, taban kesme kuvvetinde artışların olduğu görülmüştür. Bunun sonucu olarak da, bazı ilçe merkezlerinde DBYBHY-2007'ye göre tasarlanmış bazı konutların beklenenden farklı olarak güvensiz bölgede kaldığı ve performans analizini sağlamayan binaların güçlendirilmesi gerekebileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 6. Kırıkkale Merkezinde (Benzer Olarak Bahşılı, Balışeyh, Çelebi, Karakeçili, Keskin İlçeleri) Yerel Zemin Sınıfına Bağlı Bina Taban Kesme Kuvvetinin TBDY-2018'e Göre Değişimi (%)

Kırıkkale-Merkez ilçesi için farklı katlı modellerin DBYBHY-2007'ye kıyasla TBDY-2018'deki taban kesme kuvvetindeki değişim yüzdesi Şekil 6'da verilmiştir. Bina taban kesme kuvvetinin TBDY-2018'e göre değişim yüzdesinin, kötü zeminden Z4(ZE)'den sağlam zemine Z1(ZA) doğru gidildikçe, 6, 10 ve 14 katlı modellerde sırasıyla yaklaşık %-7'den %-77'ye, %-45'ten %-80'e ve %-62'den %-81'e azaldığı, ayrıca bu değişim yüzdesinin, Z3(ZD)'ten Z1(ZA)'e doğru gidildikçe 3, 4 ve 5 katlı modellerde de sırasıyla yaklaşık %-5'ten %-58'e, %-19'dan %-67'ye ve %-30'dan %-75'e azaldığı, diğer bir deyişle bu binaların aynı oranlarda daha güçlü tasarlandığı görülmüştür. Ancak, diğer yerel zemin sınıflarına kıyasla daha kötü olan Z4(ZE) zemin sınıfında ise 3, 4 ve 5 katlı modellerde sırasıyla yaklaşık %30, %18 ve %4 oranlarında taban kesme kuvvetlerinde artış olduğu, diğer bir deyişle bu binaların aynı değişim yüzdeleri ile depreme karşı daha yetersiz tasarlandığı görülmüştür.

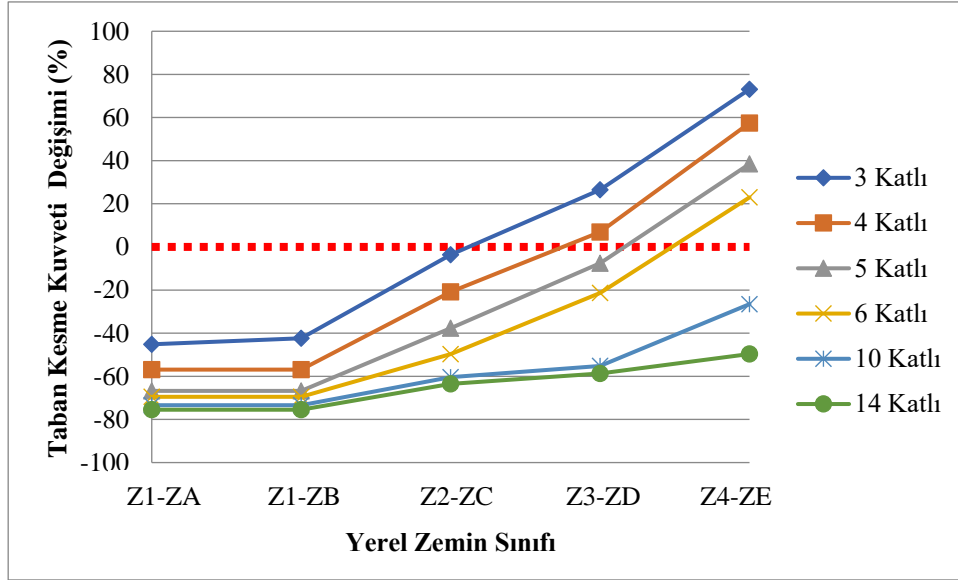
Sonuç olarak, Kırıkkale-Merkez ilçesinde (benzer olarak Bahşılı, Balışeyh, Çelebi, Karakeçili, Keskin ilçeleri) tüm yerel zemin sınıfları için 6, 10 ve 14 katlı binaların, ZA, ZB, ZC ve ZD zemin sınıfları içinse 4 ve 5 katlı binaların TBDY-2018'e göre belirlenen taban kesme kuvvetlerinde DBYBHY-2007'ye kıyasla binaları güvenli tarafta bırakacak şekilde azalma olduğu ancak, ZE zemin üzerine 3, 4 ve 5 katlı inşa edilmiş binaların deprem performans analizinin yeniden yapılması, TBDY-2018'de istenilen Can Güvenliği performans şartını sağlamayan konutların da güçlendirilmesi gerekebileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 7. Delice İlçe Merkezinde Yerel Zemin Sınıfına Bağlı Bina Taban Kesme Kuvvetinin TBDY-2018'e Göre Değişimi (%)

Delice ilçe merkezi için farklı katlı modellerin DBYBHY-2007'ye kıyasla TBDY-2018'deki taban kesme kuvvetindeki değişim yüzdesi Şekil 7'de verilmiştir. Bina taban kesme kuvvetinin TBDY-2018'e göre değişim yüzdesinin, kötü zeminden Z4(ZE)'den sağlam zemine Z1(ZA) doğru gidildikçe, 10 ve 14 katlı modellerde sırasıyla yaklaşık %-21'den %-70'e ve %-46'dan %-73'e azaldığı, ayrıca bu değişim yüzdesinin, Z3(ZD)'ten Z1(ZA)'e doğru gidildikçe 5 ve 6 katlı modellerde sırasıyla yaklaşık %0'dan %-63'e ve %-13'ten %-70'e, Z2(ZC)'den Z1(ZA)'e doğru gidildikçe 4 katlı modelde yaklaşık %-13'ten %-52'ye, Z1(ZB)'den Z1(ZA)'e doğru gidildikçe 3 katlı modelde yaklaşık %-36'dan %-39'a azaldığı, diğer bir deyişle bu binaların aynı oranlarda daha güçlü tasarlandığı görülmüştür. Ancak, diğer yerel zemin sınıflarına kıyasla daha kötü olan Z4(ZE) zemin sınıfında 3, 4, 5 ve 6 katlı modellerde sırasıyla yaklaşık %81, %65, %46 ve %30, Z3(ZD) zemin sınıfında 3 ve 4 katlı modellerde sırasıyla yaklaşık %37 ve %16, Z2(ZC) zemin sınıfında ise 3 katlı modelde yaklaşık %6 oranlarında taban kesme kuvvetlerinde artış olduğu, diğer bir deyişle bu binaların aynı değişim yüzdeleri ile depreme karşı daha yetersiz tasarlandığı görülmüştür.

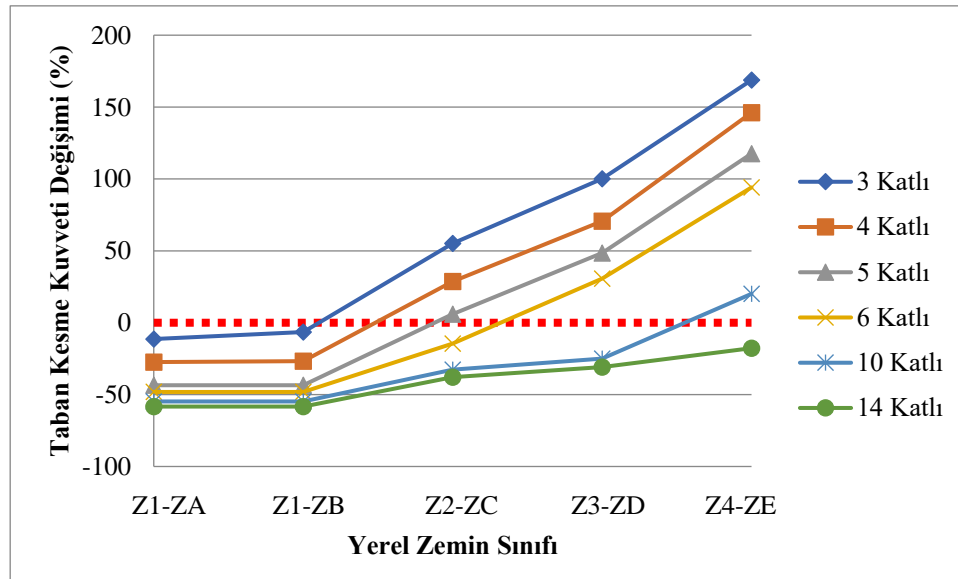
Sonuç olarak, Delice ilçe merkezinde tüm yerel zemin sınıfları için 10 ve 14 katlı, ZA, ZB, ZC ve ZD zemin sınıfları için 6 katlı, ZA, ZB ve ZC zemin sınıfları için 4 ve 5 katlı, ZA ve ZB zemin sınıfları içinse 3 katlı binaların TBDY-2018'e göre belirlenen taban kesme kuvvetlerinde DBYBHY-2007'ye kıyasla binaları güvenli tarafta bırakacak şekilde azalma olduğu ancak, ZE zemin üzerine 3, 4, 5 ve 6 katlı, ZD zemin üzerine 3, 4 katlı ve ZC zemin üzerine ise 3 katlı inşa edilmiş binaların deprem performans analizinin yeniden yapılması, TBDY-2018'de istenilen Can Güvenliği performans şartını sağlamayan konutların da güçlendirilmesi gerekebileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 8. Yahşihan İlçe Merkezinde Yerel Zemin Sınıfına Bağlı Bina Taban Kesme Kuvvetinin TBDY-2018'e Göre Değişimi (%)

Yahşihan ilçe merkezi için farklı katlı modellerin DBYBHY-2007'ye kıyasla TBDY-2018'deki taban kesme kuvvetindeki değişim yüzdesi Şekil 8'de verilmiştir. Bina taban kesme kuvvetinin TBDY-2018'e göre değişim yüzdesinin, kötü zeminden Z4(ZE)'den sağlam zemine Z1(ZA) doğru gidildikçe, 10 ve 14 katlı modellerde sırasıyla yaklaşık %-27'den %-73'e ve %-50'den %-75'e azaldığı görülmüştür. Ayrıca, bu değişim yüzdesinin, Z3(ZD)'ten Z1(ZA)'e doğru gidildikçe 5 ve 6 katlı modellerde sırasıyla yaklaşık %-8'den %-67'ye ve %-21'den %-70'e, Z2(ZC)'den Z1(ZA)'e doğru gidildikçe 3 ve 4 katlı modellerde sırasıyla yaklaşık %-4'ten %-45'e ve %-21'den %-57'ye azaldığı, diğer bir deyişle bu binaların aynı oranlarda daha güçlü tasarlandığı görülmüştür. Ancak, diğer yerel zemin sınıflarına kıyasla daha kötü olan Z4(ZE) zemin sınıfında ise 3, 4, 5 ve 6 katlı modellerde sırasıyla yaklaşık %73, %57, %38 ve %23, Z3(ZD) zemin sınıfında ise 3 ve 4 katlı modellerde sırasıyla yaklaşık %26 ve %7 oranlarında taban kesme kuvvetlerinde artış olduğu, diğer bir deyişle bu binaların aynı değişim yüzdeleri ile depreme karşı daha yetersiz tasarlandığı görülmüştür.

Sonuç olarak, Yahşihan ilçe merkezinde tüm yerel zemin sınıfları için 10 ve 14 katlı, ZA, ZB, ZC ve ZD zemin sınıfları için 5 ve 6 katlı, ZA, ZB ve ZC zemin sınıfları içinse 3 ve 4 katlı binaların TBDY-2018'e göre belirlenen taban kesme kuvvetlerinde DBYBHY-2007'ye kıyasla binaları güvenli tarafta bırakacak şekilde azalma olduğu ancak, ZE zemin üzerine 3, 4, 5, 6 katlı ve ZD zemin üzerine 3 ve 4 katlı inşa edilmiş binaların deprem performans analizinin yeniden yapılması, TBDY-2018'de istenilen Can Güvenliği performans şartını sağlamayan konutların da güçlendirilmesi gerekebileceği sonucuna varılmıştır.

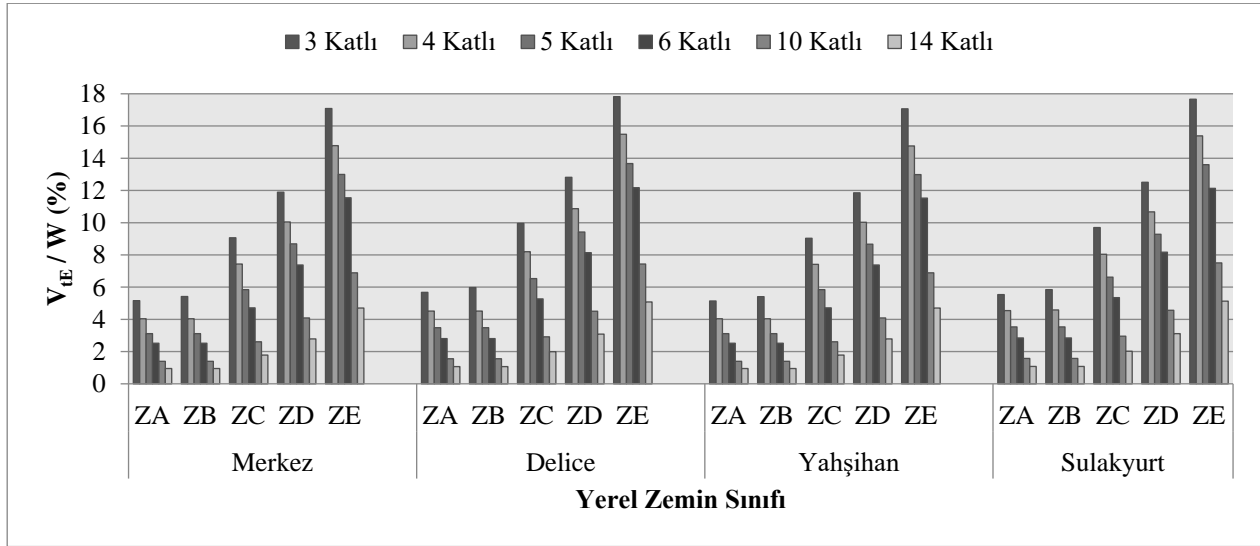


Şekil 9. Sulakyurt İlçe Merkezinde Yerel Zemin Sınıfına Bağlı Bina Taban Kesme Kuvvetinin TBDY-2018'e Göre Değişimi (%)

Sulakyurt ilçe merkezi için farklı katlı modellerin DBYBHY-2007'ye kıyasla TBDY-2018'deki taban kesme kuvvetindeki değişim yüzdesi Şekil 9'da verilmiştir. Bina taban kesme kuvvetinin TBDY-2018'e göre değişim yüzdesinin, kötü zeminden Z4(ZE)'den

sağlam zemine Z1(ZA) doğru gidildikçe, 14 katlı modelde yaklaşık %-18'den %-58'e azaldığı görülmüştür. Ayrıca, bu değişim yüzdesinin, Z3(ZD)'ten Z1(ZA)'e doğru gidildikçe 10 katlı modelde yaklaşık %-25'ten %-55'e, Z2(ZC)'den Z1(ZA)'e doğru gidildikçe 6 katlı modelde yaklaşık %-15'den %-48'e azaldığı, Z1(ZB)'den Z1(ZA)'e doğru gidildikçe 3 katlı modelde yaklaşık %-7'den %-11'e azaldığı, diğer bir deyişle bu binaların aynı oranlarda daha güçlü tasarlandığı görülmüştür. Ancak, diğer yerel zemin sınıflarına kıyasla daha kötü olan Z4(ZE) zemin sınıfında 3, 4, 5, 6 ve 10 katlı modellerde sırasıyla yaklaşık %169, %146, %118, %94 ve %20, Z3(ZD) zemin sınıfında 3, 4, 5 ve 6 katlı modellerde sırasıyla yaklaşık %100, %71, %48 ve %31, Z2(ZC) zemin sınıfında ise 3, 4 ve 5 katlı modellerde yaklaşık %55, %29 ve %6 oranlarında taban kesme kuvvetlerinde artış olduğu, diğer bir deyişle bu binaların aynı değişim yüzdeleri ile depreme karşı daha yetersiz tasarlandığı görülmüştür.

Sonuç olarak, Sulakyurt ilçe merkezinde tüm yerel zemin sınıfları için 14 katlı, ZA, ZB, ZC ve ZD zemin sınıfları için 10 katlı, ZA, ZB ve ZC zemin sınıfları için 6 katlı, ZA ve ZB zemin sınıfları içinse 3, 4 ve 5 katlı binaların TBDY-2018'e göre belirlenen taban kesme kuvvetlerinde DBYBHY-2007'ye kıyasla binaları güvenli tarafta bırakacak şekilde azalma olduğu ancak, ZE zemin üzerine 3, 4, 5, 6 ve 10 katlı, ZD zemin üzerine 3, 4, 5, 6 katlı ve ZC zemin üzerine ise 3, 4 ve 5 katlı inşa edilmiş binaların deprem performans analizinin yeniden yapılması, TBDY-2018'de istenilen Can Güvenliği performans şartını sağlamayan konutların da güçlendirilmesi gerekebileceği sonucuna varılmıştır.

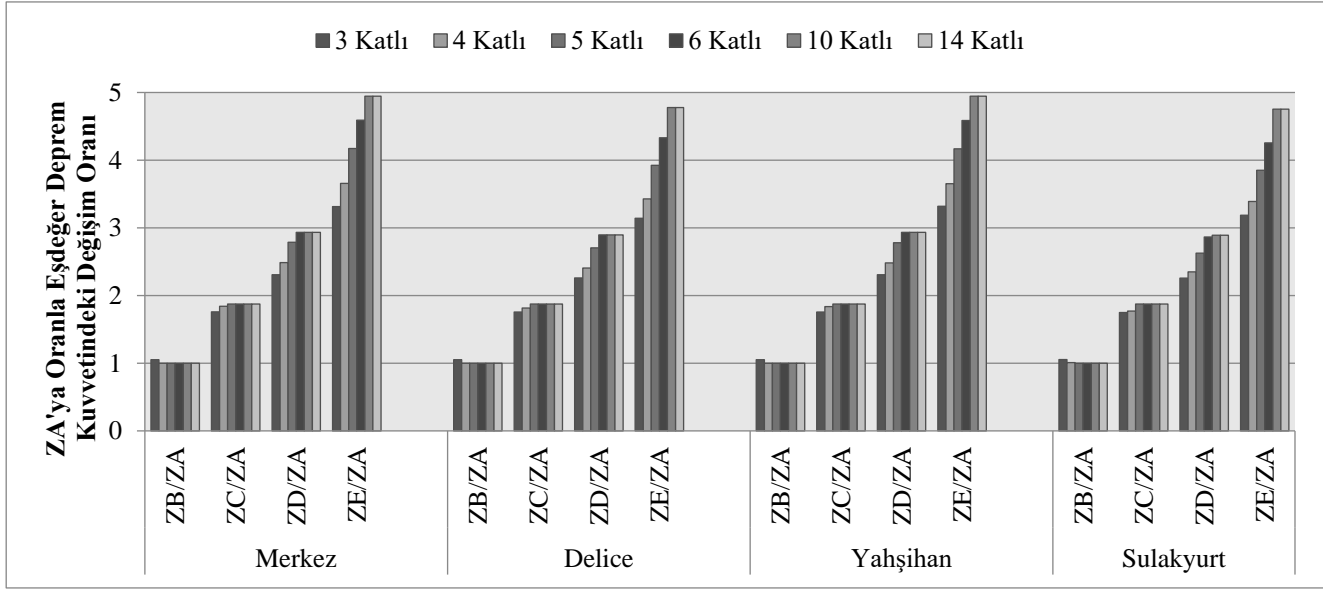


Şekil 10. Farklı Kat Adedine Sahip Modeller İçin Yerel Zemin Sınıflarına Göre İlçelerin V_{te}/W Oranları

Sonuçların sağlıklı bir şekilde yorumlanabilmesi için, hesaplar sonucunda TBDY-2018'e göre elde edilen eşdeğer deprem yükleri (V_{te}) bina ağırlıklarına (W) oranlanmış olup Kırıkkale iline bağlı Merkez, Delice, Yahşihan ve Sulakyurt ilçelerinin yerel zemin sınıflarına göre hesaplanan V_{te}/W oranları Şekil 10'da verilmiştir. Bina yüksekliği arttıkça yapının kütlesi artarken, buna bağlı olarak da taban kesme kuvvetinin de artması beklenirken bunun aksine, bina periyodundaki artışa bağlı olarak, TBDY-2018'e göre, yatay elastik tasarım spektral ivmesinin ve taban kesme kuvvetinin azaldığı görülmüştür (Şekil 10).

Merkez, Delice, Yahşihan ve Sulakyurt ilçelerinin TBDY-2018'e göre hesap edilen V_{te}/W oranlarında aynı yerel zemin sınıfları ve aynı kat adetleri için dikkate değer bir değişiklik görülmemiştir. Örneğin, ilçe merkezlerinde ZA zemine oturan 3 katlı bina için bu oranın yaklaşık %5.5 olduğu, aynı zeminde 14 katlı bina içinse bu oranın yaklaşık 5.5 katı azalarak %1'lerde olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, ilçe merkezlerinde ZE zemine oturan 3 katlı bina için bu oranın yaklaşık %17 olduğu, aynı zeminde 14 katlı bina içinse bu oranın yaklaşık 3.5 katı azalarak %5'lerde olduğu görülmektedir.

TBDY-2018'e göre hesap edilen eşdeğer deprem yüklerinin, 3, 4, 5, 6, 10 ve 14 katlı modellerde ZA yerel zemin sınıfına oranla diğer zeminler için eşdeğer deprem kuvvetindeki değişim oranları Şekil 11'de verilmiştir. Merkez, Delice, Yahşihan ve Sulakyurt ilçe merkezinin deprem yüklerinde 3 katlı model için ZA yerel zemin sınıfına oranla ZB, ZC, ZD ve ZE zemin sınıflarında sırasıyla yaklaşık 1.05, 1.75, 2.30 ve 3.20 katı artış görülmüştür. Bu artışların, 14 katlı model için yaklaşık 1.00, 1.87, 2.90 ve 4.85 katı olduğu görülmüştür. Bununla beraber, ZA yerel zemin sınıfına oranla diğer zeminler için eşdeğer deprem kuvvetinin, ZB zemin sınıfından daha kötü zemin olan ZE sınıfına gidildikçe 14 katlı modellerde yaklaşık 5 katına kadar bir artış gösterdiği, bu artışın 3 katlı modellerde ise yaklaşık 3 katı olduğu görülmüştür.



Şekil 11. Farklı Katlı Modellerde, ZA'ya Oranla Diğer Zeminler İçin Eşdeğer Deprem Kuvvetindeki Değişim Oranları

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, Kırıkkale iline bağlı Merkez, Bahşılı, Balışeyh, Çelebi, Delice, Karakeçili, Keskin, Sulakyurt ve Yahşihan olmak üzere toplam 9 adet ilçe merkezinde, ilçe merkezlerinin koordinatına göre belirlenen deprem parametreleri kullanılarak, planda simetrik, süneklik düzeyi yüksek ve betonarme çerçeveli 3, 4, 5, 6, 10 ve 14 katlı konut modellerin eşdeğer deprem yükleri, hem DBYBHY-2007'ye göre Z1, Z2, Z3 ve Z4 yerel zemin sınıfları, hem de TBDY-2018'e göre ZA, ZB, ZC, ZD ve ZE yerel zemin sınıfları için SAP2000 programı kullanılarak ayrı ayrı hesap edilmiştir.

Kırıkkale-Merkez, Bahşılı, Balışeyh, Çelebi, Karakeçili ve Keskin ilçeleri hem DBYBHY-2007'ye hem de TBDY-2018'e göre eşdeğer deprem kuvvetlerinin birbirine yakın olması nedeniyle birlikte değerlendirilerek Kırıkkale-Merkez ilçesi için ve eşdeğer deprem kuvvetlerinin birbirinden farklı olması nedeniyle Delice, Yahşihan ve Sulakyurt ilçeleri için ayrı ayrı olmak üzere toplam 4 farklı ilçe merkezinde hesaplamalar yapılmıştır.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda;

- TBDY-2018'e göre hesaplanan bina periyotlarının DBYBHY-2007'ye göre belirlenen periyottan daha büyük olduğu, TBDY-2018'de taşıyıcı sistem elemanları olan kolon ve kirişlerde etkin kesit rijitliklerinin kullanılmasından dolayı analizlerde yapı rijitliğinin daha küçük gösterildiği, buna bağlı olarak da taşıyıcı sistemlerin periyodunun büyüdüğü,
- Türkiye Deprem Tehlike Haritasına (TDTH) göre yerel deprem ivme değerleri azalmasına rağmen, bazı ilçe merkezlerinde DBYBHY-2007'ye göre tasarlanmış bazı konutların beklenenden farklı olarak güvensiz bölgede kaldığı, Kırıkkale-Merkez ilçesinde (benzer olarak Bahşılı, Balışeyh, Çelebi, Karakeçili, Keskin ilçeleri) ZE zemin üzerine inşa edilmiş 3, 4 ve 5 katlı konutların, Delice ilçesinde ZE zemin üzerine 3, 4, 5 ve 6 katlı, ZD zemin üzerine 3, 4 katlı ve ZC zemin üzerine ise 3 katlı inşa edilmiş konutların, Yahşihan ilçesinde ZE zemin üzerine 3, 4, 5, 6 katlı ve ZD zemin üzerine 3 ve 4 katlı inşa edilmiş konutların ve Sulakyurt ilçesinde ZE zemin üzerine 3, 4, 5, 6 ve 10 katlı, ZD zemin üzerine 3, 4, 5, 6 katlı ve ZC zemin üzerine ise 3, 4 ve 5 katlı inşa edilmiş konutların deprem performans analizinin yeniden yapılması, TBDY-2018'de istenilen Can Güvenliği performans şartını sağlamayan konutların da güçlendirilmesi gerekebileceği,
- Merkez, Delice, Yahşihan ve Sulakyurt ilçelerinin TBDY-2018'e göre hesap edilen eşdeğer deprem yükünün bina ağırlığına oranlarında (V_E/W) aynı yerel zemin sınıfları ve aynı kat adetleri için dikkate değer bir değişiklik olmazken, ZA zemine oturan 3 katlı bina için bu oranın yaklaşık %5.5 olduğu, aynı zeminde 14 katlı bina içinse bu oranın yaklaşık 5.5 katı azalarak %1'lerde olduğu, benzer şekilde, ZE zemine oturan 3 katlı bina için bu oranın yaklaşık %17 olduğu, aynı zeminde 14 katlı bina içinse bu oranın yaklaşık 3.5 katı azalarak %5'lerde olduğu,
- TBDY-2018'e göre hesap edilen eşdeğer deprem yüklerinin, 3 katlı model için ZA yerel zemin sınıfına oranla ZB, ZC, ZD ve ZE zemin sınıflarındaki artış oranlarının sırasıyla yaklaşık 1.05, 1.75, 2.30 ve 3.20 katı olduğu, 14 katlı model içinse sırasıyla yaklaşık 1.00, 1.87, 2.90 ve 4.85 katı olduğu, ZA yerel zemin sınıfına oranla diğer zeminler için eşdeğer deprem kuvvetinin, ZB zemin sınıfından daha kötü zemin olan ZE sınıfına gidildikçe 14 katlı modellerde yaklaşık 5 katına kadar bir artış gösterdiği, bu artışın 3 katlı modellerde ise yaklaşık 3 katı olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, bu çalışma taban kesme kuvvetinin yapının taşıyıcı elemanının boyutlandırılmasında etkili bir parametre olduğu için Kırıkkale ilinde DBYBHY 2007'ye göre yapılmış binaların TBDY-2018'e göre taşıyıcı eleman kesitlerinin genel olarak büyük seçilerek daha güçlü tasarlandığı görülmüştür. Ancak, Kırıkkale-Merkez ilçesinde (benzer olarak Bahşılı, Balışeyh, Çelebi, Karakeçili, Keskin ilçeleri) özellikle kötü zemin (ZE) üzerine inşaa edilmiş 4 kat ve altı konutların, Delice ve Yahşihan ilçe merkezlerinde özellikle ZD zemin üzerine inşaa edilmiş 4 kat ve altı konutların ve ZE zemin üzerine inşaa edilmiş 6 kat ve altı konutların, Sulakyurt ilçe merkezinde özellikle ZC zemin üzerine inşaa edilmiş 4 kat ve altı konutların, ZD zemin üzerine inşaa edilmiş 6 kat ve altı konutların ve ZE zemin üzerine inşaa edilmiş 10 kat ve altı konutların deprem performans analizinin yeniden yapılması, TBDY-2018'de istenilen Can Güvenliği performans şartını sağlamayan konutların da güçlendirilmesi gerekebileceğini göstermektedir.

Bu çalışmaya ek olarak, yenilenen TDTH'ye göre 46 ilde deprem tehlikesi düşürülen Kırıkkale iline benzer illerdeki konutlarda ve ayrıca bu illerde yer alan tüm kamu ve ticari binalarda benzer çalışmaların yapılması tamamlayıcı olacaktır.

5. Referanslar

Adar, K., Büyüksaraç, A., Işık, E., Ulu, A. E. (2021). 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Yapısal Analizler Işığında Karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 25, 306-317. doi:10.31590/ejosat.906347

AFAD. (2022). *Türkiye Deprem Tehlike Haritası, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı*, Ankara.

Aksoyly, C., Mobark, A., Arslan, M. H., Erkan, İ. H. (2020). A Comparative Study on ASCE 7-16, TBEC-2018 and TEC-2007 for Reinforced Concrete Buildings. *Revista de la Construcción*, 19 (2), 282-305. doi:10.7764/RDLC.19.2.282

Aksoyly, C., Arslan, M. H. (2021). 2007 ve 2019 Deprem Yönetmeliklerinde Betonarme Binalar İçin Yer Alan Farklı Deprem Kuvveti Hesaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması Olarak İrdelenmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 13 (2), 359-374. doi:10.29137/umagd.844186

Atmaca, N., Atmaca, A., Kılıçık, S. (2019). Comparison of 2018 and 2007 Turkish Earthquake Regulations. *The International Journal of Energy & Engineering Sciences*, 4 (2), 19-25. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/910051>

Başaran, V. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY2019) Göre Afyonkarahisar İçin Deprem Yüklerinin Değerlendirilmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18 (3), 1028-1035. doi:10.5578/fmbd.67739

Bozer, A. (2020). Tasarım Spektral İvme Katsayılarının DBYBHY 2007 ve TBDY 2018 Yönetmeliklerine Göre Karşılaştırması. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 11 (1), 393-404. doi:10.24012/dumf.559965

DBYBHY. (2007). *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.

Doğan O., Genç Y. (2019). Türk Bina Deprem Yönetmeliği'ne Göre Düşey Deprem Kuvvetinin İkinci Mertebeden Taban Momentlerine Etkisi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5 (3), 244-249. doi:10.30855/gmbd.2019.03.05

Doğan, O., Genç, Y., Odacıoğlu, O. G. (2021). Betonarme Taşıyıcı Sistemlerin Depreme Dayanıklı Tasarımında Uyumlu Perde Çerçeve Davranışı İçin Minimum Perde Oranının Belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, 1 (1). doi:10.2339/politeknik.871889

Döndüren, M. S., Hava, Ş., Ecemiş, A. S. (2021). Betonarme Bir Bina Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi İle DBYBHY 2007 ve TBDY 2018 Yönetmeliklerine Göre Analizi. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9 (2), 507-521. doi:10.36306/konjes.867309

Genç, Y. (2019). Türk ve Bazı Yabancı Deprem Yönetmeliklerine Göre Betonarme Binaların Analizinde Düşey Deprem Yük Etkilerinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale*.

Kassem, M. M., Nazri, F. M., Farsangi, E. N., Öztürk, B. (2021). Improved Vulnerability Index Methodology to Quantify Seismic Risk and Loss Assessment in Reinforced Concrete Buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 1-36. doi:10.1080/13632469.2021.1911888

Kassem, M. M., Nazri, F. M., Farsangi, E. N., Öztürk, B. (2022). Development of a uniform seismic vulnerability index framework for reinforced concrete building typology. *Journal of Building Engineering*, 47. doi:10.1016/j.job.2021.103838

Keskin, E., Bozdoğan, K. B. (2018). 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Kırıkkale İli Özelinde Değerlendirilmesi. *Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4 (1), 74-90. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/494737>

Kırıkkale. (2017). *Kırıkkale Tarım Sektörü Yatırım Rehberi*, Kırıkkale İl Gıda Tarım ve Hayvancılık Müdürlüğü, Kırıkkale.

Nemutlu, Ö. F., Sarı, A. (2018). Comparison of Turkish Earthquake Code in 2007 With Turkish Earthquake Code in 2018. International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2018), 568-576, November, Diyarbakır.

Özmen, A., Erkut, S. (2021). Deprem Etkisinde Çok Katlı Betonarme Bir Binanın TDY-2007 ve TBDY-2018 Deprem Yönetmeliklerine Göre Eşdeğer Deprem Yüklerinin Karşılaştırılması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 4 (2), 124-133. doi:10.47495/okufbed.797889

Öztürk, B. (2006). Dynamic analysis and the resulting nonlinear response of building structures located in seismically active regions in Turkey. 4th International Conference on Earthquake Engineering, 12-13 October, Taipei.

Öztürk, M. (2018). 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ve Türkiye Deprem Tehlike Haritası İle İlgili İç Anadolu Bölgesi Bazında Bir Değerlendirme. Selçuk-Teknik Dergisi, 17 (2), 31-42.

Öztürk, M., Selekoğlu, E. S., Baran, T. (2019). Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi Bakımından TBDY-2019 İle DBYBHY-2007 Kıyaslaması. International Conference on Innovation, Sustainability, Technology and Education in Civil Engineering, 1157-1166, 13-15 June, Hatay.

SAP2000. (2019). Structural Software for Analysis and Design. Computers and Structures, California-USA.

Sönmezer, Y. B., Akbaş, S. O., Işık, N. S. (2015). Kırıkkale İli Yerleşim Alanı İçin Pik İvme, Zemin Büyütme ve Hakim Titreşim Periyodu Özelliklerinin Belirlenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30 (4), 711-721. doi:10.17341/gummd.54639

Sümer, Y., Hamsici, M. (2020). Çok Katlı Betonarme Binalarda 2018 Deprem Yönetmeliği İle Tanımlanan Spektrum Eğrilerinin Etkisi. Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 8 (2), 349-354. doi:10.21541/apjes.641250

TBDY. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

TDBH. (2006). Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası. T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.

TS498. (1997). Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

TS500. (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

Tunç, G., Tanfener, T. (2016). 2007 ve 2016 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliklerinin Örneklerle Mukayesesi. 3.Ulusal Yapı Kongresi ve Sergisi Teknik Tasarım, Güvenlik ve Erişebilirlik, 1-13, 24-26 Kasım, Ankara.

TÜİK. (2021). Türkiye İstatistik Kurumu. Ankara. Retrieved from <http://www.tuik.gov.tr/>

Ünsal, İ., Öncel, F.A., Şahan, M. F. (2020). TDY 2007 ve TBDY 2018 Yönetmeliklerine Göre Yapı Yüksekliğinin Taban Kesme Kuvveti ve Tepe Deplasmanı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8 (4), 930-942. doi:10.36306/konjes.752139

URL-1. (2022). <https://www.gazetekale.com/haber-deprem-tehlike-haritasi-yenilendi-24699>, Erişim Tarihi: 06.03.2022.

URL-2. (2021). <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>, Erişim tarihi: 31.12.2021.



A Survey on Lip-Reading with Deep Learning

Ali Erbey¹ , Necaattin Barışçı² 

¹Department of Computer Programming, Distance Education Vocational School, Usak University, 64200, Usak, TURKEY

²Department of Computer Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, 06500, Ankara, TURKEY

Başvuru/Received: 22/12/2021

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Abstract

Very successful results have been obtained in areas such as computer vision and voice recognition when applying deep learning methods. Technologies that facilitate the lives of people have been developed as a result of the successes of deep learning within these areas. One of these technologies is voice recognition devices. Research has shown that these devices do not give good results in noisy environments; although, they do give good results in silent environments. With deep learning methods, voice recognition in noisy environments can be achieved using visual signals. Thanks to computerized vision, the success of voice recognition devices can be increased with the analysis of human lips in order to determine what the speaker is saying. In this study, lip-reading studies using deep learning methods published between 2017 and 2020 were examined and data sets were introduced. As a result of the study, it is seen that CNN and LSTM architectures are used more intensively in lip-reading studies, hybrid models are preferred more and the success rates are increasing day by day. In this context, it is seen that technologies that can be used in line with the need can be developed by conducting more academic studies on lip reading.

Key Words

“Lipreading, Deep Learning, Convolutional Neural Networks, Artificial Neural Networks”

1. Introduction

Technology is used to solve many modern problems in the daily lives of society. With technology, individuals have had increasingly easy and more comfortable living conditions. Technology is now used in nearly every domain including the household, health, and industry. The most current advancements in technology can be seen within technological devices. These devices have been developed over time and focus on solving problems for the user. The quality of life for individuals is enhanced, especially in regard to devices which are made for the health field. Although quality of life does include health and wellness, it can be further defined as a standard of excellence or quality in all arenas of life, over a lifetime (Doğan et al. 2016). From this point of view, the aim of technology is to increase social well-being. From this point of view, the quality of life is increased by developing solutions for negative situations in people's health with technology. People's health problems seem to increase as they age (Olgun et al. 2013). As a person ages, there is a higher probability of hearing loss, which is one of the three most common diseases observed in old age (Erdoğan, 2016). Hearing loss has major negative impacts on quality of life (Mulrow et al. 1990). People who had once had clear hearing but later in life encounter hearing loss often isolate themselves from society. It has also been shown that hearing loss among the elderly has a strong correlation with depression (Mulrow et al. 1990). Hearing loss, which can lead to isolation and depression, undoubtedly decreases the quality of life in the elderly. This decrease related to hearing loss can cause further social, emotional, and communication difficulties (Yueh et al. 2003). On the other hand, it is also known that individuals with innate hearing-impairment invariably experience these difficulties. In this context, it is imperative that new technological solutions are developed that are relevant for individuals with hearing loss.

Three current solutions which have been developed for aiding individuals with hearing loss include in-ear hearing aids, sign language recognition technology, and lip-reading. When studies concerning the effects of hearing aids on quality of life are examined, it is seen that the devices have a positive impact (Mulrow et al. 1992),(Hamurcu et al. 2012). In a study made by Hamurcu et al. in 2012, it was observed that 82% of individuals using hearing aids had seen a rise in their quality of life (Hamurcu et al. 2012). It is also known that hearing aids which make speech audible, lose their clarity—notably, in noisy environments (Gogate et al. 2020) In the study by Kahveci et al., it was concluded that the noise issues experienced while using the hearing aid devices negatively affected the satisfaction of the individuals (Kahveci et al. 2011). It can be said that sign language is a tool which facilitates communication between those who do not have hearing loss and those who have innate hearing-impairment. Sign language is useful because of its ability to provide communication within a community (Cheok et al. 2019).

The inadequacies of hearing aids led people to sign language to continue communication. Here, in order to be useful to people, systems that recognize sign language are being developed. These systems are used with existing computers, game consoles and mobile applications. Computer vision, machine learning and deep learning are used in the infrastructure of sign language recognition systems. The upper component of all these structures is artificial intelligence. The fact that it has achieved significant success these days is due to the academic studies carried out for many years.

Turing, in his work in 1950, "Can machines think?" raised the question which led to the discussion of machine intelligence (Turing, 1950). Discussions on machine intelligence began and the concept of artificial intelligence emerged just 6 years later. The concept of "artificial intelligence" was used for the first time in 1956 by John McCarthy (Russell, 2016). The concept of machine learning emerged along with the concept of artificial intelligence. Alpaydın (2020) defines machine learning as computers which have been programmed to optimize a performance criterion by using past experiences or data (Alpaydın, 2020). As a result of these optimizations, many methods of machine learning have emerged to date. Artificial neural networks (ANN), is one of the most important areas of machine learning (Ergezer et al. 2003). In 1957, Rosenblatt defined the concept of "perceptron", which forms the basis of ANN (Rosenblatt, 1957). As a result of Minsky and Papert (1969) stating that the XOR problem could not be solved with perceptron, progress in the field of artificial intelligence was disrupted for a while (Minsky & Papert, 1969). However, Rumelhart et al. (1988) proposed that Multi-Layer Perceptron (MLP) could also solve the XOR problem and the importance of ANN increased once again (Rumelhart et al. 1986). Occasionally, work in the field of artificial intelligence has been stagnate, such as the period of time when the XOR problem was unsolvable. These periods have been labelled "artificial intelligence winter", and has occurred throughout the late 1960s to the early 1970s and during the late 1980s (Bollier, 2017).

In 1998, Yann LeCun et al. used Convolutional Neural Networks (CNN) in the MNIST dataset to classify characters; as a result of their success, CNN came to the forefront of the field (LeCun et al. 1998). CNN (or ConvNet) is a specialized form of MLP—inspired by ANN—used in classification, image recognition, object recognition, and natural language processing. CNN is a form of deep learning, which is a method that has grown in popularity in recent years (Ari & Hanbay, 2019). The real breakthrough in the field of deep learning occurred in 2012. Ranking first in the ImageNet competition of that year, a research group headed by Hinton, had been able to reduce the Top-5 error rate from 25.8% (of the previous year) to 16.4% (Krizhevsky et al. 2012). With this new architecture, called AlexNet, deep learning studies earnestly resumed. Not only powerful hardware, large datasets, and large models but also the development of architectures and algorithms played an important role in increasing the progress of deep learning research (Szegedy et al. 2015). Architectures continued to emerge as new algorithms were developed; in later years, at the ImageNet competition groups such as VGGNet (Simonyan & Zisserman, 2014), GoogleNet (Szegedy et al. 2015), ResNet (He et al. 2016) persisted in gradually decreasing the error rate.

The architectures used in deep learning methods and the results that improve day by day have led many scientists to this field. With more contributions from scientists, computer vision, machine learning and deep learning have started to get very successful results in the last few decades. In this process, it is seen that significant improvements have been made especially in the field of health. Thanks to computer vision, systems are being developed to assist doctors on MRI, ultrasound and X-ray images. As these systems develop, people will be able to achieve health and improve their quality of life. Lip reading is also one of the areas that will improve the quality of life of people with hearing impairments and better results can be achieved as technological developments such as artificial intelligence continue. In this article, lip-reading studies which use deep learning methods are examined. Lip-reading is the process of understanding speech from lip movements. Due to the fact that images of the mouth region are more successfully analyzed by researchers when utilizing deep learning methods, lip-reading studies have become a subject of interest within deep learning. After 2012, the number of studies on deep learning increased and new architectures began to emerge. Lip-reading studies which have been published in recent years, include methods that use different architectures and hybrid structures with have the highest performance rate. Lip-reading research using deep learning methods, that have been conducted between 2017 and 2020, have been included in this study.

Following this introduction, ANN which is a pioneer for many technological developments and provides the basis for increased success rates—are introduced in the second section. The third section will examine deep learning architectures which are also a sub-field of machine learning and is an additional reason why this study was conducted. Lip-reading will be discussed in the fourth section while different datasets will be reviewed in the fifth section. In the final section, lip-reading studies using deep learning architectures are presented.

2. Artificial Neural Networks

ANN are structures that are created by modelling the human brain and how it utilizes its connections, which allow us to process information in tandem or sporadically (Uğur & Kınacı, 2006). Each individual structure such as neurons and dendrites existing in the human brain have its counterpart in ANN.

McCulloch and Pitts conducted the first study on ANN in 1943 (McCulloch & Pitts, 1943). This study has been used in many different areas and this subject has developed substantially since its first conception. ANN is used frequently in fields such as voice recognition, optical character recognition, robot controls, image processing, and face recognition (Ergezer et al. 2003). Artificial neural networks have achieved very successful results in these areas. In the following years, deep learning architectures were created by increasing the number of layers in artificial neural networks.

3. Deep Learning

The widespread use of the Internet has led to the frequent use of social media and the production of data—such as photographs, videos, text sharing, and internet records—which has led to the creation of datasets called “big data” (Ertam & Aydın, 2017). Artificial Intelligence studies have gained momentum in obtaining sufficient data through big data and increasing computing power parallel to GPUs. Computing power has enabled more data layers to be employed in ANN. With the addition of such numerous layers, deep learning methods have emerged.

Deep learning falls under the category of machine learning, which falls under the field of artificial intelligence. Unlike machine learning, deep learning performs feature extraction processes within its data layers. In Figure 1, machine learning and deep learning are shown.

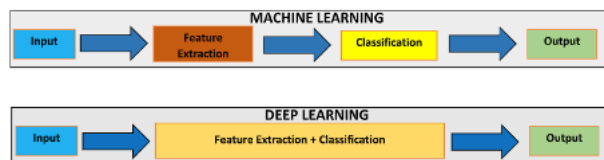


Figure 1. Machine learning and deep learning (Amanullah et al. 2020)

As seen above, the fact that deep learning is not overly involved with feature extraction is a major factor in its increase in popularity. Another factor is that it allows multiple applications to be feasible. Deep learning can easily perform applications such as classification, regression, segmentation, transfer learning, and adaptation. In these applications, different deep learning architectures are used. Architectures frequently used in deep learning include Recurrent Neural Networks (RNN), Convolutional Neural Networks (CNN), Long-Short Term Memory (LSTM), and Deep Belief Networks (DBN).

3.1. Recurrent Neural Network

RNN, originally introduced by Hopfield in 1984 (Hopfield, 1984) is an ANN class in which connections between units form a unified directional loop (Pang et al. 2020). As opposed to Forward Networks, where inputs are not dependent on previous input, RNN evaluates inputs not only instantaneously but also based on previous inputs. Thus, a temporal structure is formed dynamically in the network. The temporal structure is updated according to the values of the new state and of past states (Bacciu et al. 2020). Thanks to this structure, RNN is capable of understanding the structure of multiple data such as text, speech, and various sensors depending on time or statistical data.

3.2. Convolutional Neural Network

Looking at multiple definitions of CNN, it is emphasized that it is a deep learning tool (Yang et al. 2020) for image analysis as well as a feed forward ANN class (Sam et al. 2019) for analysing visual images in machine learning. With these definitions, CNN is a deep feed forward neural network class. CNN was first introduced in 1998 by LeCun and his team (LeCun et al. 1998). After this date, it has been widely used in image processing studies. In a network within CNN, an input image is taken and the image is classified into certain categories. It performs these operations on the matrix which allows the computers to see the image. Throughout these operations, matrices are subjected to a series of convolution processes. Thanks to the convolution process, qualitative features in the image appear, such as sharp edges and corners. This is done by using filters such as 3 x 3, 5 x 5, or 7 x 7 (UNIT) on the image. A basic CNN structure consists of convolution, activation, pooling, and fully connected layers.

3.3. Long-Short Term Memory

LSTM is an RNN structure which models time sequences more accurately than traditional a RNN (Sak et al. 2014). LSTM is a special class of RNN structures (Pang et al. 2020); it is often used for time series tasks (Chen et al. 2020). LSTM was developed by Hochreiter and Schmidhuber in 1997 to edit the vanishing gradient problem in RNN (Hochreiter & Schmidhuber, 1997). By adding a gate to the cell, they increased the capacity of the standard cell (Yu et al. 2020).

3.4. Deep Belief Networks

DBN is a component of Restricted Boltzmann Machines (RBM) that use Gibbs sampling to train parameters (Farsal et al. 2018). Within RBM that use a single hidden layer, it was not easy to capture hidden properties of data (Chen et al. 2015). Therefore, DBN was created with a probability model, which was added to the stack, for multiple restricted Boltzmann machines (Lv & Qiao, 2020). DBN has a strong structure thanks to its layered learning method whereby it reconstructs both learning-capable vectors and input vectors (Saif et al. 2018). DBN has many characteristics such as feature extraction and classification which are applied in image processing and speaking (Keyvanrad & Homayounpour, 2014).

4. Lip-Reading

Image processing, which is used in many fields, has been applied with deep learning methods in recent years. This process has been a helpful tool—especially in the medical field—because it not only assists in understanding the genetics of diseases but also recommends to doctors correct diagnosis and treatment methods (Esteva et al. 2019). It is widely used in autonomous car technologies, which is the way of car technology today (Fayjie et al. 2018). It is also seen in systems such as face and voice recognition, license plate recognition (Bayram, 2020), and fingerprint readers (Akmese et al. 2019).

Lip-reading problems are issues that can be solved with image processing. In the earliest studies on lip-reading, the region of interest (ROI) was extracted and attempts were made to develop speech defining models (Dupont & Luetin, 2000; Potamianos et al. 2004; Matthews et al. 2002). Moreover, when we look at studies that came later, it is clear that machine learning and deep learning methods were used. CNN and LSTM architectures in particular are principally used in lip-reading research associated with deep learning methods.

Lip-reading is a way for visual and audio signals to support the understanding of a speaker. Lip-reading studies utilizing deep learning methods, which have been conducted with in recent years, are examined in this article. These include surveys conducted by Potamianos et al. in 2004 (Potamianos et al. 2004) Zhou et al. in 2014 (Zhou et al. 2014), and Fernandaz and Sukno in 2018 (Fernandez-Lopez & Sukno, 2018).

For deep learning architectures, it is essential that there is a sufficient amount of data and that it can be interpreted. The success of deep learning architectures is affected by the amount of data within a dataset, the difference that are able to reflect the real world, and the fact that the data is clear and understandable. In order to compare the success of architectures, it is observed that certain datasets are used more often in some subjects, similar to the ImageNet datasets that were used in the image recognition competition described earlier. Similarly, it is seen that certain datasets are used more in lip-reading research.

5. Datasets

In lip-reading studies, it has been noted that some research uses its own datasets, albeit a small number (Lu & Yan, 2020; Goh et al. 2019). Generally, studies are conducted on commonly used datasets (Petridis et al. 2020; Mesbah et al. 2019), known to be OuluVS2 (Anina et al. 2015), AvLetters (Matthews et al. 2002) and GRID. The datasets examined in this section are the most used datasets in the articles reviewed in this study. These datasets differ in content and quality. The content, that can be seen in the datasets, consists of videos in which letters, numbers, or sentences are spoken out loud. In terms of quality, the resolution of the videos and the number of frames per second (fps) are revealed.

5.1. AvLetters2

The AvLetters2 dataset was created by Cox et al. in 2008 (Cox et al. 2008). In order to increase image resolution and number of repetitions, from what was seen in the AvLetters dataset, the videos for AvLetters2 were recorded at 50 fps at a 1920 x 1080 px resolution. Additionally, the speakers were required to make 3 to 7 repetitions of the 26 letters of the English alphabet (Fernandez-Lopez & Sukno, 2018). The videos were taken in one session to avoid any illumination differences and also recorded at an anterior view (Cox et al. 2008). The AvLetters2 dataset has 28 videos, all between 47 and 58 seconds long—producing between 1169 to 1499 frames each. Since single letters were included, it contributed to the controlled experiments (Bear & Harvey, 2017).

5.2. OuluVS2

In this dataset, 52 speakers were required to repeat a series of numbers 10 times; the series includes 10 numbers such as 1, 7, 3, 5, 1, 6, 2, 6, 6, 7. The videos in the dataset have been clipped to display only the mouth region and were shot from different angles (Anina et al. 2015) exhibited in Figure 2.



Figure 2. OuluVS2 dataset video frames (Mesbah et al. 2019)

5.3. LRW

In 2016, Oxford-BBC published the LRW dataset, including 500 different words, each spoken up to 1000 times by multiple speakers. Contained within, is metadata which includes location and time information of the words (Chung & Zisserman, 2016). The LRW dataset is challenging in that it contains a large amount of words set close together and from different word classes (Zhao et al. 2020). Frames can be seen below, in Figure 3.



Figure 3. LRW dataset video frames (Stafylakis & Tzimiropoulos, 2017)

5.4. GRID

The GRID dataset consists of 34 speakers who were required to say 1,000 sentences each. Approximately 34,000 pieces of data (34*1,000) were obtained and the speakers were recorded from an anterior view (Cooke et al. 2006). Out of the 34 speakers, 18 are male and 16 are female. Each sentence consists of a 6-word string: command, colour, preposition, letter, number, adverb. "Put Red at G Nine Now", is an example of this sentence structure. The videos are each 3 seconds long and have a frame rate of 25 fps (with a total of 75 frames each) (Qu et al. 2019), making the total length 28 hours. The dataset contains a total of 51 different words; however, the letter W was excluded due to its difficult pronunciation compared to other letters (Wand et al. 2016).

5.5. Cuave

This dataset was presented by Patterson et al. in 2002 (Patterson et al. 2002). Its videos are 29.97 fps with a 720 x 480 px resolution. More than 7,000 pieces of data were collected from 37 different speakers (Patterson et al. 2002).

The CUAVE dataset consists of both digits and numbers. The speakers (17 women and 19 men) were recorded in front of a green background and no special visual aid for face or lip segmentation was used. Obvious erroneous data was removed during recording; however, pauses and speech errors were preserved for realistic test purposes (Patterson et al. 2002).

5.6. MIRACL-VC1

This dataset includes 15 speakers repeating 10 words, 10 different times; forming a total of 1,500 words (15*10*10). The dataset was recorded at a 640 x 480 px resolution under good lighting (Rekiket al. 2014). Words from the MIRACL-VC1 dataset are shown in Table 1.

Table 1. MIRACL-VC1 dataset words (Sindhura et al. 2018)

No	Word
1	Begin
2	Choose
3	Connection
4	Navigation
5	Next
6	Previous
7	Start
8	Stop
9	Hello
10	Web

Aside from the words seen in Table 1, there were also phrases such as “Nice to meet you” and “I love this game”. A Kinect camera was set one meter away from the speakers in order to record depth maps in the dataset (Rekik et al. 2014).

5.7. LRW-1000

With 57 hours of video, this dataset consists of 1,000 classes/sentences in total. It was created with speakers who have a Mandarin dialect. There are over 70,000 data points within this dataset, which was not prepared in any specific format in order to avoid difficulties encountered during practical applications (Yang et al. 2019).

6. Lip-Reading Through Deep Learning

With the continuous development of technology, ease of use for deep learning architectures increases; these architectures differ from time to time in practice. In this study, lip-reading studies using deep learning architectures between 2017-2020 were examined. It is aimed to reach the maximum number of articles by scanning the obtained articles in various databases. Although the reviewed articles are generally on English lip-reading studies, no language restrictions were imposed. The keywords selected while scanning the articles were determined as lip reading, visual speech decoding, and audio-visual speech recognition. The articles reached by using these keywords are shown in Table 2.

Table 2. The performance values obtained from the algorithm as a result of test processes.

Year	Source	Architecture	Dataset	Accuracy (%)
2020	Xu et al. (Xu et al. 2020)	EleAtt-GRU	LRS3-TED	77.5
			LRW	84.8
2020	Lu et al. (Lu & Yan, 2020)	CNN, BiLSTM	Own	
2020	Petridis et al. (Petridis et al. 2020)	BiLSTM	OuluVS2	95.6
			CUAVE	88.4
			AvLetters	69.2
			AvLetters2	42.6
2020	Mamatha et al. (Mamatha et al. 2020)	LSTM - CNN	LRW	88.2
2020	Martinez et al. (Martinez et al. 2020)	DenseNet (conv) + resBi + LSTM	LRW	
			LRW1000	
2020	Chen et al. (Chen et al. 2020)	3DCNN, DenseNET	LRW1000	
2020	Xiao et al. (Xiao et al. 2020)	DFNN	LRW	84.13
			LRW1000	41.3
2020	Adeel et al. (Adeel et al. 2020)		ChiME3	
			GRID	

Table 2 (continued). The performance values obtained from the algorithm as a result of test processes.

Year	Source	Architecture	Dataset	Accuracy (%)
2019	Mesbah et al. (Mesbah et al. 2019)	CNN	AvLetters OuluVS2 LRW	58.02
2019	Goh et al. (Goh et al. 2019)	RNN	Own	89
2019	Zhou et al. (Zhou et al. 2019)	Seq2seq	Own	
2019	Jang et al. (Jang et al. 2019)	CFI + QVGG + Committee	OuluVS2	90.90
2019	Li et al. (Li et al. 2019)	RNN	GRID	83.83
2019	Oliveira et al. (Oliveira et al. 2019)	CNN	GRID AVICAR OuluVS2	
2019	Muljono et al. (Muljono et al. 2019)			
2019	Bi et al. (Bi et al. 2019)	CNN + E3D-LSTM	LRW-1000	38.96
2019	Ozcan and Basturk (Ozcan & Basturk, 2019)	CNN	AvLetters	54.62
2018	Kumar et al. (Kumar et al. 2018)	STCNN + BiGRU	OuluVS2	
2018	Koumparoulis and Potamianos (Koumparoulis & Potamianos, 2018)	CNN	OuluVS2	86.39
2018	Xu et al. (Xu et al. 2018)	3D-CNN + Highway + Bi-GRU	GRID	97.10
2018	Wand et al. (Wand et al. 2018)	Feed – Forward + LSTM	GRID	
2018	Petridis et al. (Petridis et al. 2018)	AutoEncoder + BiLSTM	Av Digits	69.70
2018	Petridis et al. (Petridis et al. 2017)	3D-CNN + BiGRU	LRW	82.00
2018	Fung and Mak (Fung & Mak, 2018)	3D-CNN + BiLSTM	OuluVS2	87.60
2018	Afouras et al. (Afouras et al. 2018)	3D-CNN + BiLSTM	LRS	50.00
2017	Feng et al.	CNN + LSTM + RNN	AvLetters	57.70
2017	Wand and Schmidhuber (Wand & Schmidhuber, 2017)	Feed – forward + LSTM	GRID	42.40
2017	Thangthai et al. (Thangthai et al. 2018)	Eigenlips + DNN-HMM	TCD – TIMIT	42.97
2017	Thangthai and Harvey (Thangthai & Harvey, 2017)	PCA + LDA + MLLT + DNN-HMM	TCD – TIMIT	43.61
2017	Sui et al. (Sui et al. 2017)	CHAVF + SVM	OuluVS	68.90
2017	Stafylakis and Tzimiropoulos (Stafylakis & Tzimiropoulos, 2017)	3D-CNN + BiLSTM	LRW	83.00
2017	Rahmani and Almasganj (Rahmani & Almasganj, 2017)	DBNF + DNN-HMM	CUAVE	64.90
2017	Petridis et al. (Petridis et al. 2017)	Autoencoder + LSTM	OuluVS2	94.70
2017	Petridis et al. (Petridis et al. 2018)	Autoencoder + LSTM	OuluVS2	91.80
2017	Petridis et al. (Petridis et al. 2017)	Autoencoder + LSTM	OuluVS2	84.50
2017	Fernandez – Lopez and Sukno (Fernandez-Lopez & Sukno, 2017)	DCT + SIFT + LDA	VLRf	23.00
2017	Fernandez – Lopez et al. (Fernandez-Lopez et al. 2017)	DCT + SIFT + LDA	AVICAR	20.00
2017	Chung et al. (Chung et al. 2017)	CNN + LSTM	LRW GRID LRS	76.20 97.00 49.80
2017	Chung and Zisserman (Chung et al. 2017)	CNN + LSTM	OuluVS2 MV-LRS	91.10 43.60

As seen in Table 2, the architectures used in lip reading research and the datasets in which these architectures were applied are given.

In 2020, Xu et al. used the Pseudo-3D Residual Network (P3D) instead of using 3D-CNN or 2D-ResNet for a more accurate detection of the mouth region, recorded from the anterior view. They suggested that the P3D network is better at obtaining spatial-temporal properties within videos. They achieved the highest success on the LRS3-TED (Afouras et al. 2018) and LRW datasets with their

proposed method. The LRW dataset is commonly used in lip-reading studies. The P3D study achieved an 84.8% success rate—the highest that has been achieved among studies with the LRW dataset (Xu et al. 2020).

Lu and Yan (2017) developed a hybrid model using CNN and Bidirectional Long-Short Term Memory (BiLSTM). The model was originally trained with CNN, visual features were extracted, and BiLSTM was used to evaluate sequential features among the video frames. This dataset includes 3 male and 3 female speakers; they were required to say the numbers between 0 and 9, in English. For classification accuracy, the Softmax function was chosen and produced an 85.7% accuracy rate. With the model they developed, they achieved better performance than traditional methods including the Hidden Markov Model (HMM) and the Active Contour Model (ACM) (Lu & Yan, 2020).

In 2020, Petridis et al. reached the highest rates of improvement in the datasets OuluVS2, CUAVE, AvLetters, and AvLetters2 at 0.6%; 3.4%; 3.9%; and 11.4%, respectively. The structure they created takes input from two streams; in one of the streams, the original and the differentiated inputs are taken. BiLSTM was used in both streams and when the streams were combined, BiLSTM was used again. The Softmax function was then applied to classify the outputs (Petridis et al. 2020).

Mamatha et al. used the LRW dataset in their 2020 study. They aimed to develop an application that converts movements of the mouth region into text for hearing-impaired individuals with the use of smartphone cameras. For this purpose, they designed an architecture connected to VGG19 by using CNN and LSTM together. The model they presented had an 88.2% accuracy rate, which is 3.3% higher than the success rate of CNN-RNN architecture (Mamatha et al. 2020).

In 2020, Martinez et al. achieved some of the largest successes in recent studies by making improvements on both the Residual Network (ResNet) and the Bidirectional Gated Recurrent Unit (BiGRU). They developed BiGRU with Temporal Convolutional Networks (TCN) and simplified the training phase of the model. When they tested the model in the LRW and the LRW-1000 datasets, they achieved success rates of 1.2% and 3.2%, respectively (Martinez et al. 2020).

Chen et al. (2020) used the LipNet and ResNet architectures in their study with the LRW-1000 dataset and produced improvements of 13.91% and 4.68%, respectively. Since the LRW-1000 dataset consists of sentences in the Mandarin dialect, the architecture was applied on the Chinese language. The network they created consists of two steps using 3D-CNN, DenseNet, 2D resBiLSTM, and a transform structure (Chen et al. 2020).

In 2020, Xiao et al. published their work on the LRW and LRW-1000 datasets, which achieved a high rate of success. In the study, they proposed a Deformation Flow Based Two-Stream Network (DFTN) to capture facial movements in videos. They performed self-supervised learning without the need for tagged data. In their models, they used both raw inputs and corrupted inputs. They used resNet-18 on the front layers and GRU on the back layers, while a 3-step method was used in the training phase. The Adam optimization algorithm was used with its default values and was reduced by half when the model converged; thus, reducing the problem of over-fitting. With this model, they reached an accuracy rate of 84.13% for LRW and 41.3% for LRW-1000 (Xiao et al. 2020).

The study conducted by Zhao et al. in 2020, utilized the datasets LRW, LRW-1000, LRS2, and LRS3. While creating their model, 3D-CNN and ResNet-18 were used on the front layers and BiGRU on the back layers. In this study, they proposed a new architecture in which the training phase of the model was easier. With their work, success was attained in LRW and LRW-1000 datasets (Zhao et al. 2020).

Luo et al. (2020) addressed lip-reading problems as a sequence to sequence issue (seq2seq). Thus, they aimed to convert speech sequences into a text sequence. They proposed a new evolutionary model for the two problems faced by the string-to-string method. When comparing the proposed model to other datasets, significant improvements were achieved. The accuracy rate of 83.5% for the LRW dataset and 38.70% for the LRW-1000 dataset was realized. For the GRID dataset, 11.2% word error rate was reached (Luo et al. 2020).

Feng et al. (2017) have proposed a Multimodal Recurrent Neural Networks (Multimodal RNN). They used LSTM and RNN for voice and CNN, LSTM, and RNN for lip-reading. They used AvLetters as the dataset and achieved a 57.7% success rate (Feng et al. 2017).

Mesbah et al., in 2019, introduced the Hahn Convolutional Neural Network (HCNN); a new architecture for lip-reading. They used Hahn moments—a mathematical method—in their architecture as the first steps within the CNN. The Hahn moments are an orthogonal moment set, based on Hahn polynomials which are defined on the image coordinate area. With the proposed architecture, HCNN has been shown to reduce video dimensions and training time. They tested the model in the AvLetters, OuluVS2, and LRW datasets that contain letters, numbers, and video images. A 20% improvement was achieved in the AvLetters dataset and better results were obtained

from the OuluVS2 dataset than both GoogleNet and SyncNet. Architectures provide important solutions by occasionally removing basic and even useful features to ensure the effective classification of an image (Mesbah et al. 2019). In this study, the HCNN architecture was applied on the most commonly used datasets. The OuluVS2 dataset has been used more frequently in recent years. The usage rates of different datasets are shown in Figure 4.

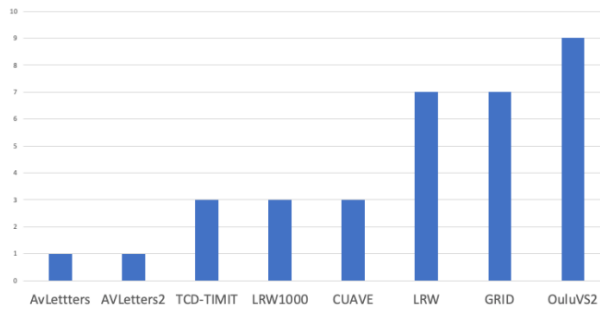


Figure 4. Usage rates of multiple datasets

Based on the commonly used datasets in Figure 4, the OuluVS2 dataset contains numbers, sentences, and expressions; the GRID dataset contains expressions; the LRW dataset contains words; and the CUAVE dataset contains numbers. The datasets can contain one of the sets (sentences, words, digits, expressions, or letters) (Matthews et al. 2002; Chung & Zisserman, 2016; Patterson et al. 2002) or multiple sets (Anina et al. 2015; Petridis et al. 2018). Table 3 delineates the content density of the datasets.

Table 3. Content table of dataset

	AvLettters	AVLetters2	TCD-TIMIT	CUAVE	LRW	GRID	OuluVS2
Sentence			1				1
Word					1		
Digit				1			1
Phrase						1	1
Letter	1	1					

When studies conducted in previous years are examined, it is seen that a Kinect camera is used for depth perception in datasets and research (Rekik et al. 2014; Yargıç & Doğan 2013; Wang et al. 2015). Equally as important as the perception of depth, the angle from which the image is captured is crucial for lip-reading. In 2012, Lan et al. pointed out that lip-reading studies usually include faces from an anterior view. Lip-reading experts stated that their preference when lip-reading is not in fact, an anterior view, but an angular view. Based on this incongruity, the researchers seek answers to two questions. First, is the anterior or the angular view more advantageous for the computer; second, from which angles can a computer still define words independently. From this perspective, they simultaneously recorded a speaker from 5 different angles. They used the LiLIR dataset, which contains images from 0, 90, 30, 45, and 60 degree angles. They concluded that lip-reading is actually easier from different angles than an anterior view. The study concluded that lips provide more information from side angles (Lan et al. 2012).

For studies conducted in the English language, Wand et al. (2016) emphasized that the pronunciation of some letters is extremely close to others. According to this study, the letters 'p' and 'b' have a similar letter structure as well as little recognizable distinctions (Wand et al. 2016). Although it is seen that the majority of research is in English, there are also studies in other languages such as Chinese (Martinez et al 2020; Chen et al. 2020; Xiao et al. 2020), Malay (Fook et al. 2012), Spanish (Fernandez-Lopez & Sukno, 2017) and Turkish (Yargıç & Doğan, 2013).

In 2013, Yargıç and Doğan created a Turkish dataset with a Kinect camera. Table 4 shows the words found in the dataset along with their English translation.

When creating this dataset, the Kinect camera was positioned 90 cm away from the speaker. The 10 volunteers were required to repeat these 15 words, 5 times. Thus, there is a total of 750 videos (10*15*5) in this dataset. By utilizing the Manhattan Distance, the researchers classified the data using the k-nearest neighbors classifier with the Manhattan and Euclidean Distance and found the best result as 77.8% (Yargıç & Doğan, 2013).

Table 4. Content word set of the dataset (Yargıç & Doğan, 2013)

Turkish	English
Beyaz	White
Bordo	Burgundy
Gri	Gray
Kahverengi	Brown
Kırmızı	Red
Lacivert	Navy blue
Mavi	Blue
Menekşe	Violet
Mor	Purple
Pembe	Pink
Sarı	Yellow
Siyah	Black
Turkuaz	Turquoise
Turuncu	Orange
Yeşil	Green

In the studies examined, it is seen that there are many studies using OuluVs data. In these studies, it is seen that the success is low when models such as CNN are used alone (Koumparoulis & Potamianos, 2018). It is observed that success increases when hybrid models are preferred instead of stand-alone studies (Jang et al. 2019, Petridis et al. 2017, Chung et al. 2017). For the GRID dataset, 7 studies were examined. When examined in these studies, the study in which CNN – LSTM architecture is used stands out with its success rate (Chung et al. 2017). It is seen that the architecture used alone (Wand & Schmidhuber, 2017) has bad results as in the OuluVs dataset (Koumparoulis & Potamianos, 2018). It is seen that hybrid models have a high success rate in the GRID dataset (Chung et al. 2017, Xu et al. 2018). In this context, it is seen that hybrid models give more successful results. In challenging datasets such as the LRW1000 dataset, it is seen to be low in hybrid models (Bi et al. 2019, Xiao et al. 2020). Real-life data sets are more challenging than other data sets. Better architectures need to be developed on these data sets.

In the studies, it was observed that no significant improvements were observed in the datasets using the 3DCNN architecture in hybrid models. The success rate in architecture using CNN – LSTM on the LRS dataset (Chung et al. 2017) is 49.80, while the success rate in architecture using 3D-CNN + BiLSTM (Afouras et al. 2018) is 50.00%. While the success rate is 91.10% in the CNN – LSTM architecture used on another data set OuluVS2, the success rate is 87.60% in the architecture using 3D-CNN + BiLSTM (Fung & Mak, 2018). In this context, it cannot be said that the 3DCNN architecture, which enables to use the spatio-temporal structure for lip-reading studies, will always increase success.

In recent years, it has been observed that there has been a tendency to LRW, LRW1000 datasets, which are more challenging datasets in recent years (Martinez et al. 2020, Chen et al. 2020, Xu et al. 2020). It is seen that the success rates in previous datasets have now reached very high levels (Xu et al. 2018, Chung et al. 2017, Petridis et al. 2017). In this context, it can be said that academic studies on lip reading are progressing to develop new technologies that can be adapted to real life.

7. Conclusion

In deep learning studies, utilizing different optimizations, hybrid structures, and new methods—machines are approaching human capabilities in lip-reading. As a result of these developments, there are also some specific situations where machines have surpassed human abilities. While it is widely acknowledged that it takes many years to become an expert in any subject, machines can easily achieve similar levels as long as they are provided with good data and good models.

Lip-reading is a subject that can be specialized in as a result of many years of experience. This expertise, which is based entirely on visual perception, provides benefits to the hearing impaired and could be used in other various fields as machines continue to advance. The study of lip-reading can also improve the results of voice recognition devices.

In this article, research conducted between 2017 to 2020 on lip-reading through deep learning methods were examined and information about the methods and datasets used was presented. Apart from deep learning methods, it has been seen in recent years that research has also been carried out with traditional models in the Hidden Markov Model (HMM) (Bear & Harvey, 2017).

Recently, the preference for lip-reading research has been methods based on CNN and LSTM architectures. These methods, which have a high contribution to success rate including RNN and LSTM, are used in studies which emphasize that lip-reading should be

evaluated with the use of time series methods. The emergence of hybrid methods led to the differentiation of research. The variety of hybrid architectures increased as a result of numerous deep learning studies. While architectures grow in diversity, costs must also be taken into consideration. In light of the studies examined, it was noted that CNN and LSTM were used intensively in hybrid structures in the past few years; however, it became clear that this trend has shifted towards 3D-CNN and BiLSTM in more recent years. It cannot be said that the 3DCNN architecture, which enables to use the spatio-temporal structure in the context of studies, will always increase success. Again, in the studies examined, it is seen that there is a tendency towards datasets in which examples from the real world are formed in recent years, and it is seen that hybrid studies are intensified on these datasets. It is seen that the data set presenting real-world sections for new lip reading studies will contribute more to the literature. Hybrid models and high achievements can pave the way for technological tools that will be beneficial to human life.

With an increase in the costs of new architectures, difficulties may occur in real-time studies. Lip-reading in real-time can increase its functionality for those who rely on it as a form of communication. Therefore, real-time results can be improved with hybrid structures that are used with deep learning techniques such as Yolo. Combining lip-reading and voice recognition techniques in real-time could also greatly advance human-computer interactions.

While issues such as determining the movements of the mouth region were primarily important in early lip-reading studies, the issue concerning current researchers today is the recognition of speech. Problems such as mouth region detection are now largely overcome in computer vision studies. Yet, it is seen that some letters and words cause difficulties during the definition of speech. As soon as those words and letters are used, lip movements cannot be detected and the sequence is distorted. By conducting a separate study for difficult words and letters, movement, speed, and sound bursts can be analysed. There are also research that demonstrate how the emotional state is related to the verbal expression of the speaker. Hybrid studies could be created where emotional states are taken into account.

In the studies examined, compared to the datasets that have been created, datasets should contain more samples as well as including samples from real-life situations. More specifically, the datasets which were created in front of a green screen and those created only displaying the mouth region are far from what would be encountered in daily life. The correct determination of the mouth region is the first stage of study and is very successful when frames are without complexity. However, in complex frames, algorithms that can correctly detect the mouth region could be improved and real-life difficulties could be overcome.

Currently, the majority of lip-reading studies have been conducted in the English language, while studies in the Turkish language are limited. These English studies cannot be directly applied to Turkish due to their linguistic differences and structures. It is recommended that Turkish-specific lip-reading studies with voice recognition be conducted. There is a need for lip-reading techniques—in the Turkish language—to be studied academically.

Referanslar

Adeel, A., Gogate, M., & Hussain, A. (2020). Contextual deep learning-based audio-visual switching for speech enhancement in real-world environments. *Information Fusion*, 59, 163-170.

Afouras, T., Chung, J. S., & Zisserman, A. (2018). Deep lip reading: a comparison of models and an online application. *arXiv preprint arXiv:1806.06053*.

Afouras, T., Chung, J. S., & Zisserman, A. (2018). LRS3-TED: a large-scale dataset for visual speech recognition. *arXiv preprint arXiv:1809.00496*.

Akmese Ö.F., Erbay H., Kör H., (2019). Derin Öğrenme ile Görüntü Kümeleme. In: 5th International Management Information Systems Conference, Ankara.

Alpaydin, E. (2020). *Introduction to machine learning*. MIT press.

Amanullah, M. A., Habeeb, R. A. A., Nasaruddin, F. H., Gani, A., Ahmed, E., Nainar, A. S. M., ... & Imran, M. (2020). Deep learning and big data technologies for IoT security. *Computer Communications*, 151, 495-517.

Anina, I., Zhou, Z., Zhao, G., & Pietikäinen, M. (2015, May). Ouluvs2: A multi-view audiovisual database for non-rigid mouth motion analysis. In 2015 11th IEEE International Conference and Workshops on Automatic Face and Gesture Recognition (FG) (Vol. 1, pp. 1-5). IEEE.

- Arı, A., & Hanbay, D. (2019). Tumor detection in MR images of regional convolutional neural networks. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(3), 1395-1408.
- Bacciu, D., Micheli, A., & Podda, M. (2020). Edge-based sequential graph generation with recurrent neural networks. *Neurocomputing*, 416, 177-189.
- Bayram, F. (2020). Derin öğrenme tabanlı otomatik plaka tanıma. *Politeknik Dergisi*, 23(4), 955-960.
- Bear, H. L., & Harvey, R. (2017). Phoneme-to-viseme mappings: the good, the bad, and the ugly. *Speech Communication*, 95, 40-67.
- Bi, C., Zhang, D., Yang, L., & Chen, P. (2019, November). An Lipreading Modle with DenseNet and E3D-LSTM. In 2019 6th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI) (pp. 511-515). IEEE.
- Bollier, D. (2017). Artificial intelligence comes of age. The promise and challenge of integrating AI into cars, healthcare and journalism. The Aspen Institute Communications and Society Program. Washington, DC.
- Chen, L., Xu, G., Zhang, S., Yan, W., & Wu, Q. (2020). Health indicator construction of machinery based on end-to-end trainable convolution recurrent neural networks. *Journal of Manufacturing Systems*, 54, 1-11.
- Chen, X., Du, J., & Zhang, H. (2020). Lipreading with DenseNet and resBi-LSTM. *Signal, Image and Video Processing*, 14(5), 981-989.
- Chen, Y., Zhao, X., & Jia, X. (2015). Spectral–spatial classification of hyperspectral data based on deep belief network. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(6), 2381-2392.
- Cheok, M. J., Omar, Z., & Jaward, M. H. (2019). A review of hand gesture and sign language recognition techniques. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 10(1), 131-153.
- Chung, J. S., & Zisserman, A. (2016, November). Lip reading in the wild. In Asian conference on computer vision (pp. 87-103). Springer, Cham.
- Chung, J. S., & Zisserman, A. P. (2017). Lip reading in profile.
- Chung, J. S., Senior, A., Vinyals, O., & Zisserman, A. (2017, July). Lip reading sentences in the wild. In 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (pp. 3444-3453). IEEE.
- Cooke, M., Barker, J., Cunningham, S., & Shao, X. (2006). An audio-visual corpus for speech perception and automatic speech recognition. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(5), 2421-2424.
- Cox, S. J., Harvey, R. W., Lan, Y., Newman, J. L., & Theobald, B. J. (2008, September). The challenge of multispeaker lip-reading. In AVSP (pp. 179-184).
- Doğan, M., Nemli, O. N., Yüksel, O. M., Bayramoğlu, İ., & Kemaloğlu, Y. K. (2008). İşitme Kaybının Yaşam Kalitesine Etkisini İnceleyen Anket Çalışmalarına Ait Bir Derleme. *Türkiye Klinikleri J Int Med Sci*, 4, 33.
- Dupont, S., & Luetin, J. (2000). Audio-visual speech modeling for continuous speech recognition. *IEEE transactions on multimedia*, 2(3), 141-151.
- Erdoğan A.A., (2016). Hearing Loss and Approaches to Hearing Loss in Elderly, *The Turkish Journal of Family Medicine and Primary Care*, 10 (1): 25-33, (2016). doi:10.5455/tjfm.204524
- Ergezer, H., Dikmen, M., & Özdemir, E. (2003). Yapay sinir ağları ve tanıma sistemleri. *PiVOLKA*, 2(6), 14-17.
- Ertam, F., & Aydın, G. (2017, October). Data classification with deep learning using Tensorflow. In 2017 international conference on computer science and engineering (UBMK) (pp. 755-758). IEEE.

- Esteva, A., Robicquet, A., Ramsundar, B., Kuleshov, V., DePristo, M., Chou, K., ... & Dean, J. (2019). A guide to deep learning in healthcare. *Nature medicine*, 25(1), 24-29.
- Farsal, W., Anter, S., & Ramdani, M. (2018, October). Deep learning: An overview. In *Proceedings of the 12th International Conference on Intelligent Systems: Theories and Applications* (pp. 1-6).
- Fayjie, A. R., Hossain, S., Oualid, D., & Lee, D. J. (2018, June). Driverless car: Autonomous driving using deep reinforcement learning in urban environment. In *2018 15th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)* (pp. 896-901). IEEE.
- Feng, W., Guan, N., Li, Y., Zhang, X., & Luo, Z. (2017, May). Audio visual speech recognition with multimodal recurrent neural networks. In *2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)* (pp. 681-688). IEEE.
- Fernandez-Lopez, A., & Sukno, F. M. (2017). Automatic viseme vocabulary construction to enhance continuous lip-reading. *arXiv preprint arXiv:1704.08035*.
- Fernandez-Lopez, A., & Sukno, F. M. (2017, February). Optimizing Phoneme-to-Viseme Mapping for Continuous Lip-Reading in Spanish. In *International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics* (pp. 305-328). Springer, Cham.
- Fernandez-Lopez, A., & Sukno, F. M. (2018). Survey on automatic lip-reading in the era of deep learning. *Image and Vision Computing*, 78, 53-72.
- Fernandez-Lopez, A., Martinez, O., & Sukno, F. M. (2017, May). Towards estimating the upper bound of visual-speech recognition: The visual lip-reading feasibility database. In *2017 12th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2017)* (pp. 208-215). IEEE.
- Fook, C. Y., Hariharan, M., Yaacob, S., & Adom, A. H. (2012, February). A review: Malay speech recognition and audio visual speech recognition. In *2012 International Conference on Biomedical Engineering (ICoBE)* (pp. 479-484). IEEE.
- Fung, I., & Mak, B. (2018, April). End-to-end low-resource lip-reading with maxout CNN and LSTM. In *2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 2511-2515). IEEE.
- Gogate, M., Dashtipour, K., Adeel, A., & Hussain, A. (2020). CochleaNet: A robust language-independent audio-visual model for real-time speech enhancement. *Information Fusion*, 63, 273-285.
- Goh, Y. H., Lau, K. X., & Lee, Y. K. (2019, October). Audio-Visual Speech Recognition System Using Recurrent Neural Network. In *2019 4th International Conference on Information Technology (InCIT)* (pp. 38-43). IEEE.
- Hamurcu, M., Şener, B. M., Ataş, A., Atalay, R. B., Bora, F., & Yiğit, Ö. (2012). İşitme cihazı kullanan hastalarda memnuniyetin değerlendirilmesi.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 770-778).
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural computation*, 9(8), 1735-1780.
- Hopfield, J. J. (1984). Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons. *Proceedings of the national academy of sciences*, 81(10), 3088-3092.
- Jang, D. W., Kim, H. I., Je, C., Park, R. H., & Park, H. M. (2019). Lip reading using committee networks with two different types of concatenated frame images. *IEEE Access*, 7, 90125-90131.
- Kahveci, O. K., Miman, M. C., Okur, E., Ayçiçek, A., Sevinç, S., & Altuntaş, A. (2011). Hearing aid use and patient satisfaction. *Kulak burun bogaz ihtisas dergisi: KBB= Journal of ear, nose, and throat*, 21(3), 117-121.
- Keyvanrad, M. A., & Homayounpour, M. M. (2014). A brief survey on deep belief networks and introducing a new object oriented toolbox (DeeBNet). *arXiv preprint arXiv:1408.3264*.

- Koumparoulis, A., & Potamianos, G. (2018, December). Deep view2view mapping for view-invariant lipreading. In 2018 IEEE Spoken Language Technology Workshop (SLT) (pp. 588-594). IEEE.
- Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 25, 1097-1105.
- Kumar, Y., Jain, R., Salik, M., ratn Shah, R., Zimmermann, R., & Yin, Y. (2018, December). Mylipper: A personalized system for speech reconstruction using multi-view visual feeds. In 2018 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM) (pp. 159-166). IEEE.
- Lan, Y., Theobald, B. J., & Harvey, R. (2012, July). View independent computer lip-reading. In 2012 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (pp. 432-437). IEEE.
- LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., & Haffner, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 2278-2324.
- Li, X., Neil, D., Delbruck, T., & Liu, S. C. (2019, May). Lip reading deep network exploiting multi-modal spiking visual and auditory sensors. In 2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) (pp. 1-5). IEEE.
- Lu, Y., & Yan, J. (2020). Automatic lip reading using convolution neural network and bidirectional long short-term memory. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 34(01), 2054003.
- Luo, M., Yang, S., Shan, S., & Chen, X. (2020, November). Pseudo-convolutional policy gradient for sequence-to-sequence lip-reading. In 2020 15th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (FG 2020) (pp. 273-280). IEEE.
- Lv, Z., & Qiao, L. (2020). Deep belief network and linear perceptron based cognitive computing for collaborative robots. *Applied Soft Computing*, 92, 106300.
- Mamatha G., Roshan B.B.R., Vasudha S.R., (2020). Lip Reading to Text using Artificial Intelligence, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 9 (01): 483-484.
- Martinez, B., Ma, P., Petridis, S., & Pantic, M. (2020, May). Lipreading using temporal convolutional networks. In ICASSP 2020-2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 6319-6323). IEEE.
- Matthews, I., Cootes, T. F., Bangham, J. A., Cox, S., & Harvey, R. (2002). Extraction of visual features for lipreading. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(2), 198-213.
- McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5(4), 115-133.
- Mesbah, A., Berrahou, A., Hammouchi, H., Berbia, H., Qjidaa, H., & Daoudi, M. (2019). Lip reading with Hahn convolutional neural networks. *Image and Vision Computing*, 88, 76-83.
- Minsky, M., & Papert, S. (1969). *An introduction to computational geometry*. Cambridge tiass., HIT.
- Muljono, M., Saraswati, G., Winarsih, N., Rokhman, N., Supriyanto, C., & Pujiono, P. (2019). Developing BacaBicara: An Indonesian Lipreading System as an Independent Communication Learning for the Deaf and Hard-of-Hearing. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)*, 14(4), 44-57.
- Mulrow, C. D., Aguilar, C., Endicott, J. E., Tuley, M. R., Velez, R., Charlip, W. S., ... & DeNino, L. A. (1990). Quality-of-life changes and hearing impairment: a randomized trial. *Annals of internal medicine*, 113(3), 188-194.
- Mulrow, C. D., Aguilar, C., Endicott, J. E., Velez, R., Tuley, M. R., Charlip, W. S., & Hill, J. A. (1990). Association between hearing impairment and the quality of life of elderly individuals. *Journal of the American Geriatrics Society*, 38(1), 45-50.
- Mulrow, C. D., Tuley, M. R., & Aguilar, C. (1992). Sustained benefits of hearing aids. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 35(6), 1402-1405.

- Oliveira, D. A. B., Mattos, A. B., & da Silva Morais, E. (2019, May). Improving Viseme Recognition with GAN-based Multi-view Mapping. In 2019 14th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2019) (pp. 1-8). IEEE.
- Olgun, N., Aslan, F. E., Yücel, N., Öntürk, Z. K., & Laçın, Z. (2013). Yaşlıların sağlık durumlarının değerlendirilmesi. *Acıbadem Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, (2), 72-78.
- Ozcan, T., & Basturk, A. (2019). Lip reading using convolutional neural networks with and without pre-trained models. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 7(2), 195-201.
- Pang, Z., Niu, F., & O'Neill, Z. (2020). Solar radiation prediction using recurrent neural network and artificial neural network: A case study with comparisons. *Renewable Energy*, 156, 279-289.
- Patterson, E. K., Gurbuz, S., Tufekci, Z., & Gowdy, J. N. (2002). Moving-talker, speaker-independent feature study, and baseline results using the CUAVE multimodal speech corpus. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2002(11), 1-13.
- Patterson, E. K., Gurbuz, S., Tufekci, Z., & Gowdy, J. N. (2002, May). CUAVE: A new audio-visual database for multimodal human-computer interface research. In 2002 IEEE International conference on acoustics, speech, and signal processing (Vol. 2, pp. II-2017). IEEE.
- Petridis, S., Li, Z., & Pantic, M. (2017, March). End-to-end visual speech recognition with LSTMs. In 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 2592-2596). IEEE.
- Petridis, S., Shen, J., Cetin, D., & Pantic, M. (2018, April). Visual-only recognition of normal, whispered and silent speech. In 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 6219-6223). IEEE.
- Petridis, S., Stafylakis, T., Ma, P., Cai, F., Tzimiropoulos, G., & Pantic, M. (2018, April). End-to-end audiovisual speech recognition. In 2018 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP) (pp. 6548-6552). IEEE.
- Petridis, S., Wang, Y., Li, Z., & Pantic, M. (2017). End-to-end audiovisual fusion with LSTMs. arXiv preprint arXiv:1709.04343.
- Petridis, S., Wang, Y., Li, Z., & Pantic, M. (2017). End-to-end multi-view lipreading. arXiv preprint arXiv:1709.00443.
- Petridis, S., Wang, Y., Ma, P., Li, Z., & Pantic, M. (2020). End-to-end visual speech recognition for small-scale datasets. *Pattern Recognition Letters*, 131, 421-427.
- Potamianos, G., Neti, C., Gravier, G., Garg, A., & Senior, A. W. (2003). Recent advances in the automatic recognition of audiovisual speech. *Proceedings of the IEEE*, 91(9), 1306-1326.
- Potamianos, G., Neti, C., Luetin, J., & Matthews, I. (2004). Audio-visual automatic speech recognition: An overview. *Issues in visual and audio-visual speech processing*, 22, 23.
- Qu, L., Weber, C., & Wermter, S. (2019, September). LipSound: Neural Mel-Spectrogram Reconstruction for Lip Reading. In INTERSPEECH (pp. 2768-2772).
- Rahmani, M. H., & Almasganj, F. (2017, April). Lip-reading via a DNN-HMM hybrid system using combination of the image-based and model-based features. In 2017 3rd International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis (IPRIA) (pp. 195-199). IEEE.
- Rekik, A., Ben-Hamadou, A., & Mahdi, W. (2014, October). A new visual speech recognition approach for RGB-D cameras. In International conference image analysis and recognition (pp. 21-28). Springer, Cham.
- Rosenbaltt, F. (1957). The perceptron—a perceiving and recognizing automation. Cornell Aeronautical Laboratory.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *nature*, 323(6088), 533-536.

Russell, S. J., & Norvig, P. Artificial intelligence: a modern approach. 2016: Malaysia.

Saif, D., El-Gokhy, S. M., & Sallam, E. (2018). Deep Belief Networks-based framework for malware detection in Android systems. *Alexandria engineering journal*, 57(4), 4049-4057.

Sak, H., Senior, A. W., & Beaufays, F. (2014). Long short-term memory recurrent neural network architectures for large scale acoustic modeling.

Sam, S. M., Kamardin, K., Sjarif, N. N. A., & Mohamed, N. (2019). Offline signature verification using deep learning convolutional neural network (CNN) architectures GoogLeNet Inception-v1 and Inception-v3. *Procedia Computer Science*, 161, 475-483.

Simonyan, K., & Zisserman, A. (2014). Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. arXiv preprint arXiv:1409.1556.

Sindhura, P. V., Preethi, S. J., & Niranjana, K. B. (2018, December). Convolutional neural networks for predicting words: A lip-reading system. In *2018 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECCOT)* (pp. 929-933). IEEE.

Stafylakis, T., & Tzimiropoulos, G. (2017). Combining residual networks with LSTMs for lipreading. arXiv preprint arXiv:1703.04105.

Sui, C., Togneri, R., & Bennamoun, M. (2017). A cascade gray-stereo visual feature extraction method for visual and audio-visual speech recognition. *Speech Communication*, 90, 26-38.

Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., ... & Rabinovich, A. (2015). Going deeper with convolutions. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 1-9).

Thangthai, K., & Harvey, R. (2017, August). Improving computer lipreading via DNN sequence discriminative training techniques. ISCA.

Thangthai, K., Bear, H. L., & Harvey, R. (2018). Comparing phonemes and visemes with DNN-based lipreading. arXiv preprint arXiv:1805.02924.

Turing A.M., "Computing Machinery and Intelligence", *Mind Journal*, 49: 433-460, (1950).

Uğur, A., & Kınacı, A. C. (2006). Yapay zeka teknikleri ve yapay sinir ağları kullanılarak web sayfalarının sınıflandırılması. XI. Türkiye'de İnternet Konferansı (inet-tr'06), Ankara, 1-4.

Wand, M., & Schmidhuber, J. (2017). Improving speaker-independent lipreading with domain-adversarial training. arXiv preprint arXiv:1708.01565.

Wand, M., Koutník, J., & Schmidhuber, J. (2016, March). Lipreading with long short-term memory. In *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 6115-6119). IEEE.

Wand, M., Schmidhuber, J., & Vu, N. T. (2018, April). Investigations on end-to-end audiovisual fusion. In *2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 3041-3045). IEEE.

Wang, J., Gao, Y., Zhang, J., Wei, J., & Dang, J. (2015). Lipreading using profile lips rebuilt by 3D data from the Kinect. *Journal of Computational Information Systems*, 11(7), 2429-2438.

Xiao, J., Yang, S., Zhang, Y., Shan, S., & Chen, X. (2020, November). Deformation flow based two-stream network for lip reading. In *2020 15th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (FG 2020)* (pp. 364-370). IEEE.

Xu, B., Wang, J., Lu, C., & Guo, Y. (2020). Watch to listen clearly: Visual speech enhancement driven multi-modality speech recognition. In *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision* (pp. 1637-1646).

- Xu, K., Li, D., Cassimatis, N., & Wang, X. (2018, May). LCArNet: End-to-end lipreading with cascaded attention-CTC. In 2018 13th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2018) (pp. 548-555). IEEE.
- Yang, R., Singh, S. K., Tavakkoli, M., Amiri, N., Yang, Y., Karami, M. A., & Rai, R. (2020). CNN-LSTM deep learning architecture for computer vision-based modal frequency detection. *Mechanical Systems and signal processing*, 144, 106885.
- Yang, S., Zhang, Y., Feng, D., Yang, M., Wang, C., Xiao, J., ... & Chen, X. (2019, May). LRW-1000: A naturally-distributed large-scale benchmark for lip reading in the wild. In 2019 14th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2019) (pp. 1-8). IEEE.
- Yargıç, A., & Doğan, M. (2013, June). A lip reading application on MS Kinect camera. In 2013 IEEE INISTA (pp. 1-5). IEEE.
- Yu, Y., Hu, C., Si, X., Zheng, J., & Zhang, J. (2020). Averaged Bi-LSTM networks for RUL prognostics with non-life-cycle labeled dataset. *Neurocomputing*, 402, 134-147.
- Yueh, B., Shapiro, N., MacLean, C. H., & Shekelle, P. G. (2003). Screening and management of adult hearing loss in primary care: scientific review. *Jama*, 289(15), 1976-1985.
- Zhao, X., Yang, S., Shan, S., & Chen, X. (2020, November). Mutual information maximization for effective lip reading. In 2020 15th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (FG 2020) (pp. 420-427). IEEE.
- Zhou, P., Yang, W., Chen, W., Wang, Y., & Jia, J. (2019, May). Modality attention for end-to-end audio-visual speech recognition. In ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 6565-6569). IEEE.
- Zhou, Z., Zhao, G., Hong, X., & Pietikäinen, M. (2014). A review of recent advances in visual speech decoding. *Image and vision computing*, 32(9), 590-605.



Yeni Nesil Alümina Esaslı Seramik Köpük Filtre Üretimi

The Production of New Generation Alumina Based Ceramic Foam Filter

Tuna Aydın¹ , Nazım Kunduraci^{*2} 

¹ Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, 071450, Kırıkkale, TÜRKİYE
² Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, 67980, Zonguldak, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 24/05/2022 **Kabul / Accepted:** 25/05/2022 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Bu deneysel çalışmada döküm prosesinde kullanılmak üzere ve SiC esaslı seramik köpük filtreler alternatif olarak yerli ve daha az maliyetli alümina esaslı seramik filtre üretmek amaçlanmıştır. Yöntem olarak replikasyon yöntemi uygulanarak 8-10 PPI’da iki farklı poliüretan süngerler kullanılmıştır. Seramik filtre denemeleri için farklı süspansiyon reçeteleri geliştirilmiştir. Replikasyon yönteminde kullanılan sünger için TG/DTA analizi yapılarak sinterleme rejimi belirlenmiştir. Sinterleme sonrası elde edilen numuneler Optik Mikroskop ile ağ yapısı ve gözenek büyüklükleri karakterize edilerek incelenmiştir. Yine numunelerin XRD analizleri yapılarak oluşan fazlar belirlenmiştir. Sonuçta numuneler metal döküm işleminde test edilmiştir. Uygun bulunan numunelerin maliyetleri SiC filtreler ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Seramik, Köpük, Döküm, Filtre, Alümina, Poliüretan sünger, Replikasyon”

Abstract

In this study, it was aimed to produce to domestic and less costly alumina based ceramic filters to be used in casting process and as an alternative to SiC foam filters. Two different polyurethane sponges at 8-10 PPI were used in this application, by choosing the replication method. Different suspension recipes have been prepared for ceramic filter. The sintering regime was determined by analyzing the TG/TDA. After sintering, the samples were examined by using optical microscope for mesh and pore size. The phases of samples were determined by using XRD analysis. Finally, the samples were tested in metal casting process. The costs of the samples found suitable were compared with the SiC filters.

Key Words

“Cermic, foam, casting, filter, alümina, polyurethane sponge, replicaton”

1.Giriş

Seramik köpük esaslı malzemeler günümüzde yaygın olarak filtreleme yada yalıtım malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Aydın 2018, Aydın 2019). Genellikle döküm prosesinde filtrasyon için kullanılan filtreler genel yapı itibarıyla köpük filtre ve bal peteği filtreler olmak üzere ikiye ayrılır (Çalışkan 2015). Köpük filtreler belirli gözenek açıklığına sahip süngerler sayesinde açık gözenekli olarak en çok replikasyon yöntemiyle üretilen süngerlerdir. Bal peteği filtreler ise ağsı yapıya sahip olmayıp uzun ince tüp şeklinde açıklıklarla filtrasyon yapan ekstrüzyon ve presleme yöntemiyle üretilmiş filtrelerdir. Köpük filtreler, bal peteği şekilli filtrelere göre daha yüksek filtrasyon özelliğine sahip olmasından dolayı ön plana çıkmaktadır. Köpük filtrelerin ağsı yapısı sayesinde ergimiş metal içerisindeki empüriteler daha yüksek oranlarda filtre edilip daha az hatalı ürün elde edilerek verimin artmasına sebep olur. Demir metallerinin filtrasyonunda 140 milyon filtre/yıl, alüminyum dökümde 20 milyon filtre/yıl ve çelik dökümde 2 milyon filtre/yıl olmak üzere filtre malzemesi olarak gözenekli seramiklerin kullanımı artarak devam etmektedir (Çalışkan, 2015, Jaunich vd, 2004). Günümüzde köpük filtrelerin üretiminde en çok kullanılan ana bileşenlerin fiyat ve özellikleri açısından araştırıldığında, SiC, Al₂O₃, ZrO₂ ve MgO gibi seramik esaslı malzemelerden elde edilen köpüklerin birim maliyetleri açısından döküm prosesinde kullanılmasında çok yüksek maliyetler ortaya çıkmaktadır (Çalışkan, 2015). Bu çalışmada, ithal seramik köpük filtrelere alternatif olarak yerli ve daha az maliyetli alümina esaslı seramik filtre üretmek bu çalışmada amaçlanmıştır.

Döküm sektöründe özellikle de Dökme demir uygulamalarında Silisyum Karbür kullanılması en önemli sebebi döküm sıcaklığına dayanabilmesi ve basma direncinin yüksek olmasıdır. SiC ün maliyetinin de düşük olması önemli avantajdır. Alüminyum döküm uygulamalarında ise yüksek sıcaklık gerekmediği ve Silisyum Karbürden daha düşük fiyatta olduğu için Alümina tercih edilmektedir. Zirkonyum ve Magnezyum fiyatları yüksek olduğu için ticari uygulamalarda genellikle tercih edilmez. Bu çalışmada alümina esaslı filtrelere alternatif daha düşük sıcaklıklarda sinterlenebilen seramik filtrelerin üretimi amaçlanmıştır.

2.Deneysel Çalışma

2.1 Reçete oluşturma

Alümina esaslı köpük filtremizin iskelet yapısını oluşturmak için 8-10 PPI gözenek yoğunluğuna sahip poliüretan süngerleri temin ederek kullanılmıştır. Süspansiyon için 1800 gr/lt ağırlığında çalışılmıştır. Reçete hazırlanmasında SiC 'e alternatif olması amacıyla müllit ve alümina birlikte kullanılmıştır. Sistem içerisindeki sıvı fazı arttırmak için feldspat ilavesi tercih edilmiştir. Tablo 1'de geliştirilen reçete ve Tablo 2'de de reçetede kullanılan hammaddelerin kimyasal analiz sonuçları verilmiştir. Reçete dahilinde uygun litre ağırlığına ayarlanan süspansiyon değirmende ortalama kadar 30 dakika 100 RPM hızında öğütülerek homojen bir şekilde hazırlanmıştır.

Tablo 1. Geliştirilen reçete oranları. (ağırlıkça)

Hammadde	% Miktar (%ağırlıkça)
Feldspat	25
Kil 2	20
Müllit	35
Alümina	25

Tablo 2. Kullanılan hammaddelerin kimyasal analiz sonuçları.

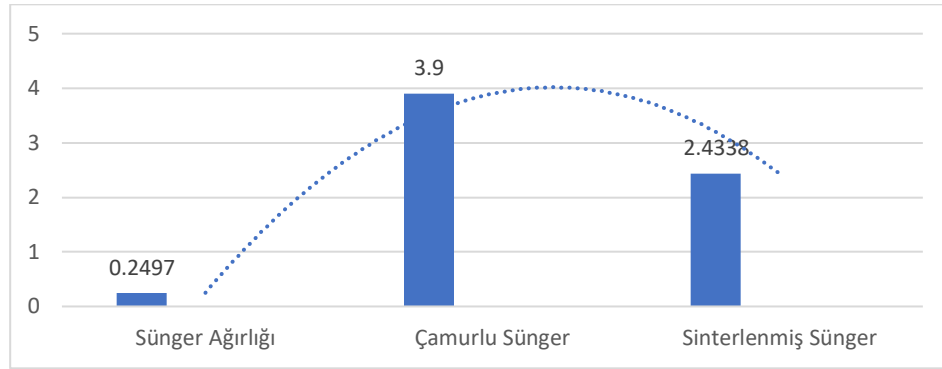
AZ	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	WC	
Feldspat	0.4	71	17.5	0.1	0.22	0.85	0.1	9.5	0.2	0
Müllit	0,3	34	62					0.1	0.2	3
Kil	10.5	57.5	27.5	1.6	1.2	0.2	0.4	0.2	1.5	0

2.2 Replikasyon prosesi

Şekil 1 de replikasyon prosesi ana şeması verilmiştir. Bu ana şemaya bağlı kalarak seramik köpük üretim süreci ile 2cmX2cm boyutundaki poliüretan süngeri 1800 gr/lt yoğunluğa sahip süspansiyona daldırma yöntemi ile süngerin çamur ile kaplanması sağlanmıştır. Sünger hacmindeki fazla çamuru sistemden çıkarmak için sünger merdaneden geçirilmiştir. İşlem sürecinde sünger ağırlık değişimi Şekil 2'de verilmiştir.



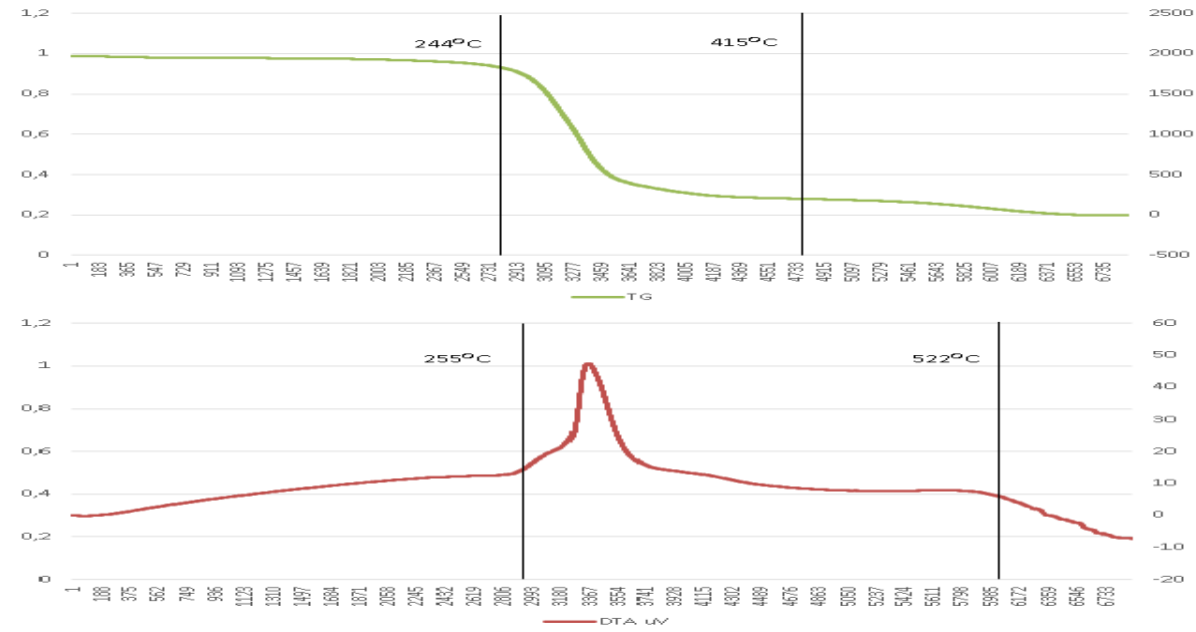
Şekil 1.Replikasyon Proses Şeması



Şekil 2. İşlem sürecince elde edilen ağırlık değişim grafiği

2.3 Termal analizler ve sinterleme

Bu çalışmada şekillendirilmede kullanılan proform malzeme poliüretan süngerin Bülent Ecevit Üniversitesi Araştırma Merkezinde DTA ve TG analizleri yapıldı. Bu analiz sonuçları aşağıdaki grafiklerde görülmektedir.



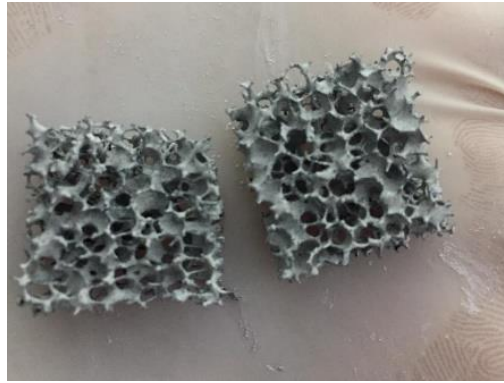
Şekil 3. Poliüretan Süngerin DTA-TG Analizi

Tablo 3 de görüldüğü üzere yapılan bu DTA analizinde poliüretan süngerin 255°C'de reaksiyonu başlamış olup 522°C'ye kadar bu reaksiyonların devam ettiği görülmüştür. TG analizinde ise sıcaklığın etkisiyle ağırlık kaybı 244°C'de başlayıp bu ağırlık kaybının 415°C'de son bulduğu görülmüştür. Replikasyon yöntemi kullanarak şekillendirilen numunelerin TG/DTA analiz sonuçları da göz önünde bulundurularak Tablo 4'de yer alan sinterleme rejimi uygulanmıştır. Hazırlanan numunelerin sinterlenmesi için tüp fırın kullanılmıştır.

Tablo 3. Uygulanan sinterleme rejimi

Sıcaklık (°C)	Isıtma/Soğutma Hızı (°C/dak)	Süre (dak)
21°C-450°C	8°C/dak (Isıtma)	95 dak
450°C-650°C	8°C/dak (Isıtma)	125 dak
650°C-1350°C	8°C/dak (Isıtma)	88 dak
1350°C	Bekleme	60 dak
1350°C-21°C	Fırında kendiliğinden soğuma	-

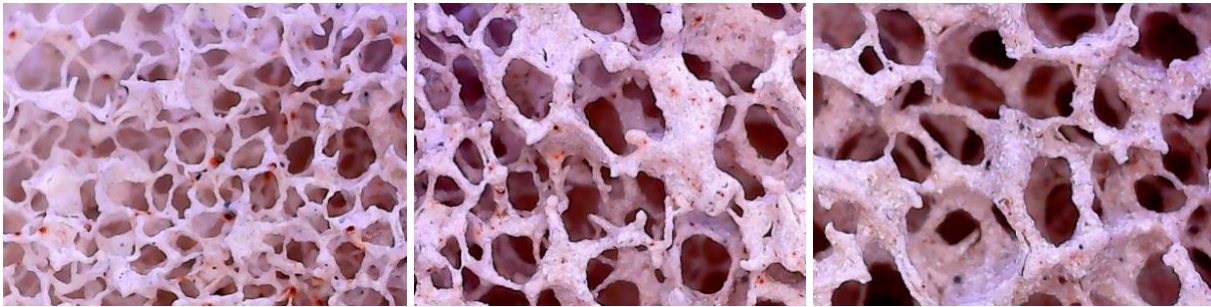
Sinterleme işlemi 1350°C, 1300°C, 1250°C farklı tepe sıcaklıklarında tekrarlanarak sinter sıcaklıklarının sıvı alaşımlara karşı direnç özellikleri ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sinterlenmiş numunelere ait görüntüler Şekil 4 de sunulmuştur.



Şekil 4. Replikasyon Prosesi Uygulanmış Sünger

3.Karakterizasyon Çalışmaları

Elde edilen numuneler Optik Mikroskop ile karakterize edilmiş ve görüntüler Şekil 5 de sunulmuştur. Replikasyon yöntemi ile elde edilmiş numunelerin birbirleriyle temas halindeki açık gözenekler içerdiği ve bu gözeneklerin sürekli bir seramik bağ ile bağlanmasından oluştuğu ve üç boyutlu gözenekli bir yapıya sahip olduğu karakterize edilmiştir (Aydın, 2018, Aydın 2019) Literatür incelemelerinde de bu durum desteklenmektedir (Çalışkan, 2015).



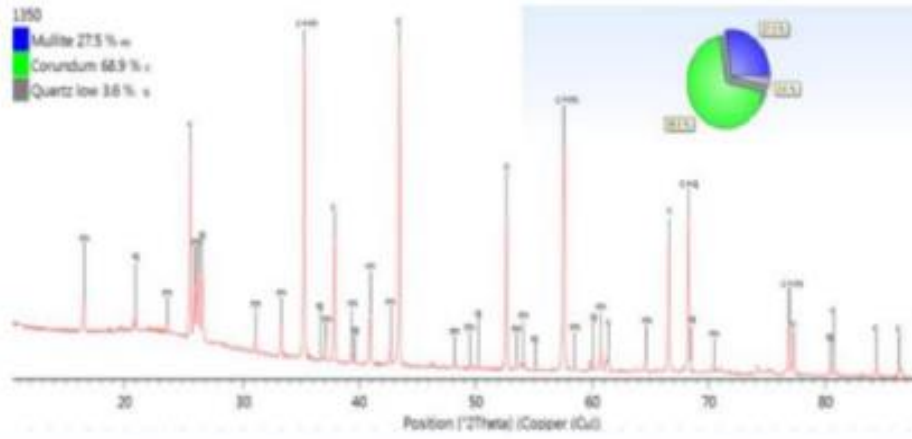
(a)

(b)

(c)

Şekil 5. Isıl işlem uygulanmış numunelerin optik mikroskop görüntüleri. a-) 1350 C, b-) 1300 C, c-) 1250 C.

Şekil 6 da 1350 °C de sinterlemesi yapılmış numuneye ait X ışınları kırınım analizi sonucu verilmiştir. XRD paternleri incelendiğinde numunede oluşan fazlar mullite, korundum ve quartz olarak tespit edilmiştir. Geleneksel seramik bünyelerde kuvars artıkfaz olarak yapıda bulunurken müllit fazı sinterleme esnasında başlangıç kompozisyonunda bulunan kil minerallerinden gelişir (Tarhan ve Tarhan 2019, Tarhan ve Tarhan 2019, Tarhan ve Tarhan 2019). Geliştirilen alumina esaslı filtre kompozisyonunda bir kısım müllit reçeteye doğrudan ilave edilirken bir kısım müllit sinterleme sürecinde gelişmiştir.



Şekil 6. Numunelere ait XRD analizi

Numunelere mekanik özellikleri açısından incelemek amacı ile Basma mukavemeti testi yapılmıştır. 2 cm x 2 cm x 2cm ebatlarında hazırlanan numuneler üzerinde çekme cihazında standart basma plakaları kullanarak numunelerin sinterleme sıcaklığına bağlı olarak basma mukavemetleri tespit edilmiştir. Sonuçlar Tablo 5 de verilmiştir. Sinterleme sıcaklığındaki artışa bağlı olarak numunelerin basma dayanımları artış göstermiştir. Özellikle müllit oluşumu ile ve sıcaklık artışı ile de müllit miktarındaki artış ve ayrıca korundum oluşumu ile de beraber mukavemetlerde artış olduğu düşünülmektedir. Seramik malzemelerde mekanik mukavemeti veren ana faz müllit fazıdır(Tarhan, 2016, Cam, 1998 Tarhan, 2022, Tarhan 2017).

Tablo 5. Numulere ait basma dayanımı sonuçları

	Basma Mukavemeti (kN)
1250 °C	0.4
1300 °C	0.7
1350°C	2

Sıvı alaşımlara karşı direnç özellikleri incelenen numunelere ait bir görüntü Şekil 7 de verilmiştir. Eriyik Alüminyum Türkiye Taş Kömürleri İşletmesinde geliştirilen seramik filtrelerden geçirilmiştir. Filtrede tıkanma, kırılma veya sızdırmazlık kaçırma gibi istenmeyen durumlar gerçekleşmediği tespit edilmiştir.



Şekil 7. Sıvı alaşımlara karşı direnç özellikleri incelenen numuneler

4. Sonuçlar ve Öneriler

Yapılan deneysel faaliyetler neticesinde Replikasyon yöntemi ile yerli ve daha az maliyetli yeni nesil köpük filtre üretimi hedeflenmiştir. 2. Reçetede bağlayıcılığın artırılması için Kil 1 yerine Kil 2'nin kullanılması ve ergiticinin %5 artırılması, seramik yapıdaki bağlayıcılığı artırarak mukavemeti etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca Albit ile Müllit'in oranlarının yeniden düzenlenmesi sonucu 1350°C, 1300°C ve 1250°C istenilen mekanik özelliklere ulaşılmıştır. Sinterleme sıcaklığının artması ile beraber filtrelerin

basma dayanımlarında artış gözlenmiştir. Çalışma oluşan faz değişimlerinin mekanik ve kullanım özelliklerine etkisinin araştırılmasına yönelik olarak.

Referanslar

- Aydın T., (2018). Development of porous lightweight clay bricks using a replication method, J Aust Ceram Soc., 54:169–175
- Aydın T., (2019). The development of porcelain foams lighter than water for heat isolation application, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry volume 136, pages535–539
- Cam WM, Senapati U. (1998) Porcelain-raw materials, processing, phase evolution, and mechanical behaviour. J Am Ceram Soc. 81(1):3–20.
- Çalışkan, F., Yılmaz, F., & Tath, Z. (2015). Silisyum Karbür Esaslı Seramik Köpük Filtre Üretimi. ISITES2015 Valencia -Spain
- Jaunich, H., Aneziris, C. G. ve Hubalkova, J. (2004). Innovative filter and feeder approaches for advanced metal casting technologies. Interceram Refractories Manual, 18-21.
- Tarhan M, Tarhan B, Aydın T. (2016) The effects of fine fire clay sanitaryware wastes on ceramic wall tiles. Ceram Int. 42:17110–5
- Tarhan M, Tarhan B, Aydın T. (2016) The effects of fine fire clay sanitaryware wastes on ceramic wall tiles. Ceram Int. 42:17110–5
- Tarhan, B. & Tarhan, M. (2022). Alümina Porselen Bünyelerde Spodumen İlavesinin Teknik Özelliklere Etkisinin Araştırılması . International Journal of Engineering Research and Development , 14 (1) , 262-270 . DOI: 10.29137/umagd.1036965
- Tarhan, B., Tarhan, M., & Aydın, T., (2017), Reusing sanitaryware waste products in glazed porcelain tile production. Ceramics International, 43(3), 3107-3112.
- Tarhan B. ve Tarhan M. (2019) Çanakkale bölgesi alkali kaynağının seramik sağlık gereçleri bünyesi ısıl ve mikroyapı özellikleri üzerine etkisi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, c. 10, sayı. 2, ss. 675-687, Haz. 2019, doi:10.24012/dumf.504331
- Tarhan, M. & Tarhan, B. (2019). Sırlı Porselen Karo Üretimi için Alternatif Hammadde Olarak Eşme/Uşak Feldispatı . Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19 (2) , 429-438. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid/issue/48783/523365>
- Tarhan, M. (2019). Whiteness improvement of porcelain tiles incorporated with anorthite and diopside phases. J Therm Anal Calorim 138, 929–936. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08268-8>
- Tarhan, M., Tarhan, B. (2019). Afyon Kilinin Porselen Karo Bünyelerinde Kullanımının Araştırılması. International Journal of Engineering Research and Development, 11 (1) , 275-281 . DOI: 10.29137/umagd.433307



SiC, MgCO₃ ve Li₂CO₃ İlavelerinin Seramik Köpükler Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Investigation of The Effects of SiC, MgCO₃ and Li₂CO₃ Additions on Ceramic Foams

Burak Doğan¹ , Tuna Aydın² 

¹ Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, 071450, Kırıkkale, TÜRKİYE

² Sinerji Silah ve Mühimmat A.Ş. haritası

² Fabrikalar Mahallesi Silah OSB. 2. Sokak No:5, 71300, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 24/05/2022

Kabul / Accepted: 25/05/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Seramik köpük malzemeler günümüzde hem fitlere hem de yalıtım amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışmada SiC, MgCO₃ ve Li₂CO₃ ilavelerinin seramik esaslı köpüklerin özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda farklı katkı oranlarında kompozisyonlar hazırlanmıştır. Bu kompozisyonlar ile üretilen köpük numunelerinin SEM ve XRD gibi mikroyapı ve faz analizleri gerçekleştirilmiş ayrıca temassız optik dilatometre kullanarak sinterleme analizleri yapılmıştır. TG ve DTA analizleri ile de kütle kayıpları ve faz dönüşüm sıcaklıkları tespit edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda görülmüştür ki, katkılar beraber seramik köpüklerin teknolojik özelliklerinin geliştiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Seramik Köpük, sinterleme, mikroyapı, termal özellikler”

Abstract

Ceramic foam materials are widely used today for both filter and insulation purposes. This study aimed to examine the effects of SiC, MgCO₃, and Li₂CO₃ additions on the properties of ceramic-based foams. In this direction, compositions with different additive ratios were prepared. Microstructure and phase analyses such as SEM and XRD of the foam samples produced with these compositions were performed, and sintering analyses were performed using a non-contact optical dilatometer. Mass losses and phase transformation temperatures were determined by TG and DTA analysis. As a result of the study, it was seen that the technological properties of ceramic foams improved with the additives.

Key Words

“Ceramic foams, sintering, microstructure, thermal properties”

1. Giriş

Seramikler gerek termal ve mekanik gerekse de elektriksel özellikleri nedeniyle çok önemli bir malzeme grubu olarak bir çok endüstriyel alanda kullanılmaktadırlar. Son zamanlarda özellikle endüstriyel alanda vazgeçilmez bir malzeme grubu olarak da dikkat çekmektedirler. Son 30 yılda özellikle inşaat sektörünün yanında savunma sanayi, demir-çelik, kimya ve makine sanayide de yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Seramik köpük malzemeler hem filtre hem de yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirler. Filtre amacı ile geliştirilen seramik köpükler açık poroziteli bir yapıya sahipken yalıtım amacı ile kullanılanlar ise kapalı bir gözenek yapısına sahiptirler. Aslında kullanım alanına ve ihtiyaca bağlı olarak seramik köpük malzemeler üretilebilmektedirler. Çalışkan v.d. (2015) yaptıkları çalışmada ergimiş metal filtrasyonunda kullanılmak üzere poliüretan köpük (PUF) kullanılarak replikasyon yöntemiyle silisyum karbür esaslı seramik filtre üretimi gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada filtrasyon amacı ile geliştirilen seramik köpükler açık gözenek yapısına sahiptir. Aydın (2018) yapmış olduğu çalışmada yine replikasyon yöntemi kullanarak ısı yalıtımı sağlayan hafif seramik köpükler geliştirmiştir. Bu çalışmada geliştirilen seramik köpükler kapalı porozite yapısına sahiptir. Seramik köpük malzemelerin üretilmesine yönelik birçok bilimsel çalışma yapılmış ve halen daha yapılmaya da devam etmektedir. Andrei (2021) ve arkadaşları atık camlar üzerine yaptıkları çalışmada seramik köpük üretilebileceğini göstermişlerdir. Yaptıkları çalışmanın metodolojisi kil esaslı bir köpüğünün 800 ila 1050 °C arasında değişen sıcaklıklarda sinterlenmesini ve ağırlıkça %5, %7 ve %10 öğütülmüş cam kırıntıları ile karıştırılmasını içermektedir. Bin (2021) ve arkadaşları porselen karo parlatma atığı, uçucu kül kullanarak köpük geliştirmeye çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada köpükleştirici herhangi bir ajan kullanmamışlardır. Seramik köpük malzemelerin kullanım esnasında gösterdikleri en önemli özellikleri termal özellikler iken kullanımını kısıtlayan en önemli faktörler ise mekanik özelliklerden mukavemettir. Bu bağlamda bu çalışmada seramik köpük malzemelerin yerine gözenek boyutu ve dağılıma etkisini geliştirmek amacı ile vitrifiye geri dönüşüm çamuruna SiC, MgCO₃ ve Li₂CO₃ ilaveleri yapılmıştır.

2. Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada ana iskelet yapıyı oluşturması amacı ile vitrifiye geri dönüşüm çamuru kullanılmıştır. Vitrifiye geri dönüşüm çamuru ECE Banyo A. Ş.'den sağlanmıştır. Bünyenin gözenekli hale getirilebilmesi için vitrifiye atık çamuruna belirli oranlarda köpürtücü özelliği olan yada yapıda gözenek oluşturabilecek SiC, MgCO₃ ve Li₂CO₃ ilavesi yapılarak reçeteler oluşturulmuştur. 3 adet deneme reçetesi hazırlanmıştır. Kullanılan vitrifiye geri dönüşüm çamurunun hammadde karışım oranları Tablo 1 de sunulmuştur.

Tablo 1. Vitrifiye geri dönüşüm çamuru

Hammadde	% Oran
Kil	25
Kaolen	25
Kuvars	10
Na Feldispat	40

Köpürme işleminin gerçekleşmesi için bir porselen kroze içerisinde alınmıştır. Hammadde karışımlarına ait kimyasal analizler Tablo 2 de verilmiştir. Kimyasal analizlerden de görüldüğü üzere Karbonat esaslı katkılardan dolayı yüksek oranda CO₂ çıkış olmuştur.

Tablo 2. Hammadde karışımlarına ait kimyasal analizler

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	CO ₂
SMLK 1	67.71	12.75	0.24	1.99	0.5	0.45	3.88	0.31	0.15	11.91
SMLK 2	74.28	11.52	0.2	2.06	0.49	0.34	1.16	0.29	0.16	9.5
SMLK 3	63.12	17.51	0.34	3.09	0.72	0.56	3.54	0.4	-	10.55

Bünye reçeteleri de Tablo 3 de sunulmuştur. Çalışmada vitrifiye geri dönüşüm çamurunun hem iskelet yapıyı oluşturması hem de bağlayıcılık görevini yapması amacı ile kullanılmıştır. Karbonat esaslı hammaddeler de hem boşluk hem de camsı yapıyı desteklemesi amacı ile kullanılmıştır. SiC'ün kullanılmasının amacı ise mekanik sertlik gibi mekanik özelliklerin geliştirilmesi amacı ile kullanılmıştır.

Tablo 3. Bünye reçeteleri

	Geri dönüşüm çamuru %	SiC	MgCO ₃	Li ₂ CO ₃
SMLK 1	50	20	20	10
SMLK 2	75	5	5	5
SMLK 3	80	5	10	5

Bu karışım oranlarına bağlı olarak hazırlanan reçeteler porselen krozelere alınmış ve belirli bir fırın rejimine bağlı olarak 1150°C de numuneler sinterlenmiştir. Sinterlenmiş numune görüntülerinde de anlaşılacağı üzere yüksek oranda gözenek içeren yapı bu yöntem kullanılarak elde edilebilmiştir.

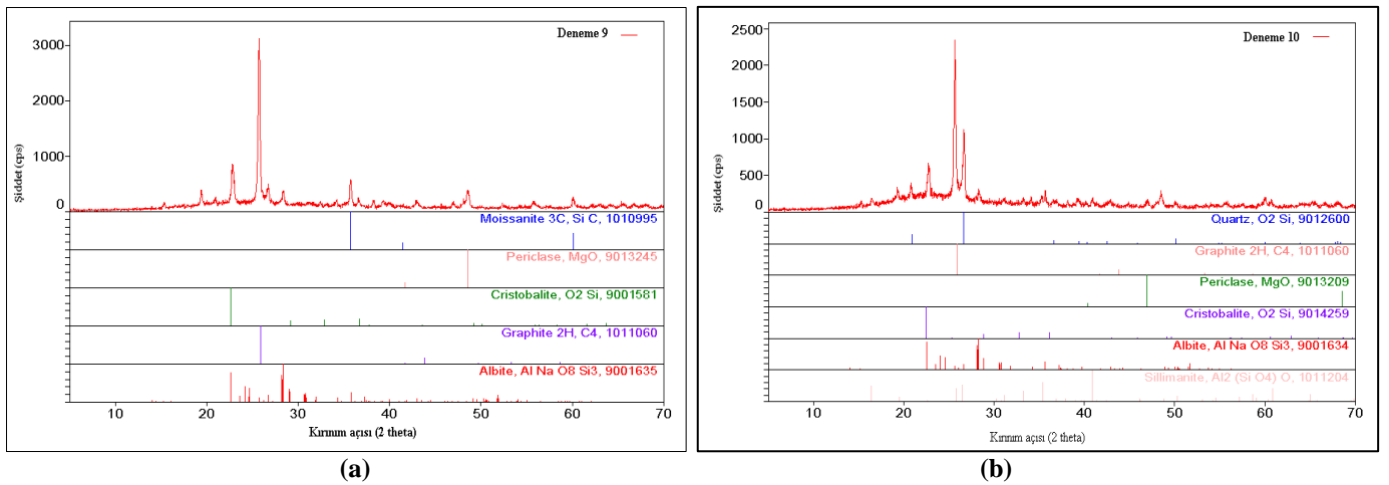


Şekil 1. 1150 °C pişirimi yapılmış numnelere ait görüntüler (a): SMLK 1, (b): SMLK 2, (c): SMLK 3.

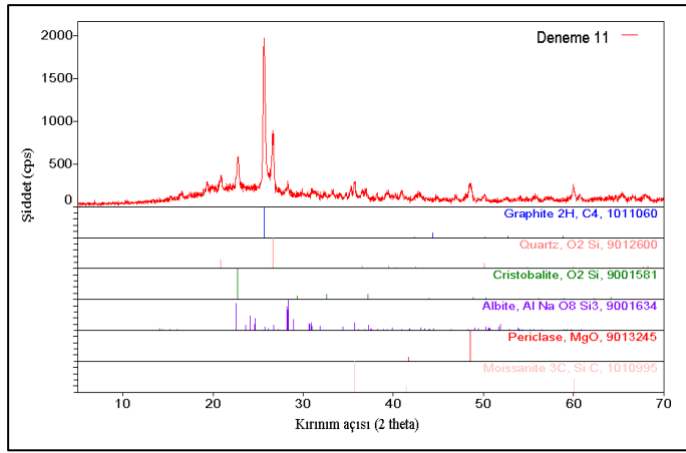
2.1. Faz analizleri (XRD)

1150 °C de pişirimi yapılan numunelerin faz oluşumlarının incelenmesi amacı ile XRD analizi yapılmıştır. Numunelere ait XRD analizi sonuçları Şekil 2 sırasıyla verilmiştir. SMLK 1 bünyesine ait XRD patternini incelendiğinde silisyum karbür, periklas (magnezyum oksit), kristobalit ve albit fazları görülmektedir. SMLK 2 bünyesine ait XRD grafiğine göre bünye kuvars , grafit, periklas, kristobalit ve albit fazları içermektedir. SMLK 3 bünyesi ise grafit, kuvars kristobalit, albit ve periklas fazlarını içermektedir. Seramik bünyelerde albit fazı kalıntı bir faz olarak yapıda bulunmaktadır.(Tarhan ve Tarhan 2019, Tarhan ve Tarhan 2019, Tarhan 2019, Tarhan ve Tarhan 2019). David (2012) ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada 500°C den sonra SiC, grafit benzeri bir tabakanın eşzamanlı oluşumu ile kademeli olarak SiO₂ e dönüştüğü ve daha fazla O₂ varlığında ise, grafit benzeri tabakanın da CO ve CO₂'e daha da oksitlendiğini göstermişleridir. XRD patternleri incelendiğinde özellikle de SMLK 2 Ve SMLK 3 bünyelerinde bu durum tespit edilmiştir. Bu iki bünyede SiC ün oksitlenerek SiO₂ oluşturması ile yüksek oranda amorf yapı meydana geldiği görülmektedir.

Özellikle amorf yapıların gösterdiği karakteristik amorf tümseklik hem SMLK 2 hem de SMLK 3 bünyesinde net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 2. Numunelere ait XRD grafikleri (a): SMLK 1, (b): SMLK 2, (c): SMLK 3

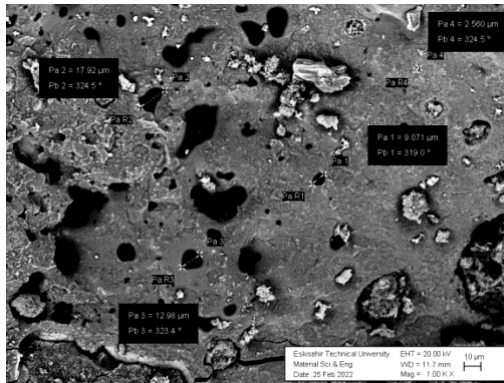


(c)

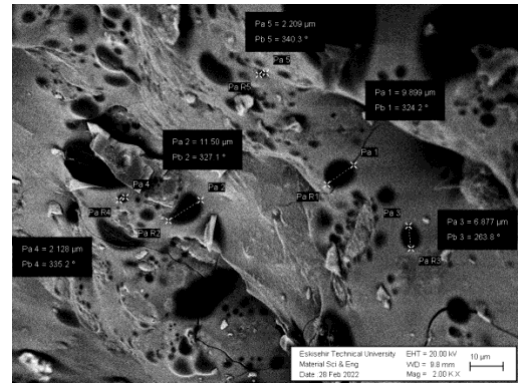
Şekil 2 (devam). Numunelere ait XRD grafikleri (a): SMLK 1, (b): SMLK 2, (c): SMLK 3

2.3. Mikroyapı analizleri (SEM-EDX)

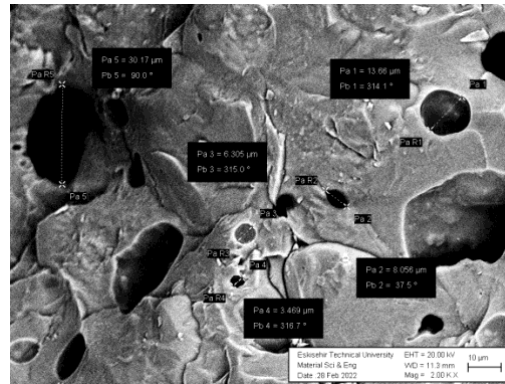
3 farklı reçete kullanarak geliştirilen numunelere taramalı elektron mikroskobu ile geri yansıyan elektronlar kullanılarak mikroyapı incelemesi ve elementel analiz amacı ile de EDX analizi yapılmıştır. Şekil 3 de numunelere ait SEM görüntüleri sunulmuştur. Bu görüntülere göre 3 numunede yüksek oran da porozite içerdiği tespit edilmiştir. Gözenek boyutu ve dağılımı açısından bakıldığında en yüksek gözenek boyutu ve dağılımına sahip numune SMLK 2 bünyesine aittir. Bünyelere ait ortalama por çapı değerler sırası ile 27.22 μm , 36.64 μm ve 12.33 μm 'dir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3. Numunelere ait mikroyapı görüntüleri (a): SMLK 1, (b): SMLK 2, (c): SMLK 3

Tablo 4. Numunelere ait EDX analizi sonuçları

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO
SMLK 1	70.29	10.23	0.97	6.11	1.44	0.52	10.43
SMLK 2	65.52	23.52	-	2.64	1.28	1.20	5.84
SMLK 3	63.61	25.72	2.37	6.49	1.40	-	0.41

3. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada ECE Banyo A.Ş.'den temin edilen vitrifiye geri dönüşüm çamuruna SiC, MgCO₃ ve Li₂CO₃ ilaveleri ile seramik köpük malzemesi üretmek amaçlanmıştır. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar sonucunda görülmüştür ki vitrifiye geri dönüşüm çamurundan ilavelerle beraber yüksek oranda gözenekli ve homojen dağılımlı seramik köpükler elde edilebilmektedir. Üretilen seramik köpüklerin mikroyapı analizlerinden de görüldüğü üzere ortalama gözenek boyutu en düşük olan bünye SMLK 3 bünyesi iken, ortalama gözenek boyutu en yüksek olan bünye SMLK 2 bünyesidir. Faz analizi sonuçlarına göre de SiC'ün bri kısmının fırın atmosferinde ki O₂ ile reaksiyona girerek SiO₂ oluşturduğu düşünülmektedir. XRD patternlerinden de anlaşıldığı gibi SMLK 2 ve SMLK 3 bünyelerinde camsı fazın arttığı tespit edilmiştir.

Referanslar

- Andrei S., Hakim A., Gaurav G., Julite P., Darryl N., Jurijs O.,(2021). Journal of Cleaner Production Volume 282, 124546
- Aydın T., (2018). Development of porous lightweight clay bricks using a replication method, J Aust Ceram Soc., 54:169–175
- Aydın T., (2019). The development of porcelain foams lighter than water for heat isolation application, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry volume 136, pages535–539
- Bin L., Mingxing Z., Hao L., Ming Z., Pengfei X., Leibo D., (2021) Preparation of ceramic foams from ceramic tile polishing waste and fly ash without added foaming agent. Ceramics International 47, 23338–23349.
- Çalışkan, F., Yılmaz, F., & Tatlı, Z. (2015). Silisyum Karbür Esaslı Seramik Köpük Filtre Üretimi. ISITES2015 Valencia –Spain
- David A. N., Debasis S, Hosein F., Michael F., Russo C.T, Adri C. T. (2012), J. Phys. Chem. C. 116, 30, 16111–16121
- Tarhan B. ve Tarhan M. (2019) Çanakkale bölgesi alkali kaynağının seramik sağlık gereçleri bünyesi ısı ve mikroyapı özellikleri üzerine etkisi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, c. 10, sayı. 2, ss. 675-687, Haz. 2019, doi:10.24012/dumf.504331
- Tarhan, M. & Tarhan, B. (2019). Sırlı Porselen Karo Üretimi için Alternatif Hammadde Olarak Eşme/Uşak Feldispatı . Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19 (2) , 429-438. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid/issue/48783/523365>
- Tarhan, M. (2019). Whiteness improvement of porcelain tiles incorporated with anorthite and diopside phases. J Therm Anal Calorim 138, 929–936. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08268-8>
- Tarhan, M., Tarhan, B. (2019). Afyon Kilinin Porselen Karo Bünyelerinde Kullanımının Araştırılması. International Journal of Engineering Research and Development, 11 (1) , 275-281 . DOI: 10.29137/umagd.43330



DC-DC Dönüştürücünün Xilinx Zedboard Zynq-7000 FPGA Tabanlı Değiştir&Gözle Algoritması ile Co-Simülasyonu

Co-Simulation of DC-DC Converter with Xilinx Zedboard Zynq-7000 FPGA Based Perturb&Observe Algorithm

Ebru Doğan¹ , Göksu Görel^{1*} 

¹Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Çankırı Karatekin Üniversitesi, 18100 Çankırı, Türkiye

Başvuru/Received: 17/12/2021

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Bu makalede bir fotovoltaik enerji sisteminde yer alan DA-DA yükseltilen dönüştürücünün değiştir & gözle algoritması ile çalışmasının eş benzetimi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak fotovoltaik bir güç sistemi Simulink ortamında modellenmiştir. Daha sonra farklı iklim koşullarında yük tarafına maksimum güç transferini sağlayacak olan DA-DA yükseltilen dönüştürücü modellenerek kontrolü sağlanmıştır. Tüm sistem Matlab/Simulink ortamında oluşturulmuştur. Enerji sistemin fotovoltaik sistem kısmı ile yükseltilen dönüştürücü, evirici ve yük kısımları Simulink bloklarıyla, değiştir & gözle algoritması ise Xilinx firmasının Matlab için özel olarak oluşturduğu bloklar ile oluşturulmuştur. Bu özel tasarım bloklar sayesinde Field-Programmable Gate Array (FPGA) kart üzerinde eş benzetimi gerçekleştirilmiştir eş benzetim aşamasında değiştir & gözle algoritması FPGA kart içerisinde, diğer kısımlar ise Simulink ortamında çalıştırılmıştır. Kullanılan eş benzetimi özelliği, FPGA kartın klasik yöntemlere göre daha kolay ve hızlı programlanabilmesini ve bir test süreci elde edebilmeyi sağlamıştır. Simülasyon ve eş benzetimi çıkış değerleri karşılaştırıldığında elde edilen değerlerin aynı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

“Değiştir&gözle algoritması, Yükseltilen çevirici, FPGA, Eş benzetim”

Abstract

In this article, a co-simulation of the DC-DC boost converter in a photovoltaic energy system with the perturb & observe algorithm is performed. First, a photovoltaic power system is modeled in the Simulink environment. Then, DC-DC boost converter, which will provide maximum power transfer to the load side in different climatic conditions, is modeled and controlled. The whole system was created in Matlab/Simulink environment. The photovoltaic system part of the energy system and the boost converter, inverter and load parts were created with Simulink blocks, and the perturb & observe algorithm was created with blocks specially created by Xilinx company for Matlab. Thanks to these specially designed blocks, co-simulation was performed on the FPGA card. In the co-simulation phase, the perturb & observe algorithm was run in the FPGA card, while the other parts were run in the Simulink environment. The co-simulation feature used made it possible to program the FPGA card more easily and faster than the classical methods and to obtain a test process. When the simulation and co-simulation output values were compared, it was seen that the obtained values were the same.

Key Words

“Perturb&observe algorithm, Boost converter, FPGA, Co-simulation”

1. Giriş

Dünya üzerindeki enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Artan ihtiyacı karşılayabilmek için güneş, rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaktadır. Ayrıca üretim sistemlerinde güç elektroniği elemanları kullanılarak elde edilen enerjiden en verimli şekilde yararlanabilmek amaçlanmaktadır. Maksimum güç noktası izleyici (MPPT), çeşitli kontrol teknikleri ile kullanılarak enerji üretim sisteminden elde edilen en yüksek gücün yüke aktarılmasını sağlamaktadır.

Atık ısının elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan termoelektrik jeneratörlerin daha verimli enerji üretimi sağlayabilmesi için iç dirençleri ile yük dirençlerinin aynı olması gerekmektedir. Mamur vd. (2019) tarafından yapılan simülasyon çalışmasında dirençlerin arasındaki değer farkını azaltmak için alçaltan-yükselten dönüştürücü ile kullanılan MPPT üzerinde değişir ve gözle (P&O) algoritması oluşturulmuştur. Sonuçta termoelektrik jeneratör sisteminin %98,72 doğruluk oranıyla maksimum güç noktasını takip edebildiği görülmüştür.

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesini sağlayan fotovoltaik (PV) sistemlerde de MPPT kullanılmaktadır. Matlab/Simulink ortamında tasarlanan bir PV sisteminde, alçaltan-yükselten dönüştürücü kullanılarak değişir ve gözle algoritması ve bulanık mantık denetleyici algoritması ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar karşılaştırıldığında bulanık mantık denetleyici algoritmasından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir (Blange vd., 2015).

Güneş enerjisinden, elektrikli araçlar için kullanılan fotovoltaik şarj istasyonları, araçlar üzerinde yerleşik olarak bulunan şarj cihazlarında da yararlanılmaktadır. Cheddadi vd. (2018) çalışmalarında yükselten bir dönüştürücü üzerinde, değiştirilmiş P&O algoritmasını gerçekleştirerek, simülasyonlar ve 32 bitlik ARM mikro denetleyici aracılığıyla test etmişlerdir. Değiştirilmiş P&O algoritmasının oluşturulan sistem için uygun olduğu görülmüştür. Bir fotovoltaik sistemde bulunan yükselten dönüştürücü ile P&O ve değiştirilmiş P&O algoritmaları uygulanmıştır. Algoritmalar, VHDL (Çok Yüksek Hızlı Entegre Devre Donanımı Tanımlama Dili) kullanılarak FPGA (Alanda programlanabilir kapı dizileri) kart üzerine aktarılmıştır. Tasarlanan sistemler Matlab/Simulink ve Psim ortak simülasyonu ile gerçekleştirilerek sonuçları karşılaştırıldığında değiştirilmiş P&O algoritması sistem için daha verimli olmuştur (Baby vd., 2014).

Bir yükselten dönüştürücü üzerinde kayan mod kontrolcüsünün tasarımı Matlab/Simulink ve Xilinx System Generator (XSG) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yükselten dönüştürücü sistemi Simulink blokları ile kayan mod kontrolcü ve PI kontrolcü ise Xilinx System Generator blokları ile oluşturulmuştur. XSG ile oluşturulan sistemin kontrolcü kısmı FPGA kart üzerine aktarılmıştır. Böylece Simulink ile FPGA'nın, sistemin birlikte simülasyonunu gerçekleştirmesi sağlanmıştır. Sonuçta sistemden alınan çıkış değerleri ile beklenen referans değerlerin uygun olduğu gözlenmiştir (Khan vd., 2016). Şebekeye bağlı bir fotovoltaik sistemde kullanılan yükselten dönüştürücü üzerinde çekirge optimizasyon algoritması (GAO) ile bir MPPT oluşturulmuştur. Fotovoltaik sistemin, Simulink ve XSG kullanılarak birlikte simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar daha önce XSG kullanılarak gerçekleştirilmiş olan bazı algoritmalar ile karşılaştırılmış ve uygun değerler elde edilmiştir (Ram vd., 2020). Ay vd. (2019) yükselten dönüştürücü kullanılan bir fotovoltaik sistemde tasarladıkları artan iletkenlik algoritmasının FPGA üzerinde simülasyonlarını sağlamışlardır. Kurulu olarak bulunan bir fotovoltaik santralin değerleri ile Simulink ve XSG kullanarak oluşturdukları tasarımı çalıştırmışlardır. Sistem tasarımından elde edilen DA güç değerleri ile kurulu santralin DA güç değerlerinin aynı olduğu bulunmuştur.

Mohammed vd. (2020) tarafından bir DA mikro şebeke sisteminin kontrolünde P&O algoritmasının kullanıldığı bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Kontrol algoritması FPGA üzerinde, DA mikro şebeke sistemi Simulink'de çalıştırılarak birlikte simülasyon gerçekleştirilmiştir. Farklı ışınlama değerleri altında mikro şebeke sisteminden elde edilen sonuçlar FPGA üzerindeki algoritmanın doğru şekilde kontrol sağladığını göstermektedir. Fotovoltaik sistem üzerinde Rajesh vd. (2014) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise yükseltici dönüştürücü, P&O algoritması ile kontrol edilmektedir. P&O algoritması Xilinx Spartan 3E FPGA kartında çalıştırılmıştır. Simulink ve XSG kullanılarak gerçekleştirilen birlikte simülasyon sonucunda sistemden elde edilen değerler, güneş panelleri kullanılarak yapılan fiziksel deneylerden elde edilen değerler ile karşılaştırılarak uygun olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada bir yükseltici dönüştürücü devresinin MPPT ile kontrolü sağlanmıştır. Kontrol algoritması olarak P&O algoritması kullanılmıştır. Matlab/Simulink ortamında oluşturulan sistem tasarımında, P&O algoritması XSG blokları ile oluşturulmuştur. Bu sayede algoritma Xilinx Zedboard Zynq-7000 FPGA kart üzerinde çalıştırılarak eş benzetimi gerçekleştirilmiştir. Böylece kontrol algoritması fiziksel bir sistem üzerinde kullanılmadan önce test edilebilmiş, gerekli durumlarda üzerinde kolayca değişiklik yapılabilmiş, çalışma zamanlamasının ayarlanması sağlamıştır.

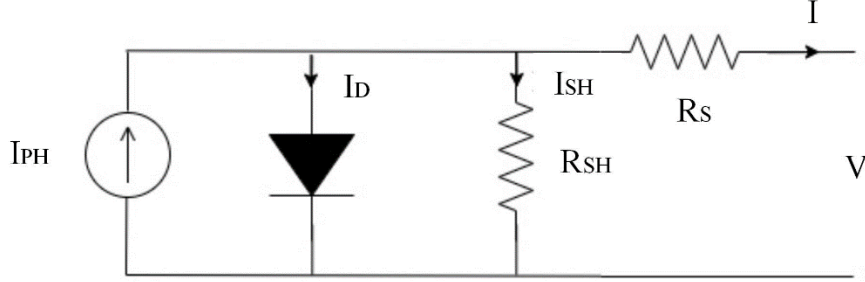
2. Materyal ve Metot

2.1. Fotovoltaik Hücre Modeli

Fotovoltaik hücreler yarı iletken malzemelerden üretilmektedir. N ve p tipi yarı iletkenlerden oluşan fotovoltaik hücreler bir araya geldiklerinde bir bağlantı noktası oluştururlar. Yarı iletkenin n tipi olması üzerinde elektronların çok olduğunu, p tipi olması ise üzerinde boşlukların çok olduğunu göstermektedir. Yarı iletkenler üzerine güneş ışığı geldiğinde, yarı iletkenler arasında oluşan

birleşme bölgesinde bulunan elektronlar hareket etmeye başlamaktadır. Bunun sonucunda her iki yarı iletken için de yük dengesi sağlanana kadar elektronlar ile boşluklar yer değiştirerek elektriksel akım ve gerilim oluşturmaktadır (Adak vd., 2019, Mühendis 2020).

Fotovoltaik hücrelerden elde edilen akım ve gerilim değerlerinin incelenebilmesi için elektriksel eşdeğer devresi kullanılmaktadır. Fotovoltaik hücreler güneş ışığı etkisi altında bulunmadığında diyot gibi davranış göstermektedir (Karanfil vd., 2016, İşen vd., 2019). Bir fotovoltaik hücreye ait eşdeğer devre Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Fotovoltaik hücre eşdeğer devresi

Eşdeğer devreye ait akım ve gerilim değerlerinin matematiksel modeli aşağıda bulunan eşitlikler ile gösterilmektedir. Fotovoltaik hücrenin iç kayıplarını temsil etmek için eşdeğer devrede R_S seri direnci ve R_{SH} paralel direnci kullanılmaktadır. Eşitliklerde bulunan I_{PH} güneş ışığı etkisiyle oluşan foton akımını, I_D diyot akımını, I çıkış akımını ve I_{SH} paralel direnç üzerindeki akımı göstermektedir. V hücrenin çıkış gerilim değerini, V_D ise diyot gerilim değerini vermektedir. I_S diyotun doyma akımını, n ise diyotun kalite faktörünü temsil etmektedir. T değeri fotovoltaik hücrenin sıcaklığını, V_T sıcaklık ile oluşan gerilimi, k Boltzmann sabitini ($1,38065 \cdot 10^{-23}$ J/K), q ise elektron yükü ($-1,602 \cdot 10^{-19}$ C) değerini göstermektedir (Yasko, 2018).

$$I_{PH} - I_D - (I + I_{SH}) = 0 \quad (1)$$

$$I_{SH} = \frac{V + R_S I}{R_{SH}} \quad (2)$$

$$I_D = I_S \left[e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right] \quad (3)$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (4)$$

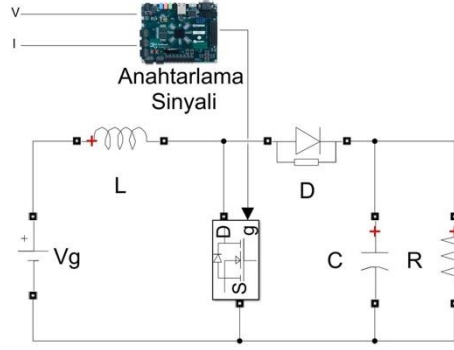
$$V_D = V + R_S I \quad (5)$$

$$I = I_{PH} - I_S \left[e^{\frac{q(V+R_S I)}{nkT}} - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_{SH}} \quad (6)$$

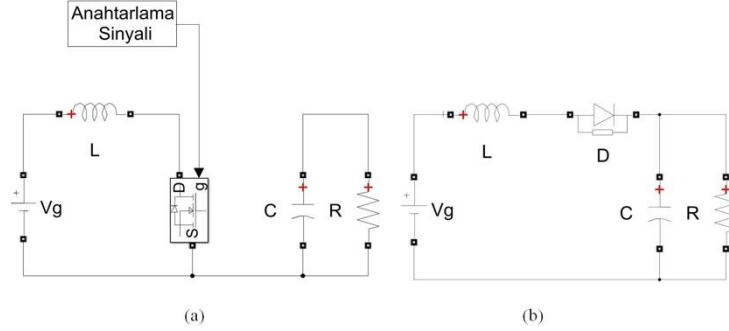
2.2. Yükselten DA-DA Dönüştürücü

Yükseltici dönüştürücüler girişe uygulanan gerilim değerini çıkışta yükselten devrelerdir. Yükselten dönüştürücü genel devre şeması Şekil 2’de görülmektedir.

Devre, üzerinde bulunan anahtarın iletme veya kesime geçme durumuna göre farklı şekillerde çalışmaktadır. Şekil 3 (a)’da bulunan durumda yükseltici devresinde anahtarlama elemanı iletimde diyot ise kesimdedir. Bu durumda endüktans V_g kaynağı tarafından, yük ise kondansatör tarafından beslenmektedir. Şekil 3 (b)’de anahtarlama elemanının kesimde olduğu durumda ise diyot iletimdedir. V_g kaynağı ve ilk durumda endüktansta biriken enerji tarafından yük beslenmektedir. Bu durumda çıkış geriliminin değeri giriş geriliminden daha yüksek olmaktadır.



Şekil 2. Yükselten dönüştürücü devre şeması



Şekil 3. Anahtarlama elemanı durumları: (a) diyot kesimde (b) diyot iletimde

Dönüştürücü kararlı durumda iken V_c çıkış gerilimi, I_g giriş akımı ve I_L endüktans akımı eşitlikleri aşağıda verilmektedir. Burada D görev oranını, V_g giriş gerilimini, I_c çıkış akımını göstermektedir (Bodur, 2012).

$$V_c = \frac{1}{1-D} V_g \quad (7)$$

$$I_g = \frac{1}{1-D} I_c \quad (8)$$

$$I_L = I_g \quad (9)$$

I_L endüktans akımındaki dalgalanma ise aşağıdaki eşitlik ile verilmektedir. Eşitlikteki f_p çalışma frekansını L ise endüktans değerini vermektedir (Bodur, 2012).

$$\Delta I_L = D(1-D) \frac{V_c}{f_p L} \quad (10)$$

2.3. FPGA (Field-Programmable Gate Array)

Alanda programlanabilir kapı dizileri (FPGA) kısaca istenilen amaca göre bağlantı yapısı değiştirilebilen entegrelerdir. Günümüzde tıp elektronığı, savunma sanayi, test ve ölçüm cihazları, bilgisayarlar, otomobiller, akıllı telefonlar, kablolu ve kablosuz iletişim cihazları gibi çok çeşitli uygulamalarda FPGA'lar kullanım alanı bulmaktadır (Saritaş vd., 2015).

FPGA'nın kullanıldığı fiziksel sistem üzerinde istenildiği zaman yeniden programlanabilmesi alanda programlanabilir olma özelliğini göstermektedir. Bu özelliğinin yanında hızlı ve paralel işlem yapabilmesi, oluşturulan programın kart üzerine aktarılmadan önce test edilebilmesine olanak sağlaması ve gerekli durumlarda FPGA içerisine işlemci gömülebilmesi gibi özellikleri bu cihazın endüstride ve akademiye kullanımının oldukça fazla olmasını sağlamıştır (Saritaş vd., 2015, Yıldırım vd., 2012).

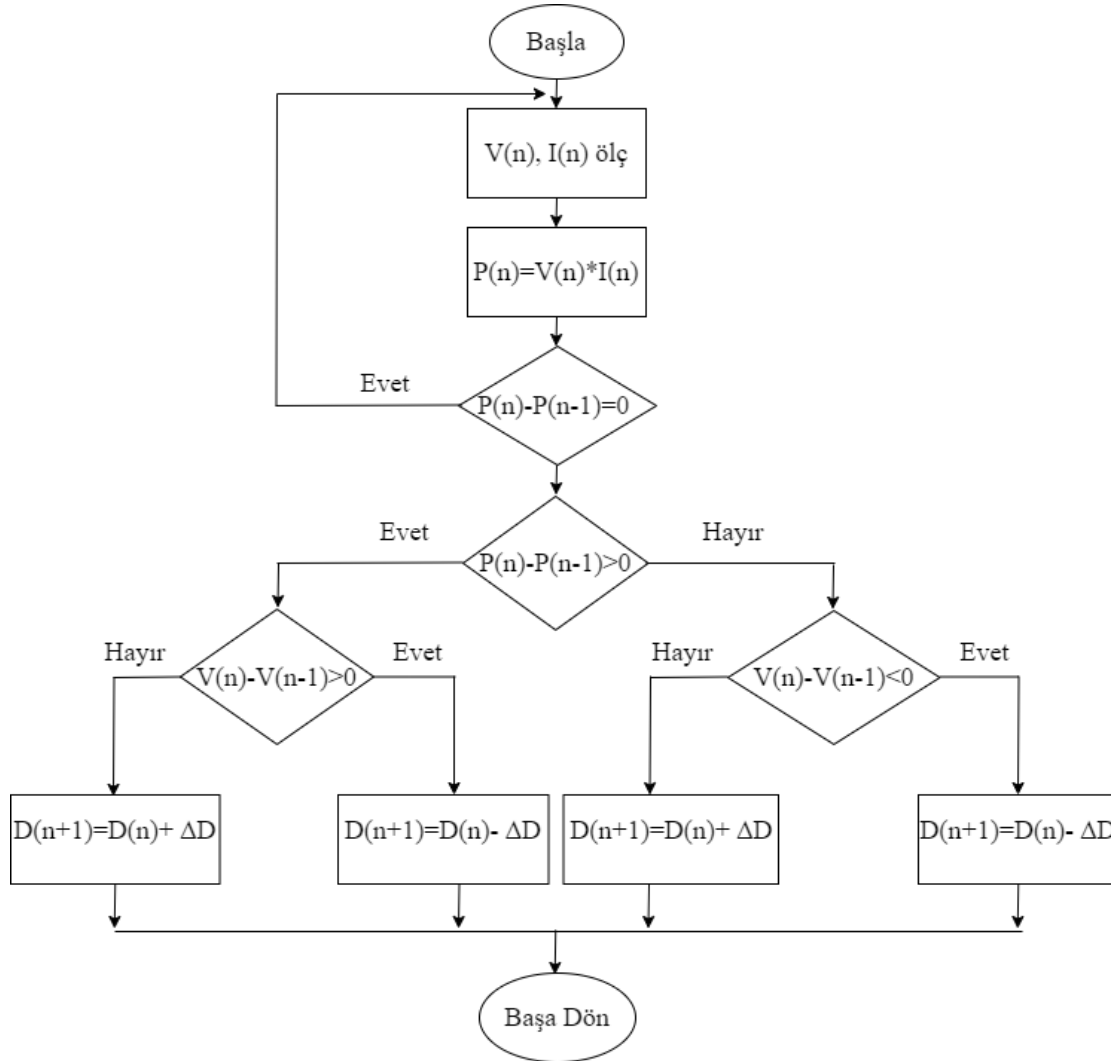
FPGA genel olarak giriş-çıkış blokları, mantık blokları (lojik bloklar) ve bu bloklar arasında bulunan ara bağlantılardan oluşmaktadır. Giriş-çıkış blokları FPGA'nın dış ortam ile bağlantısını sağlamaktadır (Saritaş vd., 2015). Mantık blokları uygulanmak istenen işleme göre programlanabilmektedir ve yine programlanabilen ara bağlantılar sayesinde birbirleri ile bağlanarak FPGA'yı kullanım için hazır duruma getirmektedir (Yıldırım vd., 2012).

FPGA'nın programlanabilmesi için bir donanım tanımlama dili olan VHDL (Çok Yüksek Hızlı Entegre Devre Donanımı Tanımlama Dili) kullanılmaktadır. VHDL, fiziksel olarak tasarımı gerçekleştirilecek olan bir sistemin davranışını tanımlamak için kullanılmaktadır (Yıldırım vd., 2012). VHDL 1987 yılında IEEE tarafından standart olarak kabul edilen bir dildir (Sarıtış vd., 2015). Günümüzde VHDL'nin yanında Verilog da yaygın olarak kullanılan bir donanım tanımlama dilidir.

2.4. Değiştir & Gözle (P&O) Algoritması

Enerji üretim sistemlerinden üretilen güç en az kayıp ile kullanılmak istenmektedir. Bu nedenle güç elektroniği elemanlarından olan MPPT enerji üretim sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. MPPT sistemden elde edilebilecek en yüksek miktardaki gücü sağlamak için çeşitli kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Bu kontrol sistemlerinin en önemlilerinden biri ise değiştir & gözle algoritmasıdır. P&O algoritması az değişken içermesi ve kolay uygulanabilir olması ile en çok tercih edilen kontrol yöntemlerinden biridir.

Fotovoltaik sistemlerde ortam sıcaklığı ve ışınım miktarı hava şartlarına göre değişiklik göstermektedir. Değişken hava şartları karşısında PV sistemden elde edilen akım ve gerilim değerleri de değişmektedir. Böyle bir durumda P&O algoritması kullanılarak PV sistemin kontrolü sağlanabilmektedir. P&O algoritmasının akış şeması Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Değiştir&gözle algoritması

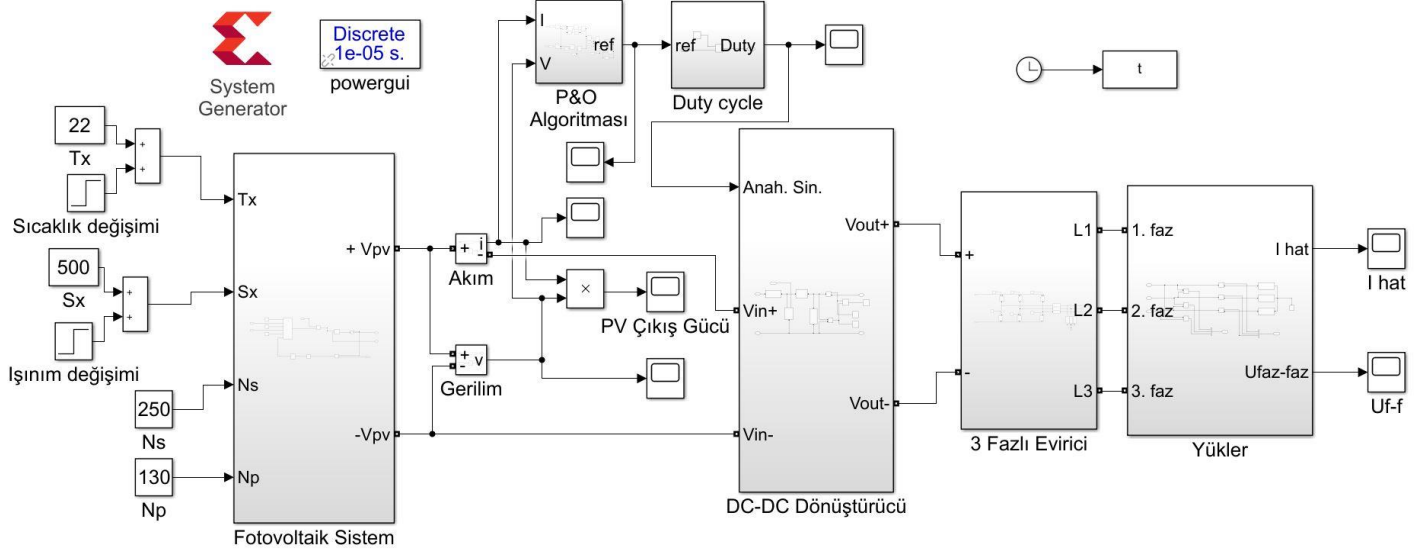
P&O algoritmasında ilk olarak panelden elde edilen akım ve gerilim değerleri ölçülmektedir ve ardından ölçülen bu değerler ile panel gücü ($P_{(n)}$) değeri hesaplanmaktadır. $P_{(n)}$ değeri $P_{(n-1)}$ değerine eşit ise döngü çalışmadan başa döner. Eğer $P_{(n)}$ değeri $P_{(n-1)}$ değerinden büyük ise ve $V_{(n)}$ değeri $V_{(n-1)}$ değerinden büyük ise doluluk oranı (D) azaltılır ancak $V_{(n)}$ değeri $V_{(n-1)}$ değerinden küçük ise doluluk oranı artırılır. Eğer $P_{(n)}$ değeri $P_{(n-1)}$ değerinden küçük ise ve $V_{(n)}$ değeri $V_{(n-1)}$ değerinden küçük ise doluluk oranı azaltılır ancak $V_{(n)}$ değeri $V_{(n-1)}$ değerinden büyük ise doluluk oranı artırılır (Altıntaş vd.,2021).

2.5. Eş Benzetim

Xilinx System Generator (XGS), Xilinx firması tarafından Matlab/Simulink için oluşturulmuş özel bloklar sağlamaktadır. Bu bloklar sayesinde VHDL kodlama yapmadan sadece Simulink ortamında bulunan XSG blokları ile FPGA’da kullanılacak olan program oluşturulabilmektedir. Simülasyon tasarlanırken kullanılan Simulink bloklarına XSG’ye ait olan bloklar da eklenebilmektedir. XSG blokların eklenmesi ile karta yüklenecek olan program görsel olarak tasarlanabilmektedir.

Simülasyonda XSG blokları ile tasarlanmış olan algoritma FPGA içerisine yüklenebilmektedir. Tasarlanan algoritmanın, simülasyon gerçekleştirildiği sırada kart içinde çalışmasına eş benzetimi denilmektedir. Böylece simülasyon hızı artmaktadır ve algoritmanın kart içerisinde çalışması test edilebilmektedir (Ay vd., 2019).

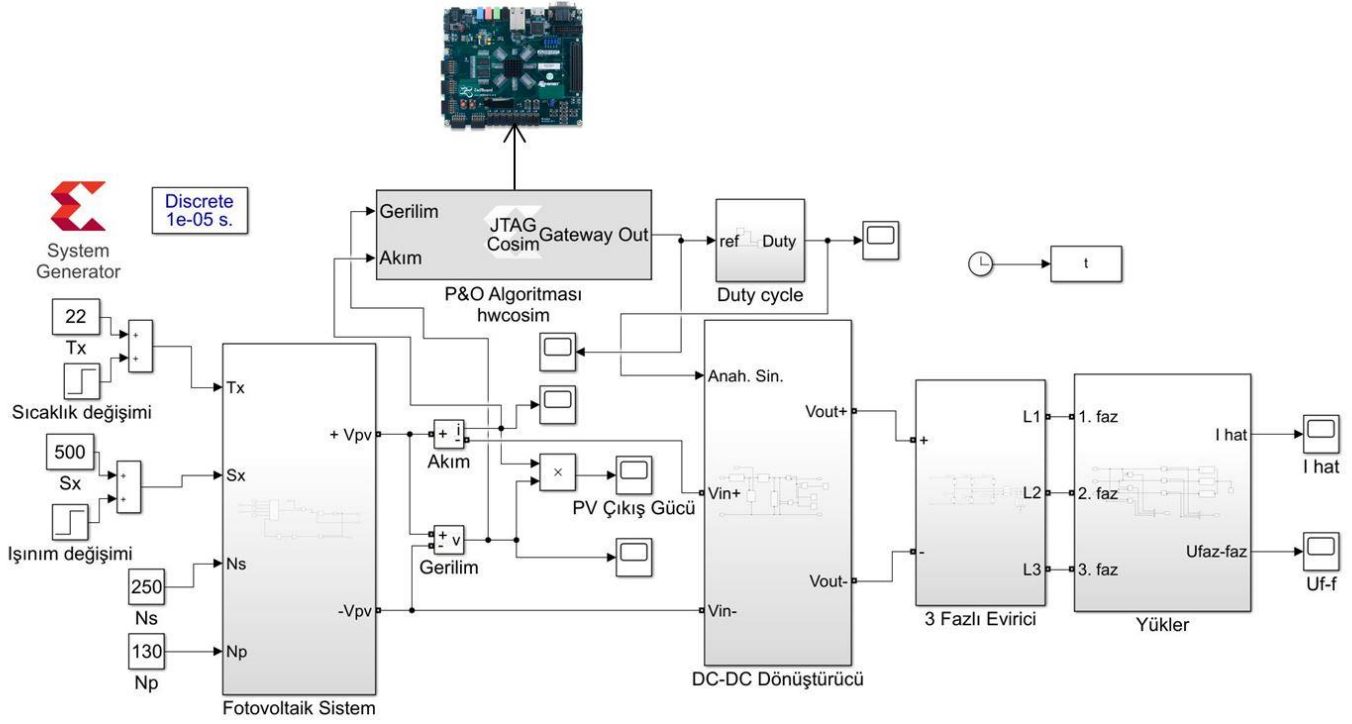
Bu çalışmada tasarlanmış olduğumuz sistemin genel devre şeması aşağıda Şekil 6’da verilmektedir.



Şekil 6. Tasarlanan devre simülasyonu

Simülasyon devresi ilk olarak Matlab/Simulink ortamında tasarlanmıştır. Fotovoltaik sistem, duty cycle, DA-DA dönüştürücü, 3 fazlı evirici ve yükler alt sistemlerinin oluşturulmasında Simulink blokları, P&O algoritmasının olduğu alt sistemin oluşturulmasında ise Xilinx System Generator blokları kullanılmıştır. System Generator blokları içerisinde bulunan IN ve OUT isimli bloklar ile Simulink bloklarına bağlanabilmektedir. Böylece devrenin Simulink ortamında tasarımı gerçekleştirilip çalıştırılabilmektedir. Fotovoltaik sisteme sabit olarak girilen N_s seri hücre sayısı ve N_p paralel hücre sayısı değerleri ile değişken olarak girilen T_x sıcaklık ve S_x ışınım değerleri sonucunda fotovoltaik sistem akım ve gerilim değerleri üretmektedir. Fotovoltaik sistemden elde edilen akım ve gerilim değerleri P&O algoritmasının giriş değerlerini oluşturmaktadır. P&O algoritması fotovoltaik sistemden yükselten dönüştürücüye aktarılacak en yüksek güç değerinin elde edilmesini sağlayacak kontrolcü görevi görmektedir. P&O algoritması uygulandıktan sonra elde edilen değer duty cycle alt sistemine aktarılarak anahtarlama sinyali oluşturulmaktadır. Anahtarlama sinyali DA-DA yükselten dönüştürücünün çalışması için gerekli olan tetikleme sinyalidir. Yükselten dönüştürücüde bulunan anahtarlama elemanının gate girişine uygulanan tetikleme sinyali sonucu çevirici girişinden alınan gerilim değeri artırılarak dönüştürücü çıkışına aktarılmaktadır. 3 fazlı evirici alt sisteminin amacı dönüştürücüden elde edilmiş olan DA sinyali AA sinyale çevirmektir. Böylece devre çıkışında bulunan AC yük beslenerek simülasyonun çalışması tamamlanmaktadır.

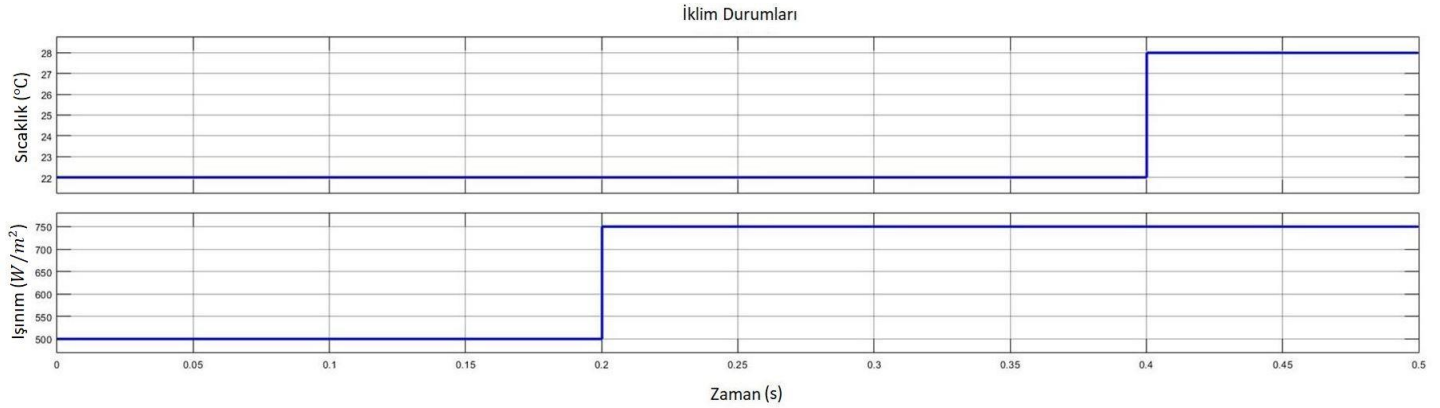
Eş benzetimi aşamasında ise devrenin kontrolünü sağlayan P&O algoritması FPGA kart içerisine aktarılmaktadır. Bunun için simülasyon dosyasına eklenen kırmızı renkli System Generator bloğu kullanılarak P&O algoritmasının bulunduğu sistem, FPGA kart içerisinde çalıştırılabilecek olan özel bir bloğa dönüştürülür ve simülasyondaki diğer bloklar ile bağlantısı sağlanır. Ardından FPGA bilgisayara bağlanıp simülasyon dosyası çalıştırıldığında oluşturulmuş olan yeni bloktaki bilgiler kart içinde çalışacak olan kod bilgilerine dönüştürülerek kart üzerine aktarılmaktadır. Eş benzetimi gerçekleştirilirken fotovoltaik sistem çıkışında elde edilen değerler FPGA karta gönderilmektedir. Kart içerisinde P&O algoritmasına göre hesaplanan yeni değerler tekrar Simulink ortamına aktarılarak duty cycle alt sistemi için giriş değerini oluşturmaktadır. Sonuçta P&O algoritması FPGA içinde çalışırken aynı zamanda diğer bloklar Simulink ortamında çalışmaktadır ve böylece eş benzetimi gerçekleştirilmektedir. Eş benzetimi çalışmasına ait devre tasarımı Şekil 7’de gösterilmektedir.



Şekil 7. Eş benzetimi devresi

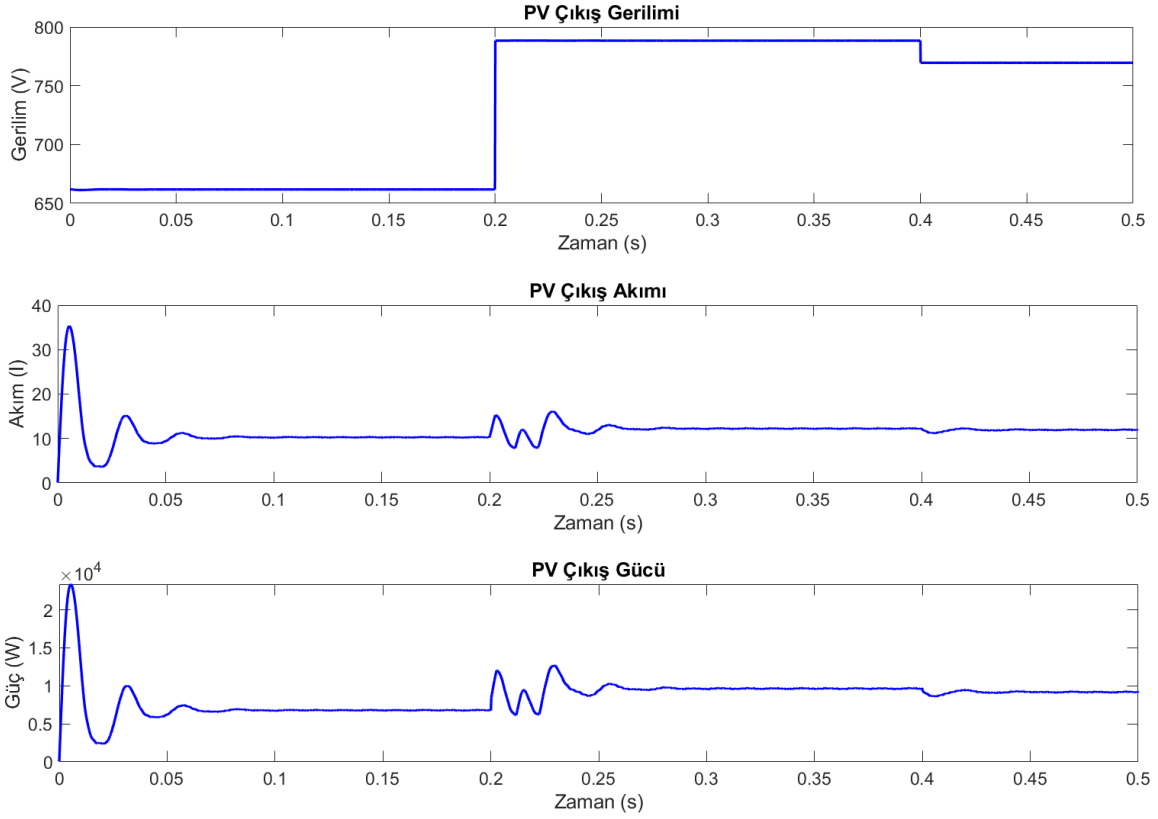
3. Bulgular

Bu çalışmada simülasyon ve eş benzetimi işlemleri $t = 0.5$ s süresinde gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan fotovoltaik enerji sisteminin farklı iklim koşulları altında çalışmasını inceleyebilmek için giriş olarak değişken sıcaklık ve ışınım değerleri uygulanmıştır. Sıcaklık değeri 22°C 'den başlamış $t = 0.4$ s'de 28°C 'ye yükseltilmiştir. Işınım değeri ise $500 \text{ W}/\text{m}^2$ değerinden başlayıp $t = 0.2$ s'de $750 \text{ W}/\text{m}^2$ değerine yükseltilmiştir. Uygulanan sıcaklık ve ışınım değerlerindeki değişimler Şekil 8'de gösterilmektedir.

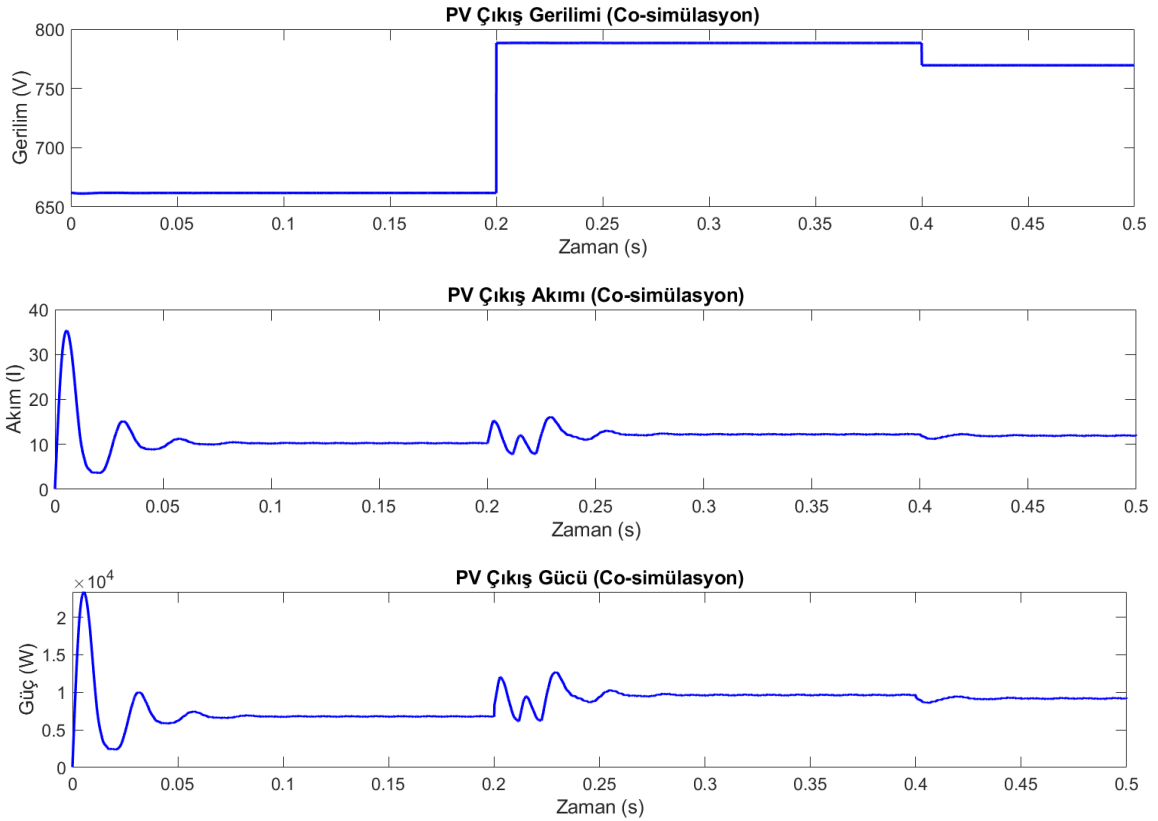


Şekil 8. Fotovoltaik sistem girişine uygulanan sıcaklık ve ışınım değerleri

Fotovoltaik sistem girişine uygulanan farklı sıcaklık ve ışınım değerleri sonucunda sistem çıkışında elde edilen gerilim, akım ve güç değerlerinin değişimi Şekil 9'da verilmektedir. Buna göre $t = 0.2$ s'de ışınım değeri yükseldiğinde fotovoltaik sistemin çıkış geriliminin yükseldiği, $t = 0.4$ s'de sıcaklık değeri yükseldiğinde fotovoltaik sistemin çıkış gerilim değerinin azaldığı görülmektedir. Simülasyonda fotovoltaik sistemin ortalama çıkış gerilim değeri 734 V olarak ölçülmektedir. Sıcaklık ve ışınım değişimleri sonucunda fotovoltaik sistemin çıkış akım ve güç değerlerinde de dalgalanmalar görülmektedir. Fotovoltaik sistemin ortalama çıkış akımı 11.59 A , ortalama çıkış güç değeri ise 8539 W olarak ölçülmüştür. Şekil 9'dan eş benzetimi sonuçlarında da fotovoltaik sistemin çıkış gerilim, akım ve güç değerlerinin simülasyon sonuçları ile aynı olduğu görülmektedir.



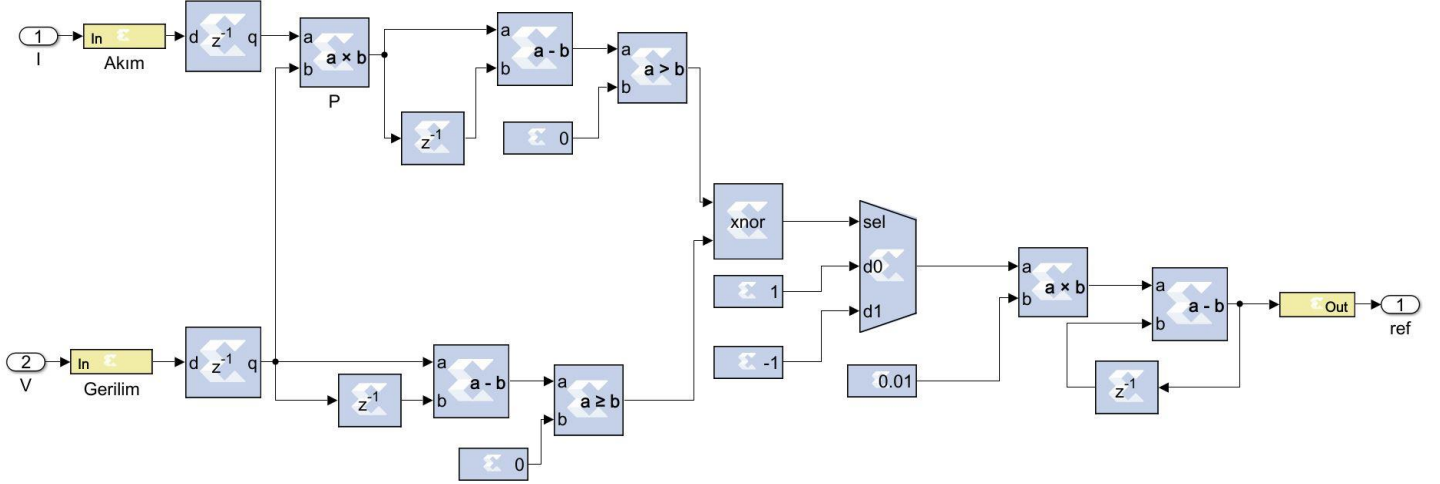
(a)



(b)

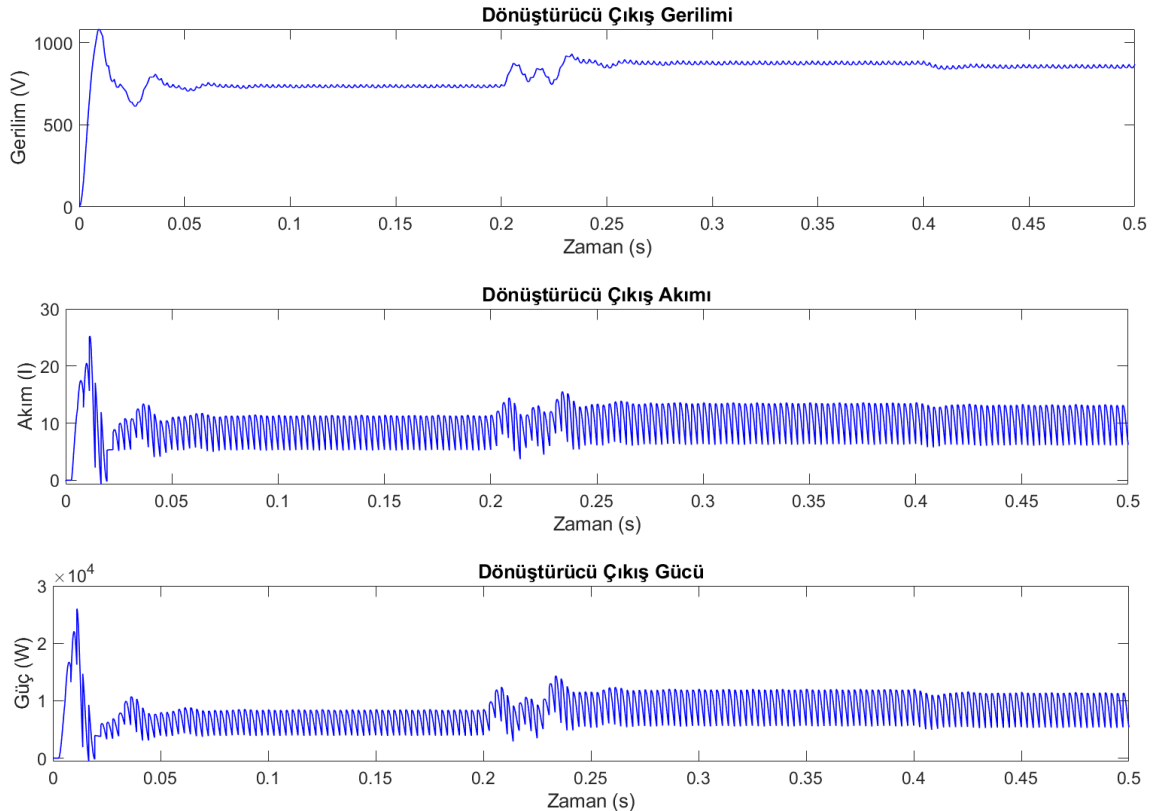
Şekil 9. Fotovoltaik Sistem alt sisteminin çıkış gerilim, akım ve güç değerleri (a) Simülasyon (b) Eş benzetimi

Fotovoltaik sistem çıkışında elde edilen akım ve gerilim değerleri DA-DA yükselten dönüştürücü girişine aktarılırken aynı zamanda P&O algoritması için de giriş değerlerini oluşturmaktadır. P&O algoritması ilk olarak Simulink ortamında Xilinx System Generator blokları ile hazırlanan tasarımda çalıştırılmış ve yükselten dönüştürücünün kontrolü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yükselten dönüştürücünün çıkış akım ve gerilim değerlerinde meydana gelen değişime bakıldığında, fotovoltaik sistemin çıkış akım ve gerilim değerlerindeki değişimi takip ettiği görülmektedir. Bu durum P&O algoritmasının kontrol görevini başarılı şekilde yerine getirdiğini göstermektedir. Xilinx System Generator blokları ile tasarlanan P&O algoritması Şekil 10'da görülmektedir.

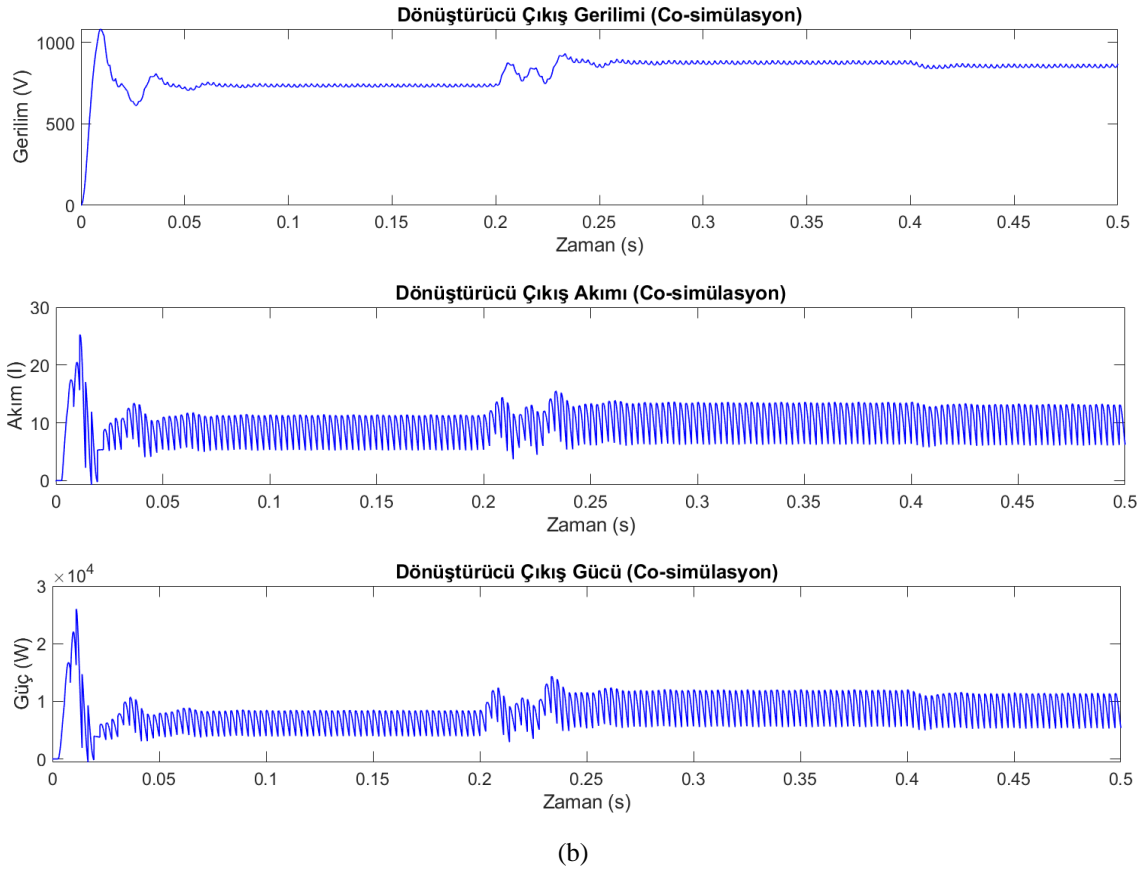


Şekil 10. Xilinx System Generator blokları ile tasarlanan P&O algoritması

Simulink ortamındaki tasarımın doğrulanmasının ardından, P&O algoritması, eş benzetimi aşamasında FPGA kart üzerinde çalıştırılmak için System Generator bloğu kullanılarak yeni bir blok şekline dönüştürülmüştür. Yeni oluşturulan blok Simulink ortamında diğer bloklarla beraber simülasyon aşamasında çalışmamaktadır. Sadece FPGA ile eş benzetimi yapılacağı zaman, kart ile bilgisayar bağlantısı yapıldığında kullanılabilir.



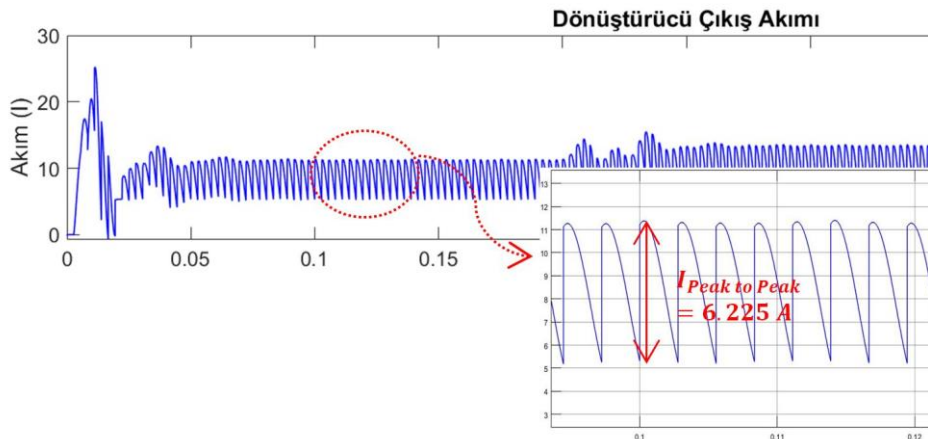
(a)



Şekil 11. DA-DA yükselten dönüştürücü çıkış gerilim, akım, güç değerleri (a) Simülasyon, (b) Eş benzetimi

Oluşturulan yeni bloğun Simulink ortamındaki diğer bloklarla bağlantısının yapılmasının ardından FPGA kart bilgisayara bağlanmıştır. Tasarım çalıştırılarak oluşturulan bloktaki kodların FPGA karta aktarılması sağlanmıştır. Böylece tasarımda bulunan Simulink blokları Matlab ortamında çalıştırılırken, P&O algoritması FPGA kart üzerinde çalıştırılarak eş benzetimi gerçekleştirilmektedir. eş benzetimi sonucunda yükselten dönüştürücü çıkışında elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri ile Xilinx System Generator blokları kullanılarak, Simulink ortamında gerçekleştirilen simülasyon sonucunda elde edilen değerlerin aynı olduğu görülmüştür. Şekil 11’de bu değerler görülmektedir.

DA-DA yükselten dönüştürücünün ortalama çıkış gerilim değeri $809.9 V$, ortalama çıkış akım değeri $10.09 A$ ve ortalama çıkış güç değeri $8304 W$ olarak ölçülmüştür. Fotovoltaik sistemin çıkış akım ve güç değerlerinin, yükselten dönüştürücünün çıkış akım ve güç değerlerinden büyük olması dönüştürücüde kullanılan devre elemanları üzerinde harcanan güçten kaynaklanmaktadır. Ancak çıkış gerilim değerlerine bakıldığında dönüştürücünün çıkış değeri fotovoltaik sistemden daha büyüktür. Bu da yükselten dönüştürücünün doğru çalıştığını göstermektedir.



Şekil 12. Yükselten dönüştürücü çıkış akımı Peak to Peak değeri

DA-DA dönüştürücü devrelerinde, ilgili girişe gelen anahtarlama sinyali sonucunda aktif olan anahtarlama elemanları bulunduğu için çıkışlarında ölçülen değerler salınım göstermektedir. Şekil 12 yükselten dönüştürücü çıkış akımının $0.1\text{ s} - 0.11\text{ s}$ aralığındaki Peak to Peak (Tepeden tepeye) değerini göstermektedir. Belirtilen zamandaki $I_{Peak\ to\ Peak}$ akım değeri 6.225 A 'dır.

Simülasyon ve eş benzetimi sonucunda elde edilen fotovoltaiik sistem ve yükselten dönüştürücü çıkış değerleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. Simülasyon ve eş benzetimi sonucunda elde edilen değerlerin aynı olduğu gözükmektedir.

Tablo 1. Simülasyon ve eş benzetimi sonucu elde edilen çıkış değerleri

	RMS değeri	Mean değeri
PV çıkış akımı	11.95 A	11.59 A
PV çıkış gücü	8824 W	8539 W
PV çıkış gerilimi	736.4 V	734 V
Dönüştürücü çıkış akımı	10.47 A	10.09 A
Dönüştürücü çıkış gücü	8749 W	8304 W
Dönüştürücü çıkış gerilimi	815.1 V	809.9 V

4. Sonuç

Bu makalede bir DA-DA yükselten çeviricinin P&O algoritması ile kontrolünün simülasyonu ve eş benzetimi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle bir fotovoltaiik sistem tasarlanmıştır. Ardından yükselten dönüştürücü tasarlanarak, fotovoltaiik sistemden en yüksek güç verimini sağlayabilmek için bir MPPT kontrol algoritması ile birlikte kullanılmıştır. Kontrol için kullanılan P&O algoritması önce Xilinx System Generator blokları ile tasarlanmıştır. Matlab/Simulink ortamında tasarlanmış olan fotovoltaiik enerji sisteminin diğer birimleri ile bağlantısı sağlanarak simülasyon gerçekleştirilmiştir. Ardından kırmızı renkli System Generator bloğu kullanılarak, çeşitli Xilinx System Generator blokları ile oluşturulmuş olan P&O algoritması dönüştürülmüştür. Dönüştürme işlemi sonucunda FPGA içerisinde kullanılabilecek yeni bir blok oluşturulmuştur. Bu bloğun Simulink blokları ile bağlantısının sağlanmasının ardından FPGA ile bilgisayar arasında bağlantı kurulmuştur. FPGA kartı bilgisayara bağlandıktan sonra simülasyon dosyasının çalıştırılması sonucunda P&O algoritması blokları kod yapısına dönüştürülerek FPGA üzerine aktarılmıştır. P&O algoritması FPGA üzerinde çalışırken diğer bloklar Simulink programında çalışarak eş benzetimi gerçekleştirmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığından simülasyon ile eş benzetimi sonuçlarının aynı olduğu görülerek eş benzetimin doğruluğu sağlanmıştır. Eş benzetimi karmaşık kodlar ile uğraşmadan bloklar ile FPGA'nın kolayca programlanabilmesini sağladığı, oluşturulan tasarımların fiziksel bir sistem üzerinde kullanılmadan önce test edilebilmesine ve düzeltilebilmesine olanak verdiği için ve hem programlama hem test aşamasında zaman tasarrufu sağladığı için sistem tasarımında oldukça fayda sağlamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma Çankırı Karatekin Üniversitesi BAPK tarafından desteklenmiştir (Proje no: MF210621L10).

Referanslar

- Adak, S., Cangi, H., & Yılmaz, A. S. (2019). Fotovoltaiik Sistemin Çıkış Gücünün Sıcaklık ve Işımaya Bağlı Matematiksel Modellemesi ve Simülasyonu. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 11(1), 316-327.
- Altıntaş, N., Yılmaz, A., Demirci, A., & Tercan, S. M. (2021). Bataryalı PV Sistemlerde Maksimum Güç Noktası Takip Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (21), 369-377.
- Ay, S., & Arserim, M. A. (2019). Maksimum Güç Noktası İzleyicisinde Kullanılan Artan İletkenlik Algoritmasının FPGA Tabanlı Gerçeklenmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(1), 113-120.
- Baby, J., & Varghese, J. M. (2014). Implementation of Variable Step Size MPPT Controller for Photovoltaic System on FPGA Circuit. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, 3(6), 320-326.
- Blange, R., Mahanta, C., & Gogoi, A. K. (2015). MPPT of Solar Photovoltaic Cell Using Perturb & Observe and Fuzzy Logic controller Algorithm for Buck-Boost DC-DC Converter. 2015 International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE). Shillong, India: IEEE.
- Bodur, H. (2012). *Güç Elektroniği*. İstanbul: Birsan Yayınevi.
- Cheddadi, Y., Errahimi, F., & Najia, E. (2018). Design and verification of photovoltaic MPPT algorithm as an automotivebased embedded software. *Solar Energy*, 171, 414-425.

- İşen, E., & Koçhan, Ö. (2019). Fotovoltaik Panelin Tek Diyotlu Modellenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırma Dergisi*, 2(1), 1-10.
- Karafil, A., Özbay, H., & Kesler, M. (2016). Sıcaklık ve Güneş Işınım Değişimlerinin Fotovoltaik Panel Gücü Üzerindeki Etkilerinin Simülasyon Analizi. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*.
- Khan, H. S., & Memon, A. Y. (2016). FIL simulation of sliding mode controller for DC/DC boost converter. 2016 13th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST). Islamabad, Pakistan: IEEE.
- Mamur, H., & Çoban, Y. (2020). Termoelektrik jeneratörler için alçaltan-yükselten çeviricili maksimum güç noktası takibi benzetimi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(5), 916-926.
- Mohammed, S. S., & Syji, B. M. (2020). Energy Management of a Standalone Low Voltage DC Microgrid Using FPGA Based Controller. *Journal of Green Engineering (JGE)*, 10(5), 1984-2005.
- Mühendis, A. (2020, Temmuz). Maksimum Güç Noktası İzleyicili Fotovoltaik Sistemin Labview Tabanlı Kontrolü ve İzlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Konya: Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Rajesh, P., Rajasekar, S., Rajesh, G., & Samuel, P. (2014). Solar Array System Simulation using FPGA with Hardware Co-Simulation. 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (s. 2291-2296). Istanbul, Turkey: IEEE.
- Ram, B. V., & Chidambararaj, N. (2021). Grasshopper optimization algorithm utilized Xilinx controller for maximum power generation in photovoltaic system. *Evolving Systems*, 12, 885-898.
- Sarıtaş, E., & Karataş, S. (2015). Her Yönüyle FPGA ve VHDL. Ankara: Palme Yayınevi.
- Yasko, M. A. (2018). Fotovoltaik Sistemlerde Düşürücü Tip DA-DA Dönüştürücülü Maksimum Güç Noktası İzleyicisinin Analizi, Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli: Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yıldırım, Ö., Erişti, B., Erişti, H., & Demir, Y. (2012). Gerçek Zamanlı Akım ve Gerilim Sinyallerinin İzlenmesi için FPGA Tabanlı Bir Sistem Tasarımı. *ELECO '2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, (s. 654-658). Bursa.



A Real-Time Invoice Based Smart Meter Design with Mobile Application

Mehmet Güçyetmez¹ , Husham Sakeen Farhan² 

¹Department of Electrical-Electronic Engineering, Sivas University of Science and Technology, 58100, Sivas, TURKEY

²Department of Electrical-Electronic Engineering, Kırşehir Ahi Evran University, 40100, Kırşehir, TURKEY

Başvuru/Received: 14/12/2021

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Abstract

The energy consumption issue has become one of the significant problems that are given great attention by The governments, especially in the case of energy generation being less than required. It also has importance because of the rapid growth in the population and development and the dependence of millions of people on electric energy in their daily lives. In order to ensure the continuity of energy, it is necessary to regulate electricity consumption by providing the necessary real-time data to consumers. Currently, real-time data on energy consumption and information on the appropriate consumption time are not fully available for consumers. In addition, data is read manually at the end of each month to provide monthly invoices, a workforce is needed to complete this work, and errors occur due to human intervention. The proposed real-time invoice-based smart meter system is a measuring device to automatically read the data and provide the consumer with information on the energy consumed per hour, day, and month. The device helps the consumer choose the most suitable time for energy consumption and predicts the time when the amount of energy consumed exceeds the desired power.

Key Words

“Energy consumption, Real-time data, Smart meter”

1. Introduction

Electricity is one of the most critical developments for humanity. However, global warming due to rapid growth and development is increasing day by day. As a result, the energy cycle has become an enormous problem with increasing greenhouse gas emissions. To this end, the scientific community has reduced its intervention to two approaches:

- Shifting electricity generation to renewable energy sources.
- Regulating electricity consumption.

While the greater emphasis is being given to the first solution, there is little awareness of the second alternative (Tonge et al., 2020). According to research, the units of electric power consumption used in enlightening buildings is around 40% in which the energy wastage is about 10-15%. This energy wastage is due to the irresponsibility of humans because they are unaware of how much energy has been wasted in a day (Mishra et al., 2020).

Demand Response (DR) utilizes electricity consumers' flexibility to regulate their electricity consumption and specific incentives. DR is also one of the techniques used to provide certain services, such as increasing the input of renewable energy in the grid, reducing peak demand, generation, transmission, and distribution costs. In DR programs, the aggregated energy demand is a crucial metric. An aggregator interacts with active consumers willing to minimize their electricity bill or maximize their utility to optimize this demand profile. In such a framework, energy can be seen as an asset demanded by consumers, with the cost of which depends on the total demand and the time of demand (Jacquot et al., 2018) and with the power consumption (Peak, Standard, and Off-Peak) varying according to the demand period. This will help regulate power consumption. In addition, consumers need to know their instantaneous consumption and grid power prices in this process.

Traditional electromechanical meters are still today widely used for residential consumers. Although it is a well-known technology, it has several limitations due to its constructive characteristics. In general, electromechanical meters are not very sensitive. The measurement process with these meters can be affected more than other types of meters by many technical factors such as waveform distortions or unbalanced load and operating temperature. In addition, this category of energy meter can only measure a cumulative active power component and consider unidirectional power flow. Another vital factor affected by this technology is the human factor. Still, the human factor is more sensitive to reading errors, typically caused by manual or human reading when measuring energy. Besides that, the operating cost is high because reading all electromechanical meters need a lot of workers. Such a process represents a high operational cost for the utilities, increasing energy tariffs (Garcia et al., 2017). For this purpose, both the network operator and consumers should benefit from electromechanical meters if they want to use the DR technique.

These days, we see an extensive development of public electric systems where energy flow becomes bidirectional due to increasing distributed generation plants. Electricity is shared among the several nodes of the power grid, named microgrids (Morello et al., 2017). In recent years, this development in the power system has necessitated the new concept of power measurement and control in the current concepts of smart grid and smart meters.

A smart grid system is a complex and high advanced technology that allows not just bidirectional power flow, but it also has several different features such as availability, effectiveness, accuracy, controllability, economically, flexibility, measurability, optimality, reliability, sustainability, and security (Çolak et al., 2020). Electromechanical meters are not suitable for microgrids, so smart meters should be used to take advantage of the DR technique. Smart meters are a vital development for smart grids.

Conventional electromechanical meters should be inspected separately by meter workers of energy provider companies. There are many solutions to traditional counter-related problems. On the other hand, smart meters using Internet of Things (IoT) technology have given consumers the ability to remotely monitor and regulate their energy consumption and get accurate automated meters. Smart meters can allow consumers to participate in the electric power sector on a large scale and economically, thereby increasing the end user's role in the energy transition (Alkaws & Baahar, 2020).

Many researchers proposed different methods and algorithms to reduce power consumption using smart meters and data analysis:

A system was presented containing a smart home technology with a smart grid facility, interfaced with a cloud application to control or monitor the home appliances. Despite the authors taking into their account sent feedback to customers to warn them when the power consumption passes the pre-setting limit set by the customer (Bhilare & Mali, 2015). However, they did not tell the customer the best time to consume the power (peak off period).

A proposed algorithm has been developed in which the device will generate the unit rate and send it to the user's smartphone with the invoice at the end of each month (Joshi et al., 2016). Although the algorithm can optimize the bill according to its usage, the user does not know the optimum time for power consumption, and the reactive power consumption is not taken into account in the application.

A study is presented that plans the total cost, data center workloads, and EV charging demands of geographically distributed data centers and EVs in the smart grid in real-time, minimizing heterogeneous EV charging delays and peak power limits without violating them. (Yu et al., 2016). The study could be extended to include a residential energy storage system that would allow the consumer to charge the energy storage system during the off-peak period and use the stored energy or sell it during the peak demand period.

An algorithm approach has been proposed for home automation and metering systems to increase power consumption control and supervisory efficiency and reliability using Apriori Algorithm. An IoT embedded appliance and other electronic devices at home can be controlled reliably by a web portal designed and developed for this purpose. Consequently, the electricity consumption can be determined, and automated billing can also be generated with the help of the web portal (Kamal et al., 2017). Despite that, the system did not consider the effect of the storage system, which can be used to enhance the performance of the smartgrid.

An Atmega328P microcontroller-based device is used for detection and controlling the energy meter from power theft. When theft is detected, a particular consumer's service (line) will be remotely disconnected (Metering et al., 2017). However, the authors did not discuss the database used in the utility system and did not discuss the cost of GSM communications.

A methodology is implemented for monitoring the power quality parameters using an ethernet-based smart energy meter. Energy consumption data is sent to the server by the smart energy meter and stored there (Das et al., 2017). However, the price policy of power utility wasn't discussed.

A proposed smart energy meter has been presented that controls and calculates energy consumption using ESP 8266 12E. A read is uploaded to the "Thingspeak" cloud server. For this reason, energy analyzes made by the consumer become much more accessible and controllable. Thus, this smart meter has helped home automation using IoT and enabling wireless communication, which is a big step towards Digital World (Barman et al., 2018). However, the pricing policy of the public service and how the electricity bills are calculated have not been discussed.

A prototype of an electric power smart meter designed for including in the AMI "Advanced Measurement Infrastructure" based on a wM-Bus 169 MHz has been presented. The radio module of the smart meter can work as a repeater, thus assisting network designers in the optimal siting of gateways in urban areas (Carratù et al., 2018). However, electricity bill generator and power consumption analysis for consumers is not discussed.

An end-to-end IoT solution used for an intelligent energy monitoring system to monitor and control devices were designed and implemented in real-time. The prototype of the smart sockets developed the firmware and set up a real-time platform to collect and store data for research purposes (Nguyen et al., 2019). However, data analysis and power measurement to generate invoices for consumers have not been studied.

Hardware is designed using a PIC16F877 microcontroller, current and voltage transformer, voltage regulator 7805, solar panel, solar charge controller, and inverter (Faisal et al., 2019). The hardware design is discussed only without considering the utility's database and invoice creation.

A proposed smart energy meter is studied. The consumer will be notified the amount of power consumed by the end of the day depending on a message sent by GSM such that the consumer can plan the consumption of power. In addition, the power consumed by the consumer will be notified to the distributor and consumer such that no manpower is necessary for meter reading (Prakash et al., 2019). But the system cannot depend on it if the price of the power is changed with daytime.

A Voltage Ampere Power Smart Meter (VAPSM) has been proposed, enabling efficient data collection in the billing process to network providers and sending messages using the GSM system (Malik et al., 2019). However, the utility's database was not discussed, how the bill was generated, and no attention was paid to hourly power consumption, which is very important for consumers and utility companies.

A proposed technology is presented that collects data from the meter and transfers this data to the central database for storing and analyzing the data and monitoring security-related issues. It also includes a module that enables optional unit installation by simply sending a demand SMS from the energy provider company (Sultan et al., 2019). However, the timing of sending messages to providers was not discussed, and no attention was paid to hourly consumption, which is crucial for customers and providers.

A ZigBee wireless technology-based data acquisition system was designed. Starting with hardware and software, the networking and data transmission of ZigBee have been introduced (Yongyong et al., 2020). However, pricing policy or how the database will generate invoices has not been discussed.

The design and fabrication of a smart meter sending power consumption information to a vendor by GSM are proposed. The system offers consumers to set consumption limits with SMS alerts and turn ON/OFF the electric energy supply. The utility also has access to the smart meter for power cut-off if bills are not paid (Kumar et al., 2020). However, how the database will generate bills was not discussed.

An FPGA-based smart energy meter is introduced. To ensure portability, the digital signal processing algorithms implemented on the FPGA device were entirely coded in hardware description languages. All equations are fully described to be applied to any digital signal-processing environment (Arenas et al., 2020). The paper focused on the signal processing side and did not deal with generating smart bills.

A smart meter depending on Power Line Carrier was introduced, as the transformer cannot transfer high-frequency signals without adding noise in the original signals and hence not useful for PLC. The proposed system was designed to collect the data of smart meters using PLC in low level, low voltage side, and send by the local server to vendors using the internet (Rathee et al., 2020). However, the process of generating smart bills was not discussed.

The present paper discusses the development of an interface for real-time billing and helping the users avoid large energy consumptions and save energy. The real-time bill is generated by a proposed IoT system that has the following characteristics: (1) it uses low-cost sensors, arduino and arduino ethernet (2) it displays information about the consumption habits of the users; and (3) it activates alarms in case of abnormal or high consumption.

The main contributions of this study are described as follow:

- An interface design that provides a real-time invoice based on the three-time bands and the energy consumed gives the company the ability to make a price. These three-time bands are called “peak, standard and off-peak,”
- The forecast of energy consumption over a period using only one week of measurement.
- Detection of any fault in transformer, building, or house.

2. Material and Method

The block diagram of the proposed smart energy meter system and its hardware and software architecture is given in Figure 1. The hardware of the system consists of a smart meter, MySQL, and API. The smart meter measures the instantaneously consumed power, accumulates it for a specific time (Tminutes), and sends the information to the MySQL database over the internet. MySQL is used to store and analyze received information and generate electricity bills. The customer’s analyzed information and electricity valuable bill are sent to the customer’s smartphone via the Application Programming Interface (API). The details of the proposed system are explained as follows:

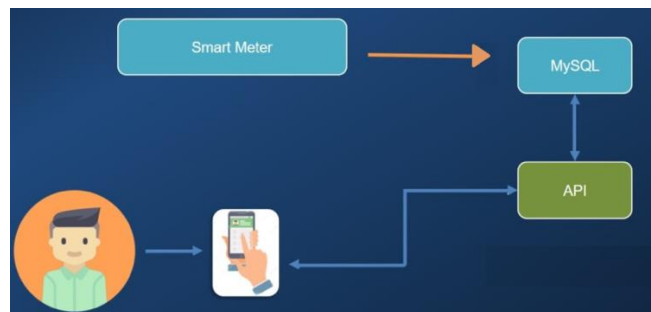


Figure 1. Proposed Smart Energy Meter Architecture.

2.1. Smart energy meter

The proposed energy meter is shown in Figure 2, and the prototype is shown in Figures 3 and 4, where two prototypes are made.

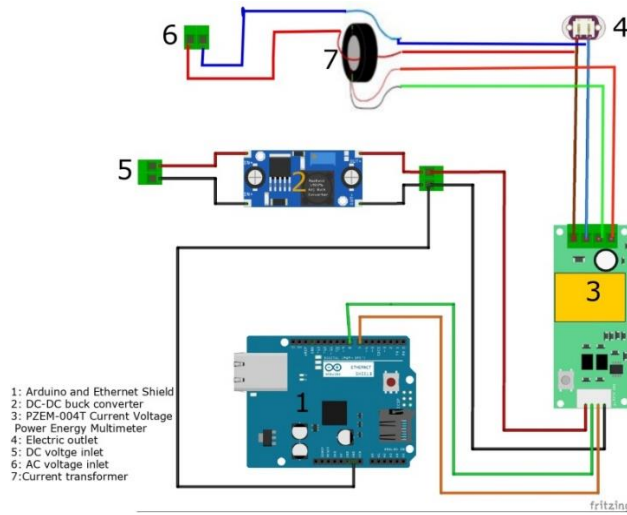


Figure 2. Smart Energy Meter Design.

Consumed power is measured using electrical sensors consisting of PZEM-004t modules to measure voltage, current, and sensed values to calculate power and energy. The modules yielded results that could be measured with digital codes with a three-digit resolution via a universal asynchronous receiver/transmitter (UART) interface. The measured results are voltage, current, power, and energy values in volts, amps, watts, and kilowatt-hours, respectively (Wasoontarajaroen et al., 2017). Instantaneous data is received by arduino and collected for a specified time and then sent to MySQL via ethernet shield. As the accumulated data increases, the size of the data retrieved in MySQL will decrease. The DC buck converter is used to step down the DC voltage to 5 volts; 5V will power the arduino and the PZEM-004t

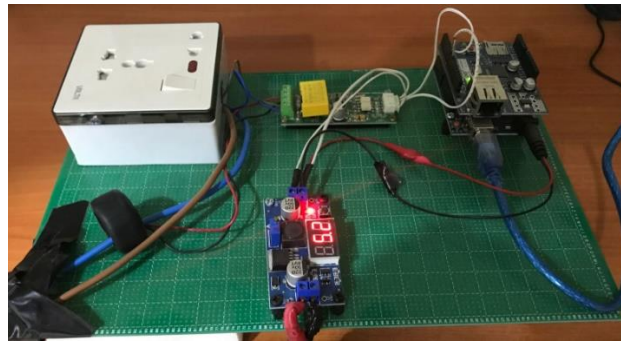


Figure 3. Smart Energy Meter Prototype I.

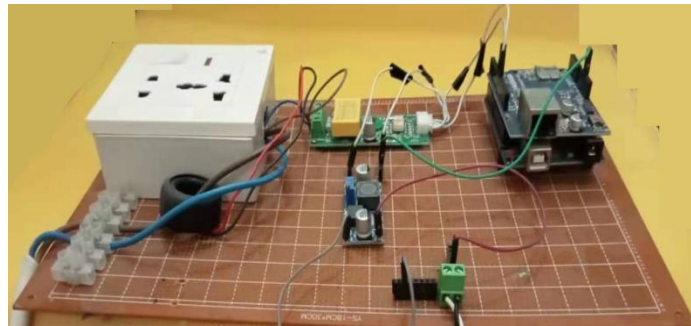


Figure 4. Smart Energy Meter Prototype II.

2.2. MySQL

MySQL is a relational database management system based on the Structured Query Language (SQL), the popular language for accessing and managing the records in the database. MySQL is open-source and free software under the GNU license. Oracle Company supports it.

The Arduino project can be connected directly to a MySQL server without using an intermediate computer or a web or cloud-based service. Having direct access to a database server means storing data from a smart meter and checking the values stored in tables on the server. The flowchart of how MySQL works are shown in Figure 5.

The received data is the device ID and the accumulated consumed power. This data is first recorded in the main table, then the power consumption calculated for T_{min} according to the device ID is multiplied by the power price. The power consumed power and cost data stored in hours for one hour are then combined. This calculated hour data is collected with other previous hour data and stored in the daily table. Each day calculated is added up with the other consecutive days and stored in the per-device monthly table. The price depends on the time of consumption, and the day can be divided into three intervals: “peak, standard and off-peak.” The normal price is in the standard period, the higher price is at the peak, and the lower price is in the low consumption period.

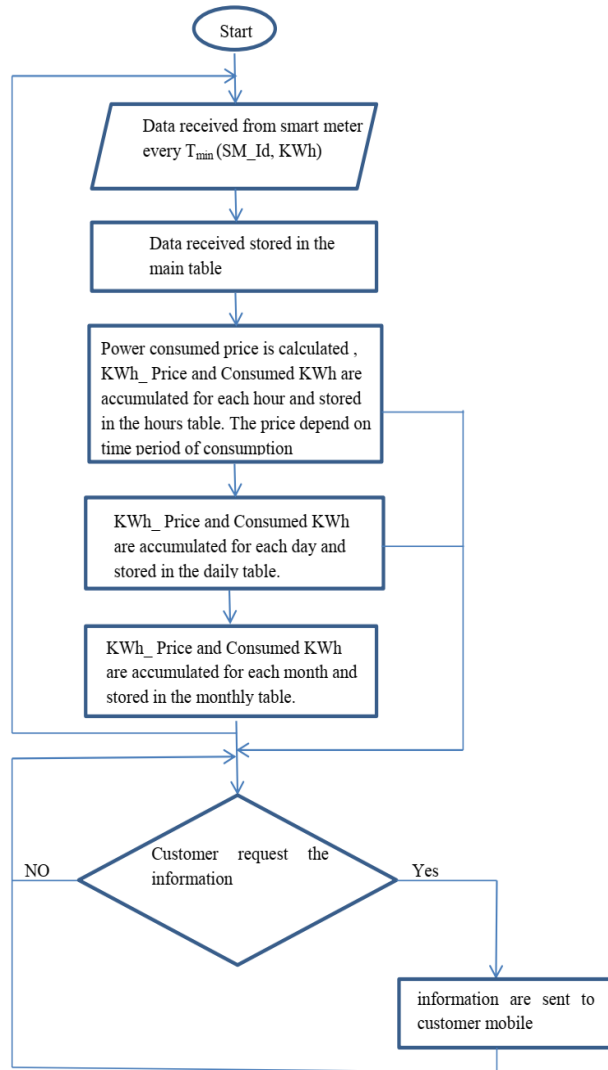


Figure 5. MySQL Flowchart.

2.3. API

Application programming interfaces (APIs) provide operational signatures for creating, reading, updating, and deleting data about business (or logical) entities. These are managed without revealing the software application that supports the transactions (Barros et al., 2020). APIs are essential to many modern software architectures as they provide high-level abstractions that simplify programming tasks, support the design and reuse of distributed and modular software applications (Meng et al., 2018). The API is created using a technology (Asp.net core5) that provides data to the users by connecting to the database (Mysql) and generates device data for each user, including idle usage, daily-monthly usage, and total usage invoices for each month. In Figure 6, the process diagram of the API is shown.

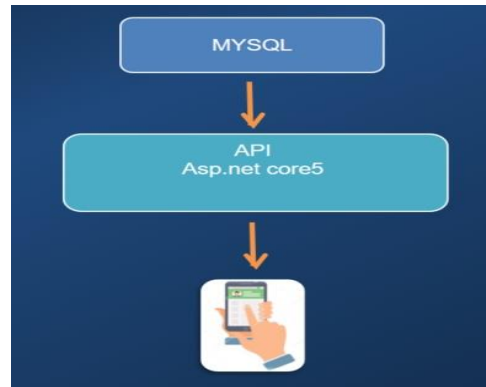


Figure 6. API.

2.4. Mobile application

Most commonly referred to as an application, a mobile application is a type of application software designed to run on a mobile device such as a smartphone or tablet computer. Mobile apps often provide users with services similar to those accessed on PCs. Applications are usually small, self-contained units of software with limited functionality. In this study, Ionic Framework was used to create the mobile application.

2.5. Ionic framework

Ionic framework is an open-source mobile toolset for building high-quality native and web application experiences across platforms. It moves faster with a single codebase that runs anywhere with JavaScript and the Web.

In this study, an API application based on Asp.net's core five technology was used. The API application receives the data from the MySQL database and sends it to the mobile application. ASP.NET identity is a membership system required for authentication and authorization of users and performing JSON Web Tokens (JWT) authentication to securely transfer requests between an application programming interface (API) and a mobile application. The electronic meter data is taken from the API server via the mobile application, and the quantity and price are displayed hourly, daily or monthly according to the user's request. In this way, the user can learn the current, daily, and monthly consumption amount.

3. Results and Discussion

3.1. Data in MySQL

Figure 7 shows the data sent from smart meters and stored in the MySQL database. The data consists of the device ID and power consumed. Besides, Mysql will store the data along with the received time. The price of consumed power will depend on the time of consumption. The price will be calculated for each hour, and thus the total hourly usage will be calculated according to the desired number of hours. In addition, hourly usages will be added to each other as kWh, daily usage, and monthly usage will be obtained as voltage, current, power, and price by adding daily usages to each other. As a result, the amount of power consumed per hour, day, month, and the price will be sent to the consumer's mobile phone.

Id	DeviceId	Total	InsertDate	Price
1	1	3.2	2021-09-01 01:00:00	0.064
2	1	3.2	2021-09-01 02:00:00	0.064
3	1	3.1	2021-09-01 03:00:00	0.062
4	1	3.1	2021-09-01 04:00:00	0.062
5	1	2.8	2021-09-05 05:00:00	0.056
6	1	4.1	2021-09-01 06:00:00	0.056

Figure 7. MySQL.

3.2. Data in mobile application

Figure 8 shows the login screen of the mobile application. This front page contains the user name and password of the customer.

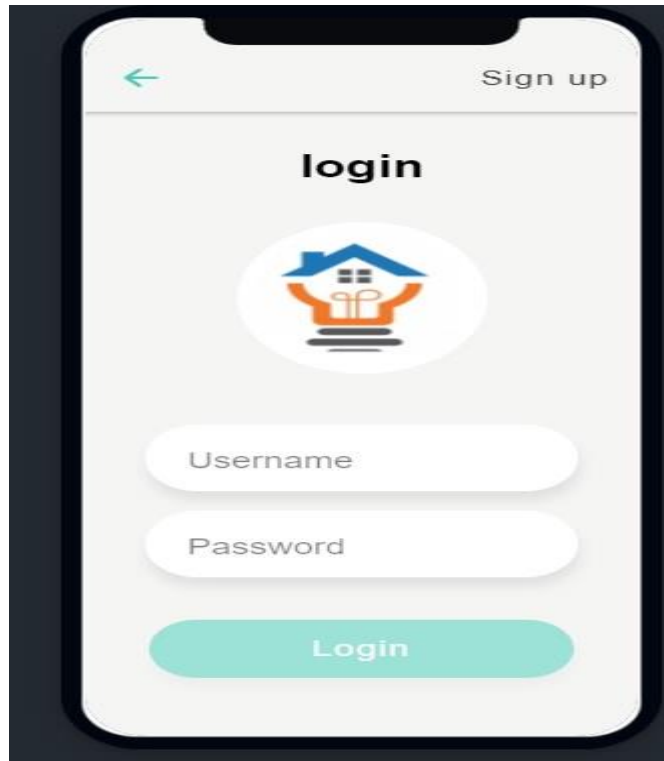


Figure 8. Mobile Application Front Page.

Consumers will see and evaluate the power consumed as kWh by their homes and the prices for each month, day, and hour as shown in Figures 9, 10, and 11, respectively.

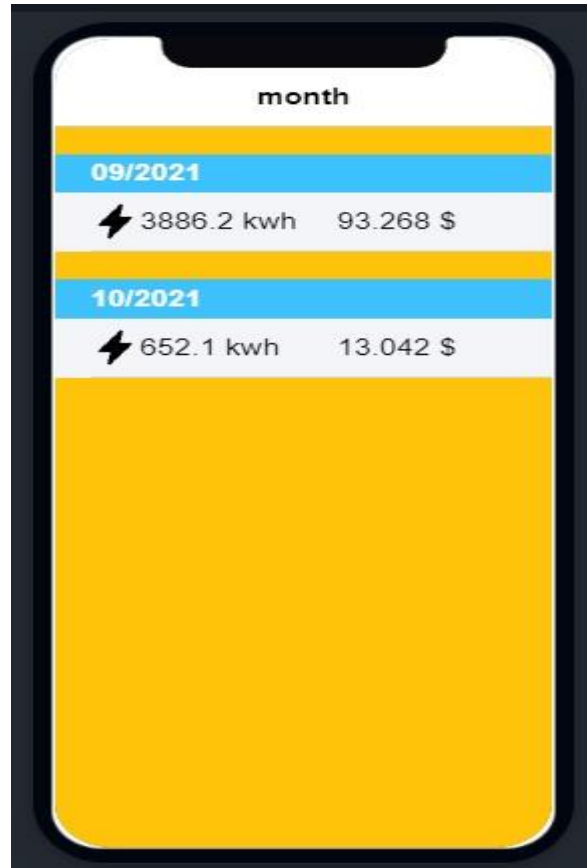


Figure 9. Monthly Page of Mobile Application.



Figure 10. Daily Page of Mobile Application.

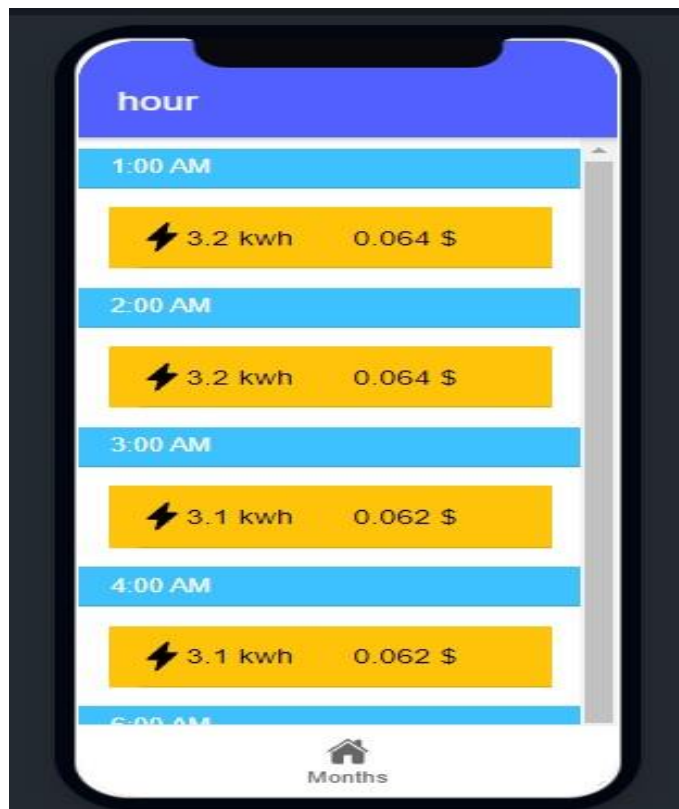


Figure 11. Hourly Page of Mobile Application.

4. Conclusions and Recommendations

In this research, a smart power meter monitors the customers' energy and sends the necessary information to the customer's mobile phone. Consumers' user names and passwords provide information security. The information was analyzed hourly, daily, and monthly by taking it to an interactive database with asp.net on the hardware. In addition, the amount corresponding to the amount of consumed electrical energy is automatically calculated by the device. This information seen from the mobile phone will enable consumers to precisely track their consumption and help them control their consumption, especially during peak demand periods when the price will be costly. In addition, instantaneous data will create sensitivity in the control of electricity consumption in consumers.

As a future study, further improvement of the reliability of the smart meter can be considered. It can be suggested that the device should be developed to store the consumption information produced when the device cannot send information to the database, especially in cases where the internet is cut off. Thus, the stored data can be restored to the database when internet access is restored. As another suggestion, data sheets explaining the importance of electricity saving can be added to the application. These devices can be recommended to the consumer through the system by calculating the amount of savings as new, more efficient devices are released.

References

- Alkaws, G. A., & Baashar, Y. (2020). An empirical study of the acceptance of IoT-based smart meter in Malaysia: The effect of electricity-saving knowledge and environmental awareness. *IEEE Access*, 8, 42794-42804.
- Arenas, L. D. O., e Melo, G. D. A., & Canesin, C. A. (2020). A Methodology for Power Quantities Calculation Applied to an FPGA-Based Smart-Energy Meter. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-11.
- Barman, B. K., Yadav, S. N., Kumar, S., & Gope, S. (2018, June). IOT based smart energy meter for efficient energy utilization in smart grid. In *2018 2nd International Conference on Power, Energy and Environment: Towards Smart Technology (ICEPE)* (pp. 1-5). IEEE.
- Barros, A., Ouyang, C., & Wei, F. (2020). Static Analysis for Improved Modularity of Procedural Web Application Programming Interfaces. *IEEE Access*, 8, 128182-128199.
- Bhilare, R., & Mali, S. (2015, December). IoT based smart home with real time E-metering using E-controller. In *2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)* (pp. 1-6). IEEE.
- Carratù, M., Ferro, M., Pietrosanto, A., & Paciello, V. (2018, July). Smart power meter for the iot. In *2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* (pp. 514-519). IEEE.
- Çolak, I., Bayındır, R., & Sağıroğlu, S. (2020, June). The Effects of the Smart Grid System on the National Grids. In *2020 8th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)* (pp. 122-126). IEEE.
- Das, H., & Saikia, L. C. (2017, October). Ethernet based smart energy meter for power quality monitoring and enhancement. In *2017 Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE)* (pp. 187-191). IEEE.
- Faisal, M., Karim, T. F., Pavel, A. R., Hossen, M. S., & Lipu, M. H. (2019, January). Development of smart energy meter for energy cost analysis of conventional grid and solar energy. In *2019 International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST)* (pp. 91-95). IEEE.
- Garcia, F. D., Marafão, F. P., de Souza, W. A., & da Silva, L. C. P. (2017, March). Power metering: History and future trends. In *2017 Ninth Annual IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)* (pp. 26-33). IEEE.
- Jacquot, P., Beaud, O., Gaubert, S., & Oudjane, N. (2018). Analysis and implementation of an hourly billing mechanism for demand response management. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(4), 4265-4278.
- Joshi, D. S. A., Kolvekar, S., Raj, Y. R., & Singh, S. (2016). IoT based smart energy meter. *Bonfring International Journal of Research in Communication Engineering*, 6(Special Issue), 89-91.
- Kamal, M. S., Parvin, S., Saleem, K., Al-Hamadi, H., & Gawanmeh, A. (2017, May). Efficient low cost supervisory system for Internet of Things enabled smart home. In *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)* (pp. 864-869). IEEE.

- Kumar, R., & Srivastava, S. K. (2020, February). Design a Model of Smart Metering System for Light Load Consumer. In 2020 International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICE3) (pp. 416-419). IEEE.
- Malik, Q., Zia, A., Ahmad, R., Butt, M. A., & Javed, Z. A. (2019, November). Design and Operation of Smart Energy Meter for Effective Energy Utilization in Smart Cities. In 2019 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technologies (CSUDET) (pp. 219-223). IEEE.
- Meng, M., Steinhardt, S., & Schubert, A. (2018). Application programming interface documentation: what do software developers want?. *Journal of Technical Writing and Communication*, 48(3), 295-330.
- Metering, A. S., Visalatchi, S., & Sandeep, K. K. (2017, April). Smart energy metering and power theft control using arduino & GSM. In 2017 2nd international conference for convergence in technology (I2CT) (pp. 858-961). IEEE.
- Mishra, R., Pandey, A., & Savariya, J. (2020, January). Application of Internet of Things: Last meter smart grid and smart energy efficient system. In 2020 First International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T) (pp. 32-37). IEEE.
- Morello, R., De Capua, C., Fulco, G., & Mukhopadhyay, S. C. (2017). A smart power meter to monitor energy flow in smart grids: The role of advanced sensing and IoT in the electric grid of the future. *IEEE Sensors Journal*, 17(23), 7828-7837.
- Nguyen, V. K., Zhang, W. E., Le, K., Mahmood, A., & Sheng, Q. Z. (2019, April). Demo abstract: An end-to-end real-time efficient system for smart energy monitoring. In IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS) (pp. 957-958). IEEE.
- Prakash, K. J., Chethana, N. S., Tamkeen, F., Kala, C. S., & Kavya, N. R. (2019, July). Designing of Microcontroller based Energy Meter (Smart Energy Meter) for Energy Preserving. In 2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES) (pp. 1252-1255). IEEE.
- Rathee, S., Goyal, A., & Shukla, A. (2020, June). Designing Prepaid Smart Energy Meter and Deployment in a Network. In 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC) (Vol. 1, pp. 1208-1211). IEEE.
- Sultan, Z., Jiang, Y., Malik, A., & Ahmed, S. F. (2019, December). GSM based smart wireless controlled digital energy meter. In 2019 IEEE 6th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS) (pp. 1-6). IEEE.
- Tonge, K., Mane, V., Burad, S., Urkunde, V., & Aghav, K. (2020, July). Demand based Variable Electricity Tariff Meter. In 2020 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP) (pp. 1452-1455). IEEE.
- Wasoontarajaroen, S., Pawasan, K., & Chamnanphrai, V. (2017, October). Development of an IoT device for monitoring electrical energy consumption. In 2017 9th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE) (pp. 1-4). IEEE.
- Yongyong, Y., & Chenghao, H. (2020, August). Design of data acquisition system of electric meter based on ZigBee Wireless Technology. In 2020 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA) (pp. 109-112). IEEE.
- Yu, L., Jiang, T., & Zou, Y. (2016). Distributed online energy management for data centers and electric vehicles in smart grid. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(6), 1373-1384.



Özel Kısıtlı Hemşire Çizelgeleme Probleminin Çözümü için Hedef Programlama Model Önerisi

Goal Programming Model Proposal for Solution of Special Constraint Nurse Scheduling Problem

Serkan Kaya¹

¹Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Osmanbey Kampüsü, 63300, Haliliye, Şanlıurfa, TÜRKÜYE

Başvuru/Received: 30/03/2022

Kabul / Accepted: 03/05/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

İşletmelerde en büyük maliyet kalemleri arasında olan işgücü maliyetini etkili bir şekilde yönetebilmek ve bu maliyetleri azaltabilmek için yapılan planlamaların, programların etkisi çok önemlidir. Literatürde personel çizelgeleme olarak adlandırılan bu problemlerde işgücü kaynağını etkili bir şekilde planlayarak hem dengeli ve adil bir çalışma ortamı ayarlanmış olur hem de işgücü maliyetlerini dolaylı olarak azaltılmasına katkıda bulunulur. Personel çizelgeleme problemleri literatürde sağlık, ulaşım, eğitim gibi sektörlerde uygulama imkanı bulmuştur. Bu çalışmada da personel çizelgeleme problemlerinin bir alt türü olan hemşire çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Sağlık sektöründe önemli paydaşlar arasında yer alan hemşirelerin çalışma saatleri uzun ve yorucu olduğu için yapılacak çizelgelerin önemi bir kat daha artmaktadır. Çalışmada hemşirelerin özel durumları dikkate alınmıştır. Hedef programlama yöntemi ile bu problemin çözümü gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Hedef programlama, hemşire çizelgeleme, personel çizelgeleme”

Abstract

To effectively manage the labor cost, which is among the most significant cost items in businesses, and to reduce these costs, the effect of the plans and programs is significant. In these problems, which are called personnel scheduling in the literature, a balanced and fair working environment is set by effectively planning the labor force. Therefore, it indirectly contributes to the reduction of labor costs. Personnel scheduling problems have found application in the literature in the health, transportation, and education sectors. In this study, the nurse scheduling problem, a sub-type of personnel scheduling problems, is discussed. Since the working hours of nurses, who are among the critical stakeholders in the health sector, are long and tiring, the importance of the schedules increases. In the study, the special situations of nurses were taken into account. The solution to this problem was realized with the goal programming method.

Key Words

“Goal programming, nurse scheduling, personnel scheduling”

1. Giriş

Pinedo (2012) çizelgelemeyi, üretim ve hizmet sektöründe, bir veya daha fazla amacı eş zamanlı optimize edecek şekilde kaynakların, gerçekleştirilecek görevlere tahsis edilmesi olarak tanımlamıştır. Bu doğrultuda çizelgeleme, bir işletmede belirli bir dönem aralığında optimum üretim hedeflerini yakalamak için yapılması gereken işlerin sıra ve sürelerinin belirlenerek işletme kaynaklarına atanması olarak ifade edilebilir (Kaya, 2014). Hizmet sektöründeki çizelgeleme faaliyetleri aynı şekilde müşteri isteklerine hızlı cevap verecek şekilde eldeki kaynakların optimal kullanımını sağlamak şekli olarak ifade edilebilir.

Günümüz rekabet ortamında ürün ve hizmet üreten işletmelerin sürekliliği ve müşteri ihtiyaçlarına cevap verebilmeleri için çalışan personelden en üst düzeyde verim almaları gerekir. Çalışan personelin verimliliğinin artmasında çizelgeleme çalışmaları literatürde önemli bir yer tutar. Literatüre bakıldığında personel çizelgeleme farklı alanlarda çalışma konusu olmuştur. Bu alanlara sağlık, tekstil, ulaşım, telekomünikasyon gibi emek yoğun olan birçok sektör örnek olarak verilebilir. Aynı zamanda personel çizelgeleme çalışmalarının sınıflandırıldığı da görülmektedir. Bu sınıflandırma içinde vardiya çizelgeleme, nöbet çizelgeleme, hemşire çizelgeleme, doktor çizelgeleme, tur çizelgeleme gibi başlıklar vardır (Varlı ve Eren, 2017a; Varlı ve Eren, 2017b; Parıldar, 2020; Şahiner vd., 2017). Personel çizelgeleme konusunu ele alan literatür taramalarına bakıldığında bu sınıflandırmalara hangi oranlarda yoğunlaşıldığı belirtilmektedir. Van den Bergh vd. (2013) işletmelerde işçilik ücretlerinin en önemli doğrudan maliyet kalemi olmasından dolayı araştırmacıların bu problem tipine özellikle odaklandıklarını belirtmiştir. Doğru ve etkin bir personel programı hazırlanarak bu maliyet kalemini azaltmaya yardımcı olunabileceğinden söz etmiştir. Pawar ve Hanchate (2013) doktor çizelgeleme çalışmalarına; Özder vd. (2020) ise daha genel yaklaşarak personel çizelgeleme çalışmalarının sektörlere göre dağılımına odaklanılmışlardır. Mevcut literatür çalışmalarına bakarak, personel çizelgeleme çalışmalarında geçici talep ya da son dakika değişiklikleri gibi belirsizliklerin güçlü bir etkisi olduğu söylenebilir. Araştırmacıların bu belirsizlikleri programlara dâhil etmesi çözüm sürecini zorlaştırmakta fakat gerçek hayatta daha uygulanabilir sonuçlar alabilmelerini sağlamaktadır.

Özder vd. (2020) yaptıkları literatür taraması ile personel çizelgeleme çalışmalarında ilk sırayı hemşire çizelgeleme çalışmalarının aldığını belirtmişlerdir. Sağlık sektöründe özellikle hemşireler yoğun çalışma performanslarından dolayı birçok zorluklar yaşamaktadırlar. Yazarlar, çalışan personel sayısının yetersiz olması, hasta başına düşen hemşire sayısını yetersiz olması, hemşirelerin yaşadıkları sosyal sorunlar, çalışma ortamındaki olumsuzluklar, hemşirelerin görevlerini yaparken karşılaştıkları en başlı sorunlar olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışan hemşirelerden en yüksek verim alınabilmesi için çalışma saatlerinin düzenlenmesi gerekmektedir. Hemşire çizelgeleme belirli kısıtlar altında hemşirelerin aylık çalışma saatlerinin düzenlenmesidir. Bu şekilde çalışanların verimlilik artışı sağlanmaktadır (Şahiner vd., 2017; Parıldar, 2020).

Hemşire çizelgeleme problemlerinde gerçekleştirilmesi istenen birden fazla amaç vardır. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümüne yönelik geliştirilen çok amaçlı programlama yöntemleri arasında hedef programlama ön plana çıkmaktadır. Hedef programlama birden fazla amaca ulaşabilmeyi sağlayan, karar vericiler tarafından ele alınan problemin matematiksel olarak ifade edildiği bir yöntemdir. Bu çalışmada da bir doğum hastanesinde çalışan hemşirelerin çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Hastanenin Jinekoloji servisinde 24 saat hizmetin kesintisiz bir şekilde verilebilmesinin yanı sıra hemşireler arasında görev dağılımının adaletli ve dengeli bir şekilde yapılabilmesi için hedef programlama yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca hastanede çalışan bazı hemşirelerin izin ile ilgili özel istekleri de göz önünde bulundurulmuştur.

Çalışma dört bölümden oluşmaktadır. Personel çizelgeleme literatürü ikinci bölümde bulunurken üçüncü bölümünde ise çalışmanın çözüm sürecinde kullanılan hedef programlama yöntemi yer almaktadır. Dördüncü bölümde uygulama, beşinci bölümde ise sonuç ve öneriler sunulmuştur.

2. Literatür Taraması

Çizelgeleme çalışmaları araştırmacıların ilgi duydukları alan olmuştur. Son zamanlarda araştırmacılar hizmet sektöründe çizelgeleme çalışmalarına yönelmişlerdir. Üretim sistemlerinde faaliyetler üretim yaptıkları parça üzerinde ona değer katan tüm görevleri ifade etmektedir. Hizmet sistemlerinde ise bu faaliyetler genellikle insan kaynaklı olarak tanımlanmaktadır. Bu sebeple sağlık, ulaşım, eğitim gibi birçok alanda yapılan personel çizelgelemeleri ile kaynakların büyük çoğunluğunu oluşturan insan gücü etkin kullanılmaya çalışılmaktadır (Gür ve Eren, 2018). Hizmet sektöründe yapılan çizelgeleme çalışmalarında sağlık sektöründeki çalışmaların oranı yüksektir. Sağlık sektöründe araştırmacılar, doktor çizelgeleme, hemşire çizelgeleme, sağlık personeli çizelgeleme, ameliyathane çizelgeleme, randevu çizelgeleme gibi alanlarda yoğunlaşmışlardır.

İlk olarak Wolfe ve Young (1965) yaptıkları çalışmada, hemşire çizelgeleme probleminin matematiksel modelini oluşturmuşlardır. Bu modelde amaç, hemşireleri farklı görevlere atarken maliyeti de minimize etmektir (Bayraktar, 2019). Özellikle 1960'lı yıllardan sonra bilgisayar ortamında sağlık personelinin mesai çizelgelemeleri üzerine çok sayıda çalışmalar yayınlanmıştır (Burke vd., 2004).

Hemşire çizelgeleme problemlerinin çözümü için Warner ve Prawda (1972), De Grano vd. (2009), Glass ve Knight (2010), Wright ve Bretthauer (2010), Ağralı vd. (2017) karışık tam sayılı programlama modeli, Güngör (2002), Moz ve Pato (2004), Wright vd. (2006), Vanhoucke ve Maenhout (2009), Rönnberg ve Larsson (2010), Wright ve Mahar (2013), tamsayı programlama modeli, Öztürkoğlu ve Çalışkan (2014), Aizam ve Sim (2016), Karayel ve Atmaca (2017), Shahidin vd., (2017); Hamid vd. (2020); Schoenfelder vd. (2020)

tam sayılı matematiksel programlama modeli, Al-Hinai vd. (2018) matematiksel model, Jafari vd. (2015) dört farklı bulanık matematiksel model, Weil vd. (1995) kısıt programlama modeli sunmuşlardır.

Hemşire çizelgeleme problemlerinin hedef programlama yöntemi ile çözümü üzerine, Azaiez ve Al Sharif (2005), Ismail ve Jenal (2013), Agyei vd. (2015), Eren vd. (2017a), Eren vd. (2017b), Varlı vd. (2017d), Uslu vd. (2018) 0-1 Hedef Programlama modeli önermişlerdir. Lim vd. (2012), Atmaca vd. (2012), Wang vd. (2014), Zanda vd. (2018); Rerkjirattikal vd. (2020), Fitriani vd. (2020), Ariyani vd. (2021), Nasir vd. (2021) hedef programlama, Trivedi (1981) ve Ang vd. (2017) karma tamsayılı hedef programlama, Topaloğlu ve Selim (2010) bulanık hedef programlama modeli yöntemi sunmuşlardır. Bağ vd. (2012) hedef programlama yöntemine analitik ağ süreci yöntemini adapte ederek hibrid bir yöntem sunmuşlardır.

Sezgisel yöntem olarak, Chen ve Yeung (1993) hedef programlama ve uzman sistemlerin karışımından hibrid bir yöntem, Ikegami ve Niwa (2003) tabu arama, Burke ve Cowling (2001) tabu arama ve memetik algoritma birleşiminden hibrid bir algoritma, Youssef ve Senbel (2018) sezgisel bir algoritma, Legrain vd. (2015) çok amaçlı sezgisel bir model, Dowsland (1998) tabu arama, Aickelin ve Dowsland (2000), Maenhout ve Vanhoucke (2008), Pato ve Moz (2008), Tsai ve Li (2009), Li vd. (2009), Tsai ve Li (2009), Kim vd. (2014); Amindoust, vd. (2021) genetik algoritma, Lin vd. (2015) tamsayılı doğrusal programlama ve genetik algoritma, Parr ve Thompson (2007) en yakın komşu algoritması, Beddoe vd. (2009) Memetic algoritma, Baskaran vd. (2015) açgözlü algoritma, Kundu vd. (2008) tavlama benzetimi, Awadallah vd. (2015) hibrid yapay arı kolonileri algoritması sunmuşlardır.

Bu çalışmada hemşire çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Hemşire çizelgeleme problemi literatürde araştırmacıların sıklıkla ele aldığı önemli bir problem türüdür. Çalışmada özellikle gerçek hayatta karşılaşılan hemşirelerin özel istek ve tercihleri yansıtılmaya çalışılmıştır. Bu yönüyle çalışma literatüre ve gerçek hayata katkı sağlamaktadır.

3. Hedef Programlama

İlk defa Charnes vd. tarafından 1955 yılında yapılan çalışmada kullanılan Hedef programlama yöntemi 1972 yılında Lee tarafından geliştirilmiştir. Farklı amaçların kısıt haline getirilebildiği ve hedeflerden sapmaların minimize edilmeye çalışıldığı hedef programlama çok ölçütlü karar verme problemlerinin çözümünde kullanılan yöntemlerinden bir tanesidir.

Hedef programlama modeli, tüm hedefleri göz önünde bulundurarak bu hedeflerden sapmaların minimize edilmesini amaçlamaktadır (Hamzaçebi ve İmamoğlu, 2014). Eş zamanlı olarak birden fazla amacı en iyilemeye çalışan hedef programlama yöntemi, doğrusal programlama modelinin bir uzantısıdır.

Problem çözümünde çakışan birden fazla hedefin probleme dahil edilmesinde doğrusal programlama ve diğer metotlar yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle bu tür problemlerin çözümünde hedef programlama kullanılmaktadır. Hedef programlama yöntemi hedefi direkt optimize etmek yerine hedef ve sonuçlar arasındaki sapmaları minimize etmek için kullanılır. Doğrusal programlama modeli özellikle sağlık sektöründe çalışan personelin mesai, vardiya çizelgeleme gibi karmaşık ve çok amaçlı problemlerin çözümünde uygun çözüm verememektedir. Bu noktada bu tür karar problemlerinin çözümün de hedef programlama yöntemi kullanılır (Gülenç ve Karabulut, 2005; İnce 2017).

Hedef programlamanın genel gösterimi aşağıda verilmiştir (Charnes ve Cooper, 1977):

$$\text{Min}Z = \sum_{i=1}^k (d_i^+ + d_i^-)$$

$$\sum_{i=1}^n k_{ij}x_i + d_i^+ - d_i^- = l_i$$

$$x_i, d_i^+, d_i^- \geq 0 \quad i=1,2,\dots,l \quad j=1,2,\dots,n$$

Değişkenler

x_i : *i. karar değişkeni*

k_{ij} : *i. hedefin j. karar değişkeni katsayısı*

l_i : *i. hedef için ulaşılmak istenen değer*

d_i^+ : *i. hedefin pozitif sapma değişkeni*

d_i^- : *i. hedefin negatif sapma değişkeni*

Hedef programlama yöntemi literatürde hizmet çizelgeleme problemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun sebebi ise gerçek hayattaki katı kısıtların esnetilerek, istenilen sonuçlara ulaşmada etkinlik oranının yüksek olması olarak gösterilmektedir. Günlük hayatta ele

alınan problemde gerçekleştirilmesi istenilen birçok amaç vardır. Bu amaçların çoğu aynı doğrultuda olmayabilir, birbirleri ile çelişebilir. Doğrusal programlama yönteminin bir uzantısı olan hedef programlama yöntemi de araştırmacılara bu amaçları gerçekleştirmek için esneklik sağlamaktadır.

4. Uygulama

Hastanelerde manuel olarak yapılan hemşire (nöbet) çizelgeleme çalışmaları dengesiz iş yükü ve görev dağılımıyla birlikte çalışanlar arasında istenmeyen durumların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Ayrıca hafta sonu ve resmî tatilleri personel arasında eşit şekilde dağıtamamak manuel olarak yapılan çizelgelemenin sonucudur. Şahin vd. (2008) iyi bir çizelgeleme yapamayan sağlık kuruluşlarında çalışanların tükenmişlik sendromuna yakalanma oranının yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Çalışma ortamındaki dengesiz iş yükü, çalışma şartlarına bağlı oluşan yüksek stres, rol belirsizliği gibi nedenlerin tükenmişlik sendromunun başlıca sebepleri olduğunu söylemişlerdir. Öztürk vd. (2015) adil olmayan görev dağılımı, çalışma ortamına ait çalışanlarının beklentilerinin karşılanmaması, köle gibi çalışma düşüncesi hemşirelerin yaşamını etkileyen sorunlar olduğunu bildirmişlerdir.

Bu çalışmada bir doğum hastanesinde çalışan hemşirelerin çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Hastanenin 24 saat çalışma mesaisi boyunca hemşirelerin çalışma vardiyalarına, eşit ve dengeli bir şekilde atanmaları amaçlanmıştır. Hastanede her gün ihtiyaç duyulan hemşire sayısı tam karşılanırken bazı çalışanlara ait izin ile ilgili özel kısıtlarda dikkate alınmıştır.

4.1. Problem Tanımı

Toplam 20 hemşire çalışması olan hastane sabah (S), akşam (A) ve Gece (G) olmak üzere 3 vardiya halinde çalışmaktadır. Vardiya ların çalışma süreleri sabah mesaisi (08:00-16:00), akşam mesaisi (16:00-24:00) ve gece mesaisi ise (24:00-08:00) şeklindedir. Hafta içi sabah vardiyasına 7, akşam vardiyasına 5 gece vardiyasına 3 hemşire, hafta sonu sabah 4, akşam 4, gece vardiyasına ise 3 hemşire atanmalı, geriye kalanlar ise izinlidir. Hemşire çizelgeleme ağustos ayı göz önünde bulundurularak aylık olarak yapılmıştır.

4.2. Parametreler

n: Toplam çalışan hemşire sayısı	$n=20$
m: Ağustos ayı gün sayısı	$m=31$
t: Hastane vardiya sayısı	$t=3$
i: Hemşire indisi	$i=1,2,\dots,n$
j: Gün indisi	$j=1,2,\dots,m$
k: Vardiya indisi	$k=1,2,3$

4.3. Karar Değişkenleri

$$X_{ijk} = f(x) = \begin{cases} 1, & i. \text{ hemşirenin } j. \text{ günde } k \text{ vardiyasına atanması durumunda} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$h_{ij} = \begin{cases} 1; i. \text{ hemşirenin } j. \text{ günde izinli olması durumunda} \\ 0; \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$d1_i^+ = \{i. \text{ hemşirenin aylık toplam vardiya sayısından pozitif sapması} \quad i=1,2,\dots,20$$

$$d1_i^- = \{i. \text{ hemşirenin aylık toplam vardiya sayısından negatif sapması} \quad i=1,2,\dots,20$$

$$d2_{ij}^+ = \{i. \text{ hemşirenin } j. \text{ günde 2. hedeften pozitif sapması} \quad i=1,2,\dots,20 \quad j=1,2,\dots,31$$

$$d2_{ij}^- = \{i. \text{ hemşirenin } j. \text{ günde 2. hedeften negatif sapması} \quad i=1,2,\dots,20 \quad j=1,2,\dots,31$$

$$d3_{ij}^+ = \{i. \text{ hemşirenin } j. \text{ günde 3. hedeften pozitif sapması} \quad i=1,2,\dots,20 \quad j=1,2,\dots,31$$

$$d3_{ij}^- = \{i. \text{ hemşirenin } j. \text{ günde 3. hedeften negatif sapması} \quad i=1,2,\dots,20 \quad j=1,2,\dots,31$$

4.4. Kısıtlar

1.Kısıt: Hafta içi vardiyalarda ihtiyaç duyulan hemşire kısıtları:

Sabah vardiyası:

$$\sum_{i=1}^{21} x_{ij1} = 7 \quad j = 1,2,5,6,7,8,9,12,13,14,15,16,19,20,21,22,23,26,27,28,29,30$$

Akşam vardiyası:

$$\sum_{i=1}^{21} x_{ij2} = 5 \quad j = 1,2,5,6,7,8,9,12,13,14,15,16,19,20,21,22,23,26,27,28,29,30$$

Gece vardiyası:

$$\sum_{i=1}^{21} x_{ij3} = 4 \quad j = 1,2,5,6,7,8,9,12,13,14,15,16,19,20,21,22,23,26,27,28,29,30$$

2.Kısıt: Hafta sonu vardiyalarda ihtiyaç duyulan hemşire kısıtları:

Sabah vardiyası

$$\sum_{i=1}^{21} x_{ij1} = 4 \quad j = 3,4,10,11,17,18,24,25,31$$

Akşam vardiyası

$$\sum_{i=1}^{21} x_{ij2} = 4 \quad j = 3,4,10,11,17,18,24,25,31$$

Gece vardiyası:

$$\sum_{i=1}^{21} x_{ij3} = 3 \quad j = 3,4,10,11,17,18,24,25,31$$

3.Kısıt: Her hemşirenin izinli olduğu gün çalışmamasını gerektiren kısıt:

$$\sum_{k=1}^3 X_{ijk} \leq (1 - h_{ij}) \quad i = 1,2,\dots,21 \quad j = 1,2,\dots,31$$

4.Kısıt: 7. hemşirenin ay sonunda 4 gün izinli olması kısıtı:

$$X_{7jk} = 0 \quad j = 28,29,30,31 \quad k = 1,2,3$$

5.Kısıt: 1, 3, 10 ve 17 nolu hemşirelerin ayın belli günlerinde 3 gün izinli olması kısıtı:

$$X_{1jk} = 0 \quad j = 4,5,6 \quad k = 1,2,3$$

$$X_{3jk} = 0 \quad j = 17,18,19 \quad k = 1,2,3$$

$$X_{10jk} = 0 \quad j = 6,7,8 \quad k = 1,2,3$$

$$X_{17jk} = 0 \quad j = 9,10,11 \quad k = 1,2,3$$

6.Kısıt: Her hemşirenin arka arkaya 5 günden fazla çalışmamasını gerektiren kısıt:

$$h_{ij} + h_{i(j+1)} + h_{i(j+2)} + h_{i(j+3)} + h_{i(j+4)} + h_{i(j+5)} \geq 1 \quad i = 1,2,\dots,21 \quad j = 1,2,\dots,26$$

7.Kısıt: Her hemşirenin en fazla çalışması gereken vardiya sayısı ile ilgili kısıt:

$$\sum_{j=1}^{31} x_{ijk} \leq 23 \quad i = 1,2,\dots,21 \quad k = 1,2,3$$

8.Kısıt: Her hemşirenin en az çalışması gereken vardiya sayısı ile ilgili kısıt:

$$\sum_{j=1}^{31} x_{ijk} \geq 20 \quad i = 1,2,\dots,21 \quad k = 1,2,3$$

9.Kısıt: Gece vardiyasına atanan hemşirenin ertesi günkü sabah ve akşam vardiyalarına atanmamasını gerektiren kısıt:

$$X_{ij3} + X_{i(j+1)1} + X_{i(j+1)2} \leq 1 \quad i = 1,2,\dots,21 \quad j = 1,2,\dots,30$$

10.Kısıt: Akşam vardiyasına atanan hemşirenin ertesi günkü sabah vardiyasına atanmamasını gerektiren kısıt

$$X_{ij2} + X_{i(j+1)1} \leq 1 \quad i = 1,2,\dots,21 \quad j = 1,2,\dots,30$$

4.5. Hedef Kısıtları

Hedef 1: Her hemşirenin bir ay boyunca eşit sayıda vardiyaya atanması hedefi ile ilgili kısıt

$$\sum_{j=1}^{31} \sum_{k=1}^3 X_{ijk} + d1_i^- - d1_i^+ = 22 \quad i = 1, 2, \dots, 21$$

Hedef 2: Hemşirelerin vardiyalara atamaları yapılırken çalışma- izin- çalışma günü şeklinde atanmasını en aza indirgenmesi ile ilgili kısıt

$$X_{ij1} + X_{ij2} + X_{ij3} + h_{i(j+1)} + X_{i(j+2)1} + X_{i(j+2)2} + X_{i(j+2)3} + d2_{ij}^- - d2_{ij}^+ = 2$$

$$i = 1, 2, \dots, 21 \quad j = 1, 2, \dots, 29$$

Hedef 3: Hemşirelerin vardiyalara atamaları yapılırken izin- çalışma- izin günü şeklinde atanmasını en aza indirgenmesi ile ilgili kısıt

$$h_{ij} + X_{i(j+1)1} + X_{i(j+1)2} + X_{i(j+1)3} + h_{i(j+2)} + d3_{ij}^- - d3_{ij}^+ = 2$$

$$i = 1, 2, \dots, 21 \quad j = 1, 2, \dots, 29$$

4.6. Amaç Fonksiyonu

Bir ay boyunca hemşirelerin, çalıştıkları vardiyalarının eşit ve dengeli olması amaçlanmaktadır.

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^{21} \sum_{j=1}^{31} d1_i^- - d1_i^+ + d2_{ij}^- + d2_{ij}^+ + d3_{ij}^- + d3_{ij}^+$$

Modelin çözümü Intel(R) Core(TM) i7-6500U CPU @ 2.50GHz işlemcili 8,00 GB RAM bellek özelliğine sahip bilgisayarda ILOG CPLEX Studio IDe programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

5. Sonuç ve Öneriler

Doğum hastanesi jinekoloji servisinde çalışan hemşirelerin vardiya atamaları manuel olarak yapılan çizelgeler ile hazırlanmaktaydı. Ele alınan ağustos ayına ait el ile hazırlanan hemşire vardiya atamaları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1’de görüldüğü gibi vardiyalara atanan hemşirelerin toplam çalışma vardiyaları dengesiz bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bazı hemşireler maksimum çalışma vardiya sayısı olan 23 vardiya çalışırken bazıları 17 vardiya gibi minimum çalışma vardiya sayısının altında çalışmışlardır. Bazı hemşireler sadece gündüz vardiyasında çalışırken bazıları 3 vardiya kesintisiz çalışmışlardır. Bazı hemşireler yıllık izin kullanmak istemedikleri halde 5 günün üzerinde izin kullanmak zorunda kalırken diğer taraftan izin isteyen hemşireler ise izin kullanamamakla birlikte dengesiz, keyfi, adaletsiz durumlar ile karşılaşmışlardır. Problemin hedef programlama ile çözümünden elde edilen sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Hemşire aylık vardiya çizelgeleme (Manuel olarak yapılan)

Hemşireler	GÜNLER																															Vardiya Sayısı				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31					
1	a	a			a	a	a	a	a			a	a	a	a	a			a	a	a	a	a			a	a	a	a	a			22			
2	a	a			a	a	a	a	a			a	a	a	a	a			a	a	a	a	a			a	a	a	a	a			22			
3	a	a			a	a	a	a	a			a	a	a	a	a				a	a	a	a	a			a	a	a	a	a			21		
4	a	a			a	a	a	a				a	a	a	a	a			a	a	a	a	a	a	a		a	a	a	a	a			22		
5	a	a			a	a	a	a	a			a	a	a	a			a	a	a	a	a	a	a			a	a	a	a	a			22		
6					a	a	a	a				a	a			a	a			a	a	a	a	a			a	a	a	a	a			17		
7	a	a		a	a	a		a	a			a	a	a	a			a	a	a	a	a	a	a			a	a	a	a	a			22		
8	b	b			b	b	b	b	b			b	b		b	b			b	b	b	b	b	b					b	b				18		
9	bc				bc			bc			bc			bc			bc			bc			bc		bc		bc			bc		bc		bc	22	
10			ab c			bc			ab c			bc			bc			ab c			bc			ab c			ab c			bc			ab c		ab c	23
11			a	a	bc		bc	c		a	a	bc		bc			a	a	ab						a	a			bc			a		23		
12				ab c								ab c							ab c								ab c								12	
13		bc			bc			bc			bc			bc		b											bc		bc				bc		17	
14		bc			bc			bc			bc			bc			bc				bc						bc			ab			bc		20	
15	bc				bc			bc				bc		bc						bc		bc					bc		bc				bc		18	
16	a	a	a				ab		a	b			ab			bc			bc					bc		bc	ab		bc			ab		23		
17			bc		bc			c			ab	a		bc		bc		bc			bc		bc		bc	ab			bc			bc		22		
18			ab			bc			bc			bc			ab			bc				bc		bc		bc			bc			bc		bc	22	
19	bc			bc				bc			bc			bc			bc		bc		bc		bc		bc		bc					bc		22		
20			bc		bc			bc			bc					ab			bc			bc				ab					bc		bc		22	
21	bc			bc		bc				bc				bc			bc			bc			bc			bc		bc		bc		bc		bc	22	

a: 08-16, b: 16-24, c: 24-08, ab: 08-24, bc: 16-08, abc: 08-08

Tablo 2’de görüldüğü üzere hemşirelerin büyük çoğunluğu eşit sayıda vardiyaya atanmıştır. Keyfi olan uygulamalar, bazı hemşirelerin sadece bir vardiyada çalışması gibi ayrıcalıklı durumlar ortadan kaldırılmış olup daha dengeli ve adil bir çizelgeleme yapılmıştır. İzin talebi olup izin kullanamayan hemşirelerin izin istekleri göz önünde bulundurulmuş ve istedikleri gün sayısınca izin kullandırılarak çalışan motivasyonunu artırıcı yönde bir çizelgeleme oluşturulmuştur. İzinli olan hemşirelerin durumları önceden planlandığı için uzun periyot içinde diğer hemşirelere izinden dolayı binecek iş yükünün dağılımı daha dengeli yapılmıştır. Çalışma sonucunda hemşirelerin memnuniyetlerinin artırılması ve verimli çalışmaları hedeflenmiştir. Personelin özel izin istekleri de göz önünde bulundurularak daha özgün bir çalışma planı hazırlanmış ve belirlenen hedef kısıtları mümkün olduğu kadarıyla karşılanmıştır.

Hedef programlama yöntemi ile gerçekleştirilen hemşire çizelgeleme probleminin sonucunda, kadın doğum hastanesinde personel için adaletli bir vardiya sistemi oluşturulmuş, çalışanların vardiyalara dengeli atanması sağlanmıştır. Personelin izin vb. durumlarla ilgili olarak özel kısıtları sağlanarak, isteklerine karşılık gelen bir çizelge oluşturulmuştur. Bunun sonucu olarak personel verimliliğinin yanı sıra, moral ve motivasyon seviyesinde de artış sağlanmıştır.

Bundan sonraki çalışmalarda diğer servislerin çalışma günleri için diğer çözüm yöntemleri kullanılabilir veya servisteki çalışanların özellikle çalışmak istedikleri vardiyalara göre farklı modeller oluşturulup çizelgeleme yapılabilir. Önerilen hedef programlama modeline hastane ve hemşirelerin farklı kısıtları eklenebilir. Hastanede çalışan doktor, temizlik elemanı gibi diğer personelin yanı sıra ameliyathane, poliklinik çizelgeleme gibi problemlerin çözümleri gerçekleştirilebilir. Büyük boyutlu hemşire çizelgeleme problemleri veya farklı sektörlerin personel, vardiya çizelgeleme problemleri ele alınabilir. Bu problemlerin çözümü için klasik sezgisel / meta sezgisel yöntemler kullanmanın yanı sıra iki farklı sezgisel / meta sezgisel yöntemin birleştirilmesiyle melez algoritmalar önerilebilir.

Tablo 2. Hemşirelerin aylık vardiya çizelgesi (önerilen)

Hemşireler	GÜNLER																															Vardiya Sayısı	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
1	1	1	3	3 gün izinli			1	1	1	1				1	1	1	3	3			1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	22
2	1			1	1	1	2	2			1	1	1	2			2	2	3	3			1	2	2	2				1	1	2	21
3	1	1			2	2	2	3	3			1	1	1	1	1	3 gün izinli			1	1	1	2	3			1	1	1	1	1	22	
4	1	2			1	3	3	3	3			1	2	2	2	3			1	1	2	2	2			1	3	3	3	3	3	22	
5	1	1	1	1	3			1	1	1	1	2			1	1	1			1	1	3	3			1	2	2	2	2	2	22	
6	1	1			1	1	2	2	2			1	2	2	2	2			1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1	22	
7	2	2	2	3			1	1	1	1	3			1	1	1	1	1			2	2	2	2	2	2	2	3	4 gün izinli			21	
8	2			1	1	1	1	1			1	1	1	1	3			1	1	1	1	2			1	2	2	2	2	2		21	
9	2			3	3	3	3	3			2	3	3	3	3			1	3	3	3			2	2	3	3	3			2	21	
10	2	2	2	2	3	3 gün izinli			1	2	2	2	2			1	1	2	2			1	1	3				2	2	2	2	22	
11	3	3	3	3			1	2	2	3			1	1	1	2			1	1	1	1	1			2	2	3	3	3	3	22	
12	3	3			1	1	2	2	3			1	1	1	1	1			1	2	2	3	3			3	3	3	3			21	
13	3	3			2	2	2	2	2			2	2	2	2	2			2	2	3	3	3			1	1	1	1	1	1	22	
14	2	2	3			1	1	1	2	3			1	1	2	2	3			2	2	2	2	2			1	2	2	3		22	
15		1	1	2	2	2			1	2	2	2	2			2	2	2	2	2			2	2	2	2	2	2	2	3		22	
16		1	1	2	2	3			1	2	2	2			1	1	2	2	2			1	1	1	3	3			1	1	1	22	
17	3	3			1	1	1	1	3 gün izinli			1	3	3	3	3			1	1	1	1	1			1	1	1	1	3	21		
18			2	2	2	2	3			2	3	3	3	3			1	1	2	3	3			1	1	1	1	1			1	21	
19			1	1	1	2			2	3	3	3			2	3	3	3	3			3	3	3	3			1	2	2	3	21	
20	1	1	2			1	1	1	1	1			1	2			2	3	3	3	3			1	1	1	1			2	2	21	
21		2			3	3	3	3	3			3	3	3	3	3			1	2	2	2	2			3	3			1	3	20	

1: 08-16, 2: 16-24, 3: 24-08

Referanslar

Amindoust, A., Asadpour, M., & Shirmohammadi, S. (2021). A hybrid genetic algorithm for nurse scheduling problem considering the fatigue factor. *Journal of Healthcare Engineering*, 2021.

Ariyani, M. P., Rosyidi, C. N., & Aisyati, A. (2021, March). An optimization model of nurse scheduling using goal programming method: a case study. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1096, No. 1, p. 012022). IOP Publishing.

Al-Hinai, N., Al-Yazidy, N., Al-Hooti, A. ve Al-Shereiqli, E. (2018). A goal programming model for nurse scheduling at emergency department. In *8th International Conference On Industrial Engineering And Operations Management, IEOM 2018*, 99-103.

Ang, B. Y., Lam, S. S. W., Pasupathy, Y. ve Ong, M. E. H. (2017). Nurse workforce scheduling in the emergency department: a sequential decision support system considering multiple objectives. *J Nurs Manag*, 26(4), 432-441.

Awadallah M A, Bolajı Ala, Al-Betar Ma (2015). A hybrid artificial bee colony for a nurse rostering problem. *Applied Soft Computing*, 35, 726-739.

Aızam Nah, Sım Slp (2016). Extended basic integer programming models for multiple scheduling problems. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1750, No. 1, p. 030038). AIP Publishing.

- Atmaca E, Pehlivan C, Aydoğdu CB, & Yakıcı M (2012). Hemşire çizelgeleme problemi ve uygulaması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 28(4): 351-358.
- Aickelin, U. ve Dowsland, K.A., Exploiting problem structure in a genetic algorithm approach to a nurse rostering problem, *Journal of Scheduling* 3(3): 139–153, 2000.
- Azaiez, M.N., & Al Sharif, S.S., A 0-1 goal programming model for nurse scheduling, *Computers & Operations Research*, 32: 491-507, 2005.
- Ağralı, S., Taşkın, Z. C. & Ünal, A. T., Employee scheduling in service industries with flexible employee availability and demand, *Omega*, 66: 159–169, 2017.
- Agyei, W., Denteh, W.O., Andaam, E. A., Modeling nurse scheduling problem using 0-1 goal programming: a case study of tafo government hospital, Kumasi- Ghana, *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 3: 5-10, 2015.
- Bağ, N., Özdemir, N. M., & Eren, T., (2012). 0-1 Hedef programlama ve ANP yöntemi ile hemşire çizelgeleme problemi çözümü. *International Journal of Engineering Research and Development*, 4(1), 2-6.
- Baskaran, G., Bargiela, A., ve Qu, R., (2015). Domain Transformation using Greedy Algorithm in Nurse Scheduling. *International Conference on Artificial Intelligence, Energy and Manufacturing Engineering (ICAEME'2015)*, January 2015, Dubai, 92-98, 2015.
- Bayraktar, E., (2019). Tamsayılı Hedef Programlama ve Hemşire Çizelgeleme Problemi İçin Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Sosyal Bilimleri Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı.
- Burke, E. & Cowling, P., (2001). A memetic approach to the nurse rostering problem. *Applied Intelligence*, 15(3): 199-214.
- Beddoe G, & Petrovic S, LI J (2009). A hybrid metaheuristic case-based reasoning system for nurse rostering. *Journal of Scheduling*, 12(2): 99.
- Burke, E.K., De Causmaecker, P., Berghe, G.V., & Landeghem, H., (2004). The state of the art of nurse rostering, *Journal of Scheduling*, 7 (6), 441-499.
- Charnes, A., Cooper, W.W. & Ferguson, R. O., (1955). Optimal estimation of executive ompensation by linear programming, *Management Science*, 1: 138- 151.
- Charnes A., & Cooper W.W., (1977). Goal programming and multipleobjective optimizations, *European Journal of Operational Research* I, 39-54.
- Chen, J. & Yeung, T. (1993). Hybrid expert-system approach to nurse scheduling, *Computers in Nursing*, 11(4): 183-190.
- De Grano, M.L., Medeiros, D. & Eitel, D., (2009). Accommodating individual preferences in nurse scheduling via auctions and optimization, *Health Care Management Science*, 12: 228–242, 2009.
- Dowsland, K., (1998). Nurse scheduling with tabu search and strategic oscillation, *European Journal of Operational Research*, 106 (2-3) : 393-407.
- Eren T, Şahiner M, Aktürk M S, Bedir N, & Ünlüsoy S (2017a). Hemşire çizelgeleme için model önerisi: örnek uygulama. *Trakya Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 6(2): 62-77.
- Eren T, Varlı E, & Aktürk M S (2017b). Tam gün vardiyalı ve özel izin istekli hemşire çizelgeleme probleminin hedef programlama ile çözümü. *Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(2): 1-16.
- Fitriani, S. N., Irawanto, B., & Aziz, A. (2020). Nurse scheduling problem using fuzzy goal programming with MINMAX approach. *Journal of the Institute of Electronics and Computer*, 2(1), 151-161.
- Glass, C. A. & Knight, R. A., (2010). The nurse rostering problem: A critical appraisal of the problem structure. *European Journal of Operational Research*, 202: 379-389, 2010.
- Gülenç, F.İ. & Karabulut, B. (2005). Doğrusal hedef programlama ile bir üretim planlama probleminin çözümü, *Kocaeli Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 9 (1): 55-68, 2005.

- Güngör, İ. (2002). Hemşire görevlendirme ve çizelgeleme sorununa bir model önerisi. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 7(2), 77-94.
- Gür, Ş., & Eren, T. (2018). Scheduling and planning in service systems with goal programming: Literature review. Mathematics, 6(11), 265.
- Hamzaçebi, Ç. & İmamoğlu, G., (2014). T90 bölgesi lojistik merkezi yerleşimi için hedef programlama tekniğinin uygulaması. Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Elektronik Dergisi.5 (11): 156-170.
- Hamid, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Golpaygani, F., & Vahedi-Nouri, B. (2020). A multi-objective model for a nurse scheduling problem by emphasizing human factors. Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part H: journal of engineering in medicine, 234(2), 179-199.
- İnce, Ö., (2017). Hasta Hizmetleri Personeli Çizelgeleme Probleminin Analitik Hiyerarşi Süreci Destekli Hedef Programlama ile Çözümü, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017.
- İsmail WR, & Jenal R (2013). Master plan nurse duty roster using the 0-1 goal programming technique. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1522, No. 1, pp. 1394-1400). AIP.
- Ikegami, A., & Niwa, A., (2003). A subproblem-centric model and approach to the nurse scheduling problem. Mathematical Programming, 97 (3), 517-541.
- Jafari, H., Bateni, S., Daneshvar, P, Bateni, S. & Mahdioun, H. (2015). Fuzzy mathematical modelling approach for the nurse scheduling problem: a case study. International Journal of Fuzzy Systems, 18(2), 1-12.
- Kaya, S., (2014). Çok amaçlı esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinin geliştirilmiş parçacık sürü optimizasyonu ile çözümüne yönelik model önerileri. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Kim, S.-J., Ko, Y.W., Uhm, S., & Kim, J., (2014). A strategy to improve performance of genetic algorithm for nurse scheduling problem. International Journal of Software Engineering and Its Applications, 8(1): 53-62, 2014.
- Karaatlı, M. & Güngör, İ., (2010). Hemşire çizelgeleme sorusuna bir çözüm öneri ve bir uygulama, Alanya İşletme Fakültesi Dergisi, 2(1): 22-52.
- Karayel SD, & Atmaca E (2017). Özel bir hastane için hemşire çizelgeleme problemi. Çukurova Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 21(2): 111-132.
- Kundu, S., Mahato, M., Mahanty, B., & Acharyya, S., (2008). Comparative performance of simulated annealing and genetic algorithm in solving nurse scheduling problem. IMECS 2008 - International Multiconference of Engineers and Computer Scientists (19-21 March 2018), 1.
- Lim, G., J., Mobasher, A., & Côté, M., J., (2012). Multi-objective nurse scheduling models with patient workload and nurse preferences, Management, 2 (5): 149-160.
- Lee, S. M., (1972). Goal Programming for Decision Analysis, Auerbach Pub.
- Lı J, Aıckeln U, & Burke EK (2009). A component-based heuristic search method with evolutionary eliminations for hospital personnel scheduling. INFORMS Journal on Computing, 21(3): 468-479.
- Lin, C. C., Kang, J. R., Chiang, D. J., & Chen, C. L. (2015). Nurse scheduling with joint normalized shift and day-off preference satisfaction using a genetic algorithm with immigrant scheme. International Journal Of Distributed Sensor Networks, 11(7), 1-10.
- Legrain, A., Bouarab, H. & Lahrichi, N. (2015). The nurse scheduling problem in real life. J Med Syst, 39, 160-171.
- Moz, M. & Pato, M. V., (2004). Solving the problem of rostering nurse schedules with hard constraints: New multicommodity flow models. Annals of Operations Research, 128: 179-197.
- Maenhout B, & Vanhoucke M (2008). Comparison and hybridization of crossover operators for the nurse scheduling problem. Annals of Operations Research, 159(1): 333-353.

- Nasir, D. S. M., Baharom, N. H. C., Shafii, N. H., & Nor, N. A. M. (2021). Cyclical nurse scheduling in Shah Alam hospital using goal programming. *Journal of Computing Research and Innovation*, 6(1), 1-10.
- Özder, E. H., Özcan, E., & Eren, T. (2020). A systematic literature review for personnel scheduling problems. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 19(06), 1695-1735.
- Öztürk, H., Candaş, B., & Babacan, E., (2015). Devlet hastaneleri, toplum ve aile sağlığı merkezlerinde çalışan hemşirelerin yaşadıkları sorunların belirlenmesi, *Sağlık ve Hemşirelik Yönetimi Dergisi*, 2(1): 25-36.
- Öztürkoğlu Y, & Çalışkan F (2014). Hemşire çizelgelemede esnek vardiya planlaması ve hastane uygulaması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 16(1): 115133.
- Parıldar, O., (2020). Hemşire görevlendirme ve çizelgeleme problemlerinin sayısal yöntemlerle çözümü: yoğun bakım ünitelerine yönelik bir model önerisi, *Doktora Tezi*, Ankara Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Sağlık Kurumları Yönetimi Anabilim Dalı.
- Parr D, & Thompson JM (2007). Solving the multi-objective nurse scheduling problem with a weighted cost function. *Annals of Operations Research*, 155(1): 279-288.
- Pato MV, & Moz M (2008). Solving a bi-objective nurse rostering problem by using a utopic Pareto genetic heuristic. *Journal of Heuristics*, 14(4): 359-374.
- Pawar, U. S., & Hanchate, D. B. (2013). Literature review on personnel scheduling. *International Journal of Computer Engineering and Technology (IJCET)*, Spt.
- Pinedo, M. (2012). *Scheduling (Vol. 29)*. New York: Springer.
- Rönnerberg, E. & Larsson, T., (2010). Automating the self-scheduling process of nurses in Swedish healthcare: a pilot study. *Health Care Management Science*, 13: 35-53.
- Rerkjirattikal, P., Huynh, V. N., Olapiriyakul, S., & Supnithi, T. (2020). A goal programming approach to nurse scheduling with individual preference satisfaction. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020.
- Şahin, D., Turan, F. N., Alparslan, N., Şahin, İ., Faikoğlu, R., & Görgülü, A., (2008). Devlet hastanesinde çalışan sağlık personelinin tükenmişlik düzeyleri, *Noropsikiatri Arsivi*, 45(4): 116-121.
- Şahiner M, Aktürk M S, Ünlüsoy S, Bedir N, Varlı E, & Eren T (2017). Hemşire çizelgeleme için model önerisi: örnek uygulama. *Trakya Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 6(2), 62-77.
- Shahidin AM, Said MSM, Said NHM, Sazalı NIA (2017). Developing optimal nurses work schedule using integer programming. In *AIP Conference Proceedings (Vol. 1870, No. 1, p. 040031)*. AIP Publishing LLC.
- Schoenfelder, J., Bretthauer, K. M., Wright, P. D., & Coe, E. (2020). Nurse scheduling with quick-response methods: Improving hospital performance, nurse workload, and patient experience. *European Journal of Operational Research*, 283(1), 390-403.
- Topaloğlu & Selim (2010) Topaloğlu, S. & Selim, H., Nurse scheduling using fuzzy modeling approach, *Fuzzy Sets and Systems*, 161: 1543–1563.
- Tsai, C.C. ve Li, S.H.A., (2009). A two-stage modeling with genetic algorithms for the nurse scheduling problem, *Expert Systems with Applications*, 36: 9506–9512.
- Trivedi, V. M., (1981). A mixed-integer goal programming model for nursing service budgeting. *Operations Research*, 29(5): 1019 – 1034.
- Tsai CC, Li SH (2009). A two-stage modeling with genetic algorithms for the nurse scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 36(5): 9506-9512.
- Uslu, B., Bedir, N., Gür, Ş., & Eren, T., (2018). 0-1 hedef programlama yöntemi kullanılarak hemşire çizelgeleme probleminin çözümü. *Sağlık Akademisi Kastamonu*, 3(3), 1-23.
- Vanhoucke, M. & Maenhout, B., (2009). On the characterization and generation of nurse scheduling problem instances, *European Journal of Operational Research*, 196: 457–467.

- Varlı E, Tamer E (2017a). Vardiya çizelgeleme problemi ve bir örnek uygulama. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 10(2): 185-197.
- Varlı E, Tamer E (2017b). Hemşire çizelgeleme problemi ve hastanede bir uygulama. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 5(1): 34-40.
- Varlı E, Ergişi B, Eren T (2017). Özel kısıtlı hemşire çizelgeleme problemi: hedef programlama yaklaşımı. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, (49): 189-206.
- Van den Bergh, J., Beliën, J., De Bruecker, P., Demeulemeester, E., & De Boeck, L. (2013). Personnel scheduling: A literature review. *European journal of operational research*, 226(3), 367-385.
- Youssef, A. & Senbel, S. (2018). A bi-level heuristic solution for the nurse scheduling problem based on shift-swapping. 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), IEEE, Las Vegas, Nevada.
- Weil, G., Heus, K., Francois, P., & Poujade, M., (1995). Constraint programming for nurse scheduling, *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 14(4): 417 – 422.
- Wang SP, Hsieh YK, Zhuang ZY, OU NC (2014). Solving an outpatient nurse scheduling problem by binary goal programming. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 31(1): 41-50.
- Wolfe, H., & Young, J. P. (1965). Staffing the nursing unit part II. The Multiple Assignment Technique. *Nursing Research*, 14(4), 299-303.
- Warner, D. M. & Prawda, J., (1972). A mathematical programming model for scheduling nursing personnel in a hospital, *Management Science*, 19 (4-1): 411 – 422.
- Wright, D., & Mahar, S., (2013). Centralized nurse scheduling to simultaneously improve schedule cost and nurse satisfaction, *Omega*, 41 (6): 1042- 1052.
- Wright, P. D., & Bretthauer, K. M., (2010). Strategies for addressing the nursing shortage: coordinated decision making and workforce flexibility. *Decision Sciences*, 41, 373-401.
- Wright, P. D., Bretthauer, K. M., & Cote, M. J., (2006). Reexamining the nurse scheduling problem: staffing ratios and nursing shortages. *Decision Sciences*, 37: 39-70.
- Zanda, S., Zuddas, P., & Seatzu, C. (2018). Long term nurse scheduling via a decision support system based on linear integer programming: a case study at the university hospital in Cagliari. *Computers and Industrial Engineering*, 126, 337-347.



rGO/SnSbS Nanokompozitlerin Farklı Depolama Sıcaklığına Bağlı Elektriksel, Yapısal ve Yüzeysel Değerlendirmesi

Electrical, Structural, Surface Evaluation Depends on the Different Deposition Temperature of rGO/SnSbS Nanocomposites

Necmi Serkan Tezel¹ , İ. Afşin Kariper^{2,3} 

¹Department of Electrical-Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Karabük University, 78050, Karabük, Turkey

²Department of Science Educations, Faculty of Education, Erciyes University, 38039, Kayseri, Turkey

³Erciyes Teknopark, Building Number 1, No. 41, 38039, Kayseri, Turkey

Başvuru/Received: 24/01/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Bu çalışmada indirgenmiş grafen oksit/sülfosalt (rGO/SnSbS) nanokompozit yapıları ticari cam taban malzemeler üzerine kimyasal banyo depolama (CBD) metodu ile 20, 40, 60 ve 80 °C sıcaklıklarda üretilmiştir. Yapısal olarak düşük sıcaklık değerlerinde amorf yapıya sahiptir ancak 80 °C sıcaklıkta Sn₂Sb₂S₅ kristallenmeleri gözlenmiştir. Artan depolama sıcaklığına bağlı 125,22 nm, 126,27nm, 132,95 nm ve 157,16 nm kalınlıklı nanokompozit yapıların daha homojen ve yoğun yapışkan kıvama geldiği görülmüştür. Elektriksel dirençleri ise four-point probe metodu ile film kalınlığına bağlı olarak I-V ölçümlerinden hesaplanmıştır ve sıcaklığın artması ile elektriksel dirençlerin düştüğü görülmüştür. Elde edilen verilere göre sıcaklığın etkisi ve kullanım alanları tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“*İnce film; CBD; Sülfosalt; Elektriksel direnç; Depolama sıcaklığı*”

Abstract

In this study, reduced graphene oxide/sulfosalt (rGO/SnSbS) nanocomposite structures were produced at temperatures of 20, 40, 60 and 80 °C with chemical bath deposition (CBD) method on commercial glass substrates. Structurally, it has an amorphous structure at low temperature values, but crystallizations of Sn₂Sb₂S₅ have been observed at the temperature of 80 °C. It has been observed that nanocomposite structures with thickness of 125.22 nm, 126.27nm, 132.95 nm and 157.16 nm due to increased deposition temperatures have a more homogeneous and dense adhesive consistency. Their electrical resistance was calculated from I-V measurements depending on the film thickness using the four-point probe method, and it was observed that the electrical resistance decreased with increasing temperature. According to the obtained results, the effect of temperature and their usage applications have been discussed.

KeyWords

“*Thin film; CBD; Sulfosalt; Electrical Resistivity; Deposition Temperature*”

1. Giriş

Sülfosaltlar A'nın metalik malzemeleri, B'nin yarımetalik malzemeleri temsil ettiği X'in ise kükürt (S) ya da nadiren Selenyum (Se) olabileceği $A_mB_nX_p$ kimyasal formülüne sahip kompleks bir sülfid mineralinden türetilen bileşikler olarak tanımlanır (Dittrich vd., 2009). Fiziksel buhar biriktirme (PVD), RF püskürtme, sprey proliz, sputtering, electro-deposition, darbeleri lazer birikimi, vakum buharlaştırma, sonokimyasal sentez, elektron ışını, kimyasal buhar biriktirme, termal buharlaştırma, kimyasal banyo depolama gibi yöntemler kullanılarak hazırlanan sülfosalt malzemelerin birçok özelliği çeşitli araştırmaların konusu olmuştur (Gutwirth vd., 2008; Manolache vd., 2007; Mellouki vd., 2018; Wagner vd., 2004). Tek ve polikristal güneş pillerinin aksine, ince filmler daha iyi bir alternatif olabilmektedir, çünkü az miktarda malzeme, gereksinimi karşılayabilir. İnce film güneş pillerinin verimliliği %19'a ulaşsa da, ince film emici malzeme için uygun bant boşluklarına sahip ucuz, daha az toksik, bol ve basit iki veya üç bileşenli emici malzemelerin keşfi üzerine araştırmalar devam etmektedir (Ismail vd., 2014). Bugüne kadar, ticari malzemeler olarak güneş pili uygulaması için kalay antimon sülfür ince filmlere dayanan üçlü malzemelerin kullanımına yeterince dikkat edilmemiştir (Mellouki vd., 2018). Sb, sülfosalt gibi nispeten bol elemente dayanan cis malzemelerine ve yeni yarı iletkenlere alternatif olarak yeni üçlü bileşikler hazırlamak amacıyla $SnSb_2S_4$ ince filmler potansiyel adaylar gibi görünmektedir, ancak yaygın olarak çalışılmamıştır (Gassoumi&Kanzari, 2011). $SnSbS$ sistemi son zamanlarda fotovoltaik alanında araştırılmaktadır, çünkü araştırmalar güneş pili üretimi için basit bir teknoloji ile sentezlenebilen uygun maliyetli ve toksik olmayan malzemelerin geliştirilmesine yöneliktir (Abdelkader vd., 2015). $SnSbS$ yarıiletken, düşük ve doğrudan bant aralığı nedeniyle, fotovoltaik, termoelektrik enerji dönüşümü, X-ışını dedektörleri, optik ve çeşitli sensör tipleri, optik fiberler, ince film güneş filmleri gibi teknolojik alanlardaki uygulamaları sayesinde dikkatleri üzerine çekmektedir (Dittrich et al., 2009; M. Armand & J.-M. Tarascon, 2008).

Fosil yakıtlara bağımlılık sonucu ortaya çıkan olumsuz çevre koşulları sebebiyle yenilenebilir enerji kaynakları kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle taşınabilir elektronik ve elektrikli araçlarda beklenen yüksek performans sebebiyle lityum iyon bataryalar ve süperkapasitörler gibi enerji depolama teknolojileri dikkat çekmektedir. Yüksek kapasiteli, uzun ömürlü ve iyi döngü kapasitesine sahip yeni elektrot malzemelerinin geliştirilmesi oldukça önem arz etmektedir. Sn, Sb ve $SnSb$ gibi metal bazlı anot malzemelerinin, mevcut lityum iyon bataryalarda (LIB) grafit anotlarının yerini almaya en uygun aday olduğu düşünülmektedir (Chen & Cheng, 2009; He vd., 2014; M. Armand & J.-M. Tarascon, 2008; Wu evd., 2013; Zou & Wang, 2011). LIB'lar için Sn bazlı materyaller 990 mAhg^{-1} ile yüksek teorik kapasite sağlayarak, anot materyalleri için umut vaat etmiştir (Lakshmi vd., 2017; Yi vd., 2017; G. Zhang vd., 2014). Ancak şarj-deşarj esnasında yaşanan oldukça yüksek hacim değişimi, malzemenin bozulmasına neden olarak döngü ömrünü ve uygulama potansiyelini olumsuz etkilemektedir (He vd., 2015). Ancak Sn-Sb gibi Sn bazlı intermetalik alaşımlar bu sorunların üstesinden gelmektedir (Dong vd., 2018; Nithyadharseni vd., 2015; L. Zhang vd., 2016). Sn ve Sb'nin spesifik kapasiteye katkıda bulunan lityum iyonlarını saklama kapasitesi ve kademeli lityum yerleştirme mekanizması sayesinde, hacim genişlemesini engelleyebilir ve elektrodun mekanik stabilitesini artırarak $SnSb$ alaşımının tek bir Sn veya Sb fazından daha iyi elektrokimyasal performans elde etmesini sağlayabilmektedir (Antitomaso vd., 2016; Fan vd., 2018; Tesfaye vd., 2017; Wang vd., 2016; Xia vd., 2016, 2017).

Mellouki ve arkadaşları (Mellouki vd., 2018) vakum termal buharlaştırma yöntemiyle elde ettikleri $SnSb_2S_4$, $Sn_2Sb_2S_5$ and $Sn_3Sb_2S_6$ ince filmlerini, özellikle fotovoltaik termal hibrit (PVT)'ler için güneş pilleri uygulamaları amacıyla yapısal ve termal özelliklerini araştırmışlardır. $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de tavllanmış $SnSb_2S_4$ ince filmin, güneş pili uygulaması için iyi bir aday olarak görülmüştür. Abdelkader ve arkadaşları (Abdelkader vd., 2014) ise termal olarak buharlaştırılmış $SnSb_4S_7$, $Sn_2Sb_6S_{11}$, $SnSb_2S_4$, $Sn_4Sb_6S_{13}$, $Sn_2Sb_2S_5$ ve $Sn_3Sb_2S_6$ ince filmleri için belirledikleri optik parametreler sonucunda, tüm malzemelerin görünür aralıkta 10^4 ve $2 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ arasında nispeten yüksek absorpsiyon katsayılarına sahip olduğunu ve $Sn_xSb_yS_z$ filmlerinin sırasıyla 1.87 ila 1.46 eV ve 1.71 ila 1.37 eV arasında değişen dolaylı ve dolaysız E_{gd} ve E_{gind} boşlukları gösterdiklerini tespit etmişlerdir. Huang ve arkadaşları (Huang vd., 2018) elektrospinning metodu kullanılarak potasyum iyon batarya anotları olarak $SnSb$ -G-C gözenekli çok kanallı yapıya sahip nanofiberleri sentezlemişlerdir. $SnSb$ -G-C anotları 100 mAg^{-1} akım yoğunluğunda 100 çevrimin üzerinde $275,14 \text{ mAhg}^{-1}$ lik büyük çevrim stabilitesi gösterirken, 1 Ag^{-1} de $207,27 \text{ mAhg}^{-1}$ yüksek kapasiteye sahip olduklarını belirlemişlerdir. Jena ve arkadaşları (Jena vd., 2018) lityum iyon bataryaları için indirgenmiş GO tabakaları arasına nitrojen (N) katkılanmış sandviç bir yapı olan Sn-SnSb aktif matrisi alaşımını sentezlemişlerdir. N-rGO ile tasarlanan Sn-SnSb nano kompozit anotlarda özelliklerin bu kombinasyonu 2. çevrim boşalma spesifik kapasitansı 705 mAg^{-1} ; $0,1 \text{ Ag}^{-1}$ de 200 çevrimden sonra ise spesifik kapasitans 500 mAhg^{-1} 'dir. 120 çevrim için $0,8 \text{ Ag}^{-1}$ de 400 mAhg^{-1} kalan kapasiteyi göstermektedir. % 10 ve % 40 oranlarında N-rGO nanokompozit mevcut ticari grafitik anotlara göre oldukça iyi bir performans göstermiştir.

Bu malzemelerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri, hazırlama yöntemi, film kalınlığı, tavlama sıcaklığı ve substrat sıcaklığı gibi birçok faktöre bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada, cam lameller üzerinde indirgenmiş grafen oksit rGO/ $SnSbS$ nanokompozit yapıları Kimyasal Banyo Depolama Metodu (CBD) vasıtasıyla farklı depolama sıcaklıklarında ($20 \text{ }^\circ\text{C}$, $40 \text{ }^\circ\text{C}$, $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $80 \text{ }^\circ\text{C}$) üretilmiştir. XRD ve FTIR ile yapısal özellikleri, FESEM ile iki boyutlu (2D), AFM ile üç boyutlu (3D) yüzey morfolojileri analiz edilmiştir. EDX ile de bileşim analizleri belirlenen rGO/ $SnSbS$ nanokompozit yapılar için akım-voltaj (I-V) ölçümlerinden ve film kalınlıklarından yararlanarak elektrikselsel direnç değişimleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında rGO/ $SnSbS$ nanokompozit yapıların sıcaklığa bağlı olarak yük taşıma kabiliyetleri ve dolayısı ile kullanım alanları hakkında bilgiler edinilecektir.

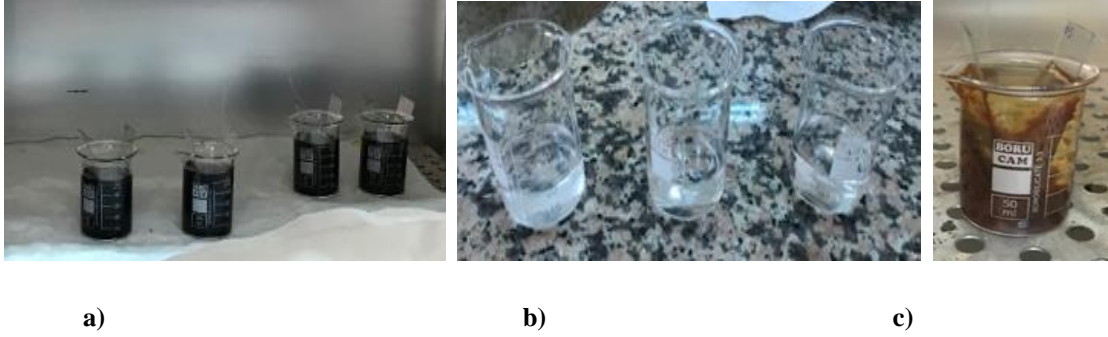
2. Deneysel Yöntem

2.1. rGO/SnSbS Nanokompozitlerin Sentezi

rGO/SnSbS nanokompozit yapıların sentezi üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada grafen oksit çözeltisi hazırlanmıştır. 0,16 g grafen oksit (GO), 25 ml metanol (CH_3OH) içinde çözdürülmesiyle hazırlanan GO çözeltisinin üzerine 75 ml damıtık su eklenerek, 50°C 'de ultrasonik banyoda 15 dk karıştırılıp grafen oksit çözeltisi elde edilmiştir. Daha sonra 30 ml distile su içerisine 20 ml grafen oksit çözeltisi eklenmiştir ve dört ayrı beherde hazırlanmıştır. Bu dört grafen oksit çözeltilerine birer adet cam lamel daldırılmış ve 80°C 'de 50 dk fırın içerisinde bekletilmiş ve çıkarılan numuneler kurumaya bırakılmıştır.

İkinci aşamada ise, daha kısa sürede çözünmenin meydana gelmesi için, üç ayrı beher içerisinde sırasıyla 0,0456 g (2×10^{-4} mol) Antimon Klorür (SbCl_3) katısı 20 ml metanolde (CH_3OH), 0,0379 gr (2×10^{-4} mol) Kalay Klorür (SnCl_2) katısı 20 ml metanolde (CH_3OH) ve 0,0480 g (2×10^{-4} mol) Sodyum Sülfür (Na_2S) katısı 20 ml metanolde (CH_3OH) çözdürülmüş ve 3 ayrı beherde toplam 60 ml üç ayrı çözelti hazırlanmıştır.

Son aşamada ise, 80 ml beher içerisinde hazırlanan bütün çözeltiler bir araya getirilerek dört adet 60 ml'lik SnSbS turuncu renkli kimyasal banyo hazırlanmıştır. Sonrasında grafen oksit çözeltisinden çıkarılıp kurutulan cam lameller 60 ml'lik SnSbS kimyasal banyo içerisine yerleştirilerek 20°C , 40°C , 60°C ve 80°C sıcaklıklarda 1 saat süreyle ayrı ayrı etüve yerleştirilmiştir. Kimyasal depolama sonunda banyolardan çıkarılan numuneler saf su ile yıkanıp kurutularak rGO/SnSbS/cam nanokompozit yapılar elde edilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. a) Cam lamellerin rGO ile kaplanması, b) Üç ayrı beherde sırası ile 20 ml antimon klorür, sodyum sülfür ve kalay klorür çözeltileri, c) cam lamellerin 60 ml'lik SnSbS kimyasal banyoda depolanması.

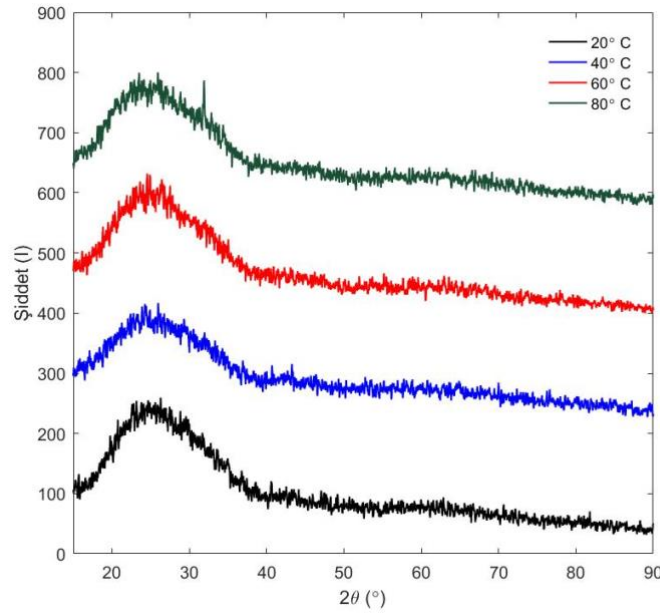
2.2. Analizler

X-ışını kırınım desenleri (XRD), $10^\circ < 2\theta < 90^\circ$ aralığında bir $\text{CuK}\alpha_1$ radyasyon kaynaklı XRD kırınım cihazı (Bruker AXS D8 model, $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) ile 3° 1/dk. hızında 0.02° lik bir step ile ölçülmüştür. GO ve SnSbS titreşim pikleri ise FTIR (Bruker Alpha) ile karakterize edilmiştir. Numunelerin iki boyutlu (2D) yüzey morfolojileri FESEM (Carl Zeiss Ultra Plus Gemini FESEM) ile incelenmiş; film kalınlığı, üç boyutlu (3D) yüzey morfolojileri ve yüzey pürüzlülükleri AFM (Veeco Multimode 8) ile incelenmiştir. Bileşim analizleri ise EDX ile yapılmıştır. Elektriksel direnç performansları ise Keithley 2400 Sourcemeter ve 2100/220 Keithley multimeter cihazından oluşan dört nokta tekniği I-V ölçümleri alınarak hesaplanmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Yapısal, yüzeysel ve bileşim karakterizasyonu

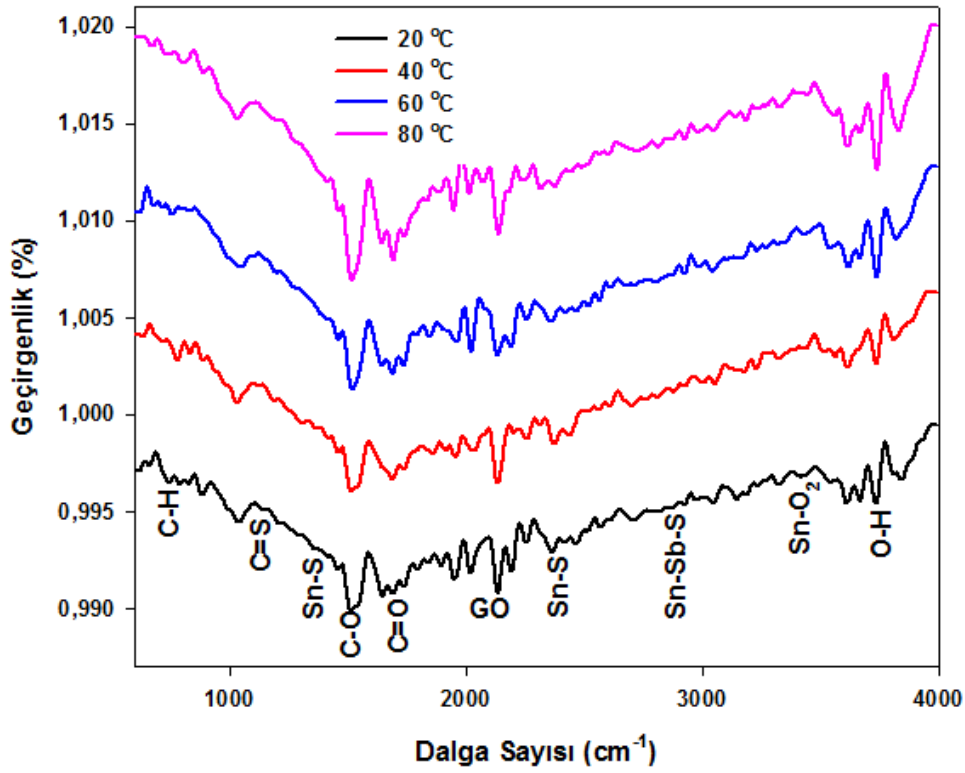
rGO/SnSbS nanokompozit yapıların farklı depolama sıcaklıklarında (20°C , 40°C , 60°C ve 80°C) $2\theta = 10^\circ - 90^\circ$ 'de elde edilen XRD kırınım pikleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Farklı Sıcaklıklarda Depolanan rGO/SnSbS Nanokompozit Yapıların XRD Kırınım Desenleri.

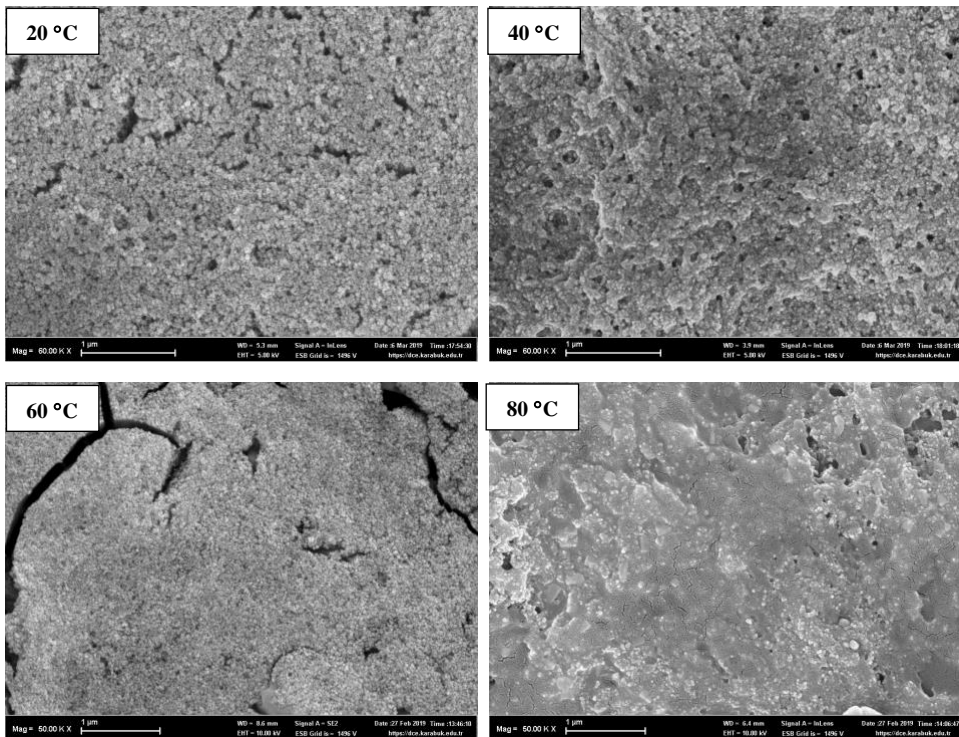
Farklı depolama sıcaklıklarında (20 °C, 40 °C, 60 °C ve 80 °C) elde edilen rGO/SnSbS yapılarına ait, 20, 40 ve 60 °C için XRD kırınım desenlerinde belirgin bir şekilde amorf yapı gözlenmiştir. Ancak 80 °C için yarı amorf-kristalli yapıya sahip olduğu görülmektedir. $2\theta=31.94^\circ$ de elde edilen (6 0 2) Miller indisli $\text{Sn}_2\text{Sb}_2\text{S}_5$ (JCPDS, card no. 35-1469) kristal yapının oluştuğu belirlenmiştir. Sıcaklığın artması ile atomların termal enerjileri artmasına rağmen kararlı pozisyonda yönlenmeye devam etmişlerdir. $\text{Sn}_2\text{Sb}_2\text{S}_5$ kristalleri düşük substrat sıcaklığında kristallenmektedir. $2\theta=31,65^\circ$, $31,67^\circ$ ve $31,58^\circ$ de sırası ile SnSb_2S_4 , $\text{Sn}_2\text{Sb}_2\text{S}_5$ ve $\text{Sn}_3\text{Sb}_2\text{S}_6$ fazlarının güçlü kırınım pikleri vardır. Ancak bu fazların içerisinde $\text{Sn}_2\text{Sb}_2\text{S}_5$ fazı en yüksek ve keskin pik gösterir. Mellouki ve arkadaşları vakum termal buharlaştırma yöntemi ile elde ettikleri SnSbS ince filmleri 200 °C’de tüp fırın içerisinde tavlama işlemi yapmışlardır. Tavladıktan sonra SnSb_2S_4 , $\text{Sn}_2\text{Sb}_2\text{S}_5$ ve $\text{Sn}_3\text{Sb}_2\text{S}_6$ ’dan oluşan polikristalli yapı elde etmişlerdir. Hem Mellouki ve arkadaşlarının (Mellouki vd., 2018) hem de Abdelkader ve arkadaşlarının (Abdelkader vd., 2014) $\text{Sn}_2\text{Sb}_2\text{S}_5$ fazı için, yapılan bu çalışmadaki kristal yapılarla uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

rGO/SnSbS nanokompozit yapıların kimyasal bağlarını belirlemek amacıyla yapılan FTIR analizleri, 600 ile 4000 cm^{-1} dalga sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3’te verilen sonuçlara göre 746 cm^{-1} ’de oluşturulan pikler C-H gerilme titreşimlerini, 1498 cm^{-1} C-O piklerini (Nasrollahzadeh vd., 2014; Sudesh vd., 2013), 1694 cm^{-1} ’de C=O titreşimlerini (<https://www.chemguide.co.uk/analysis/ir/interpret.html>; 2019), 1151 cm^{-1} ’de C=S titreşimlerini (Duan vd., 2016), 1385 cm^{-1} ve 2354 cm^{-1} ’de Sn-S titreşimlerini (Khel vd., 2005; Mariappan vd., 2011), 3409 cm^{-1} ’de ise Sn-O₂ titreşimlerini (Akram vd., 2016) ve son olarak 2862 cm^{-1} ’de Sn-Sb-S titreşimlerini (Li vd., 2015) göstermektedir. Alt tabakada kayda değer miktarda film oluştuğundan yaklaşık 2000 cm^{-1} ’de grafen oksitin gerilme titreşimi (Nasrollahzadeh vd., 2014; Sudesh vd., 2013) gözlemlenebilmekte, bu nedenle yapıdaki diğer kimyasal bağların titreşimi düşük kalmaktadır. Ancak bu gerilme titreşimleri belirgin olduğu için şekil üzerinde gösterilmemiştir. Bu çalışmada elde edilen FTIR analizlerindeki Sn-Sb-S, Sn-S, Sn-O₂, C=S, C-O ve C=O gerilme titreşimleri elde edilen filmlerin bileşimlerini doğrulamak için yapılmıştır.

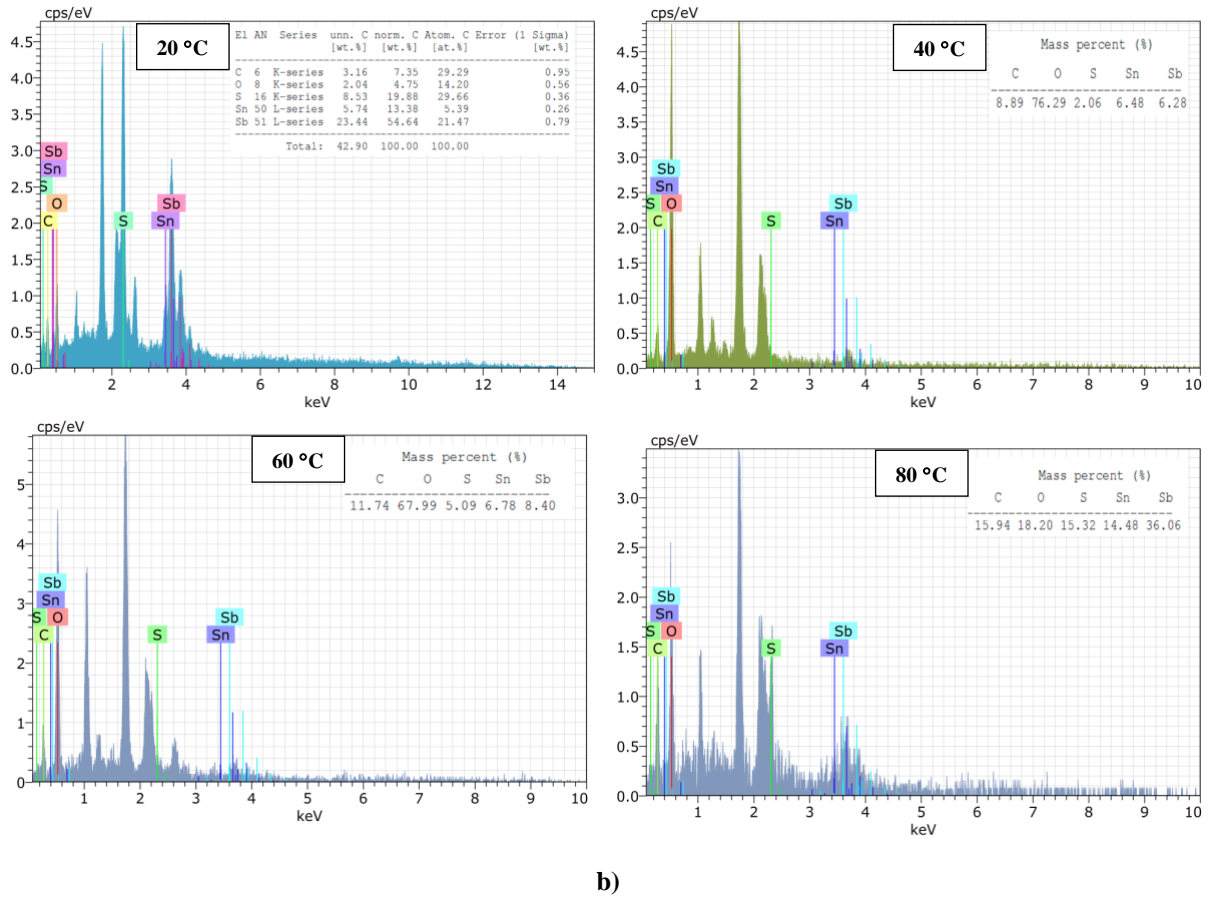


Şekil 3. rGO/SnSbS nanokompozit yapıların farklı depolama sıcaklıklarına bağlı FTIR analizleri ve titreşim pikleri.

rGO/SnSbS nanokompozit yapıların 20 °C, 40 °C, 60 °C ve 80 °C depolama sıcaklıklarındaki FESEM görüntüleri ve EDX sonuçları sırası ile Şekil 4 (a ve b)'de gösterilmektedir. Aynı büyütme oranlarında incelenen görüntülerde, genel olarak homojen görünmekle birlikte aralarında boşlukların ve çatlakların olduğu görülmektedir. Sıcaklığın artması ile birlikte gözenekler çatlaklara dönüşmüş ve sıcaklığın 80 °C'ye ulaşması ile yapışkanimsi bir görüntü elde edilmiştir. Aynı büyütme faktörlü görüntüler olmasına rağmen 20 ve 40 °C sıcaklıklarda tanelerin daha iri olduğu görülmektedir. Depolama sıcaklığının artması ile tanelerin küçüldüğü, yapının sıklaştığı ve ponza taşına benzer gözenekli yapıların olduğu görülmektedir.



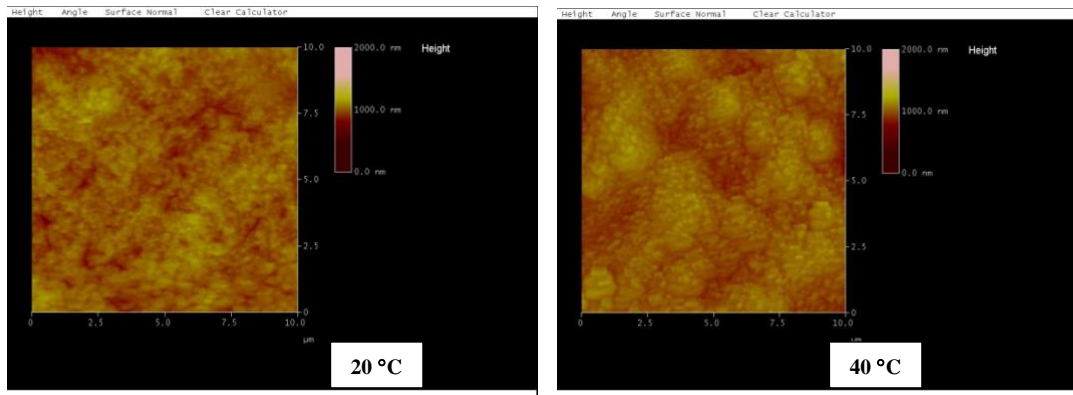
a)

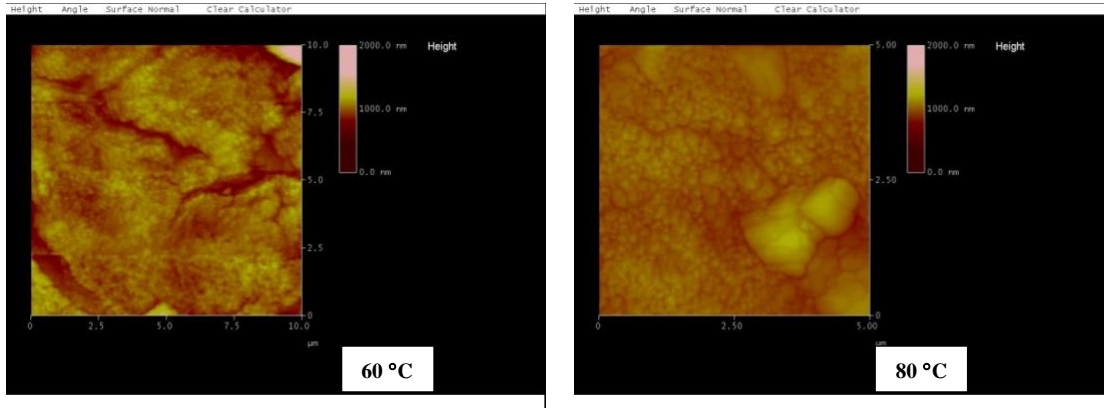


b)

Şekil 4. rGO/SnSbS nanokompozit yapıların farklı depolama sıcaklıklarına bağlı a) FESEM görüntüleri, b) EDX analizleri.

rGO/SnSbS nanokompozit yapıların farklı depolama sıcaklıklarına (20 °C, 40 °C, 60 °C ve 80 °C) bağlı üç boyutlu yüzey morfolojileri ve yüzey pürüzlülüklerinin AFM analiz sonuçları Şekil 5'de verilmiştir. rGO/SnSbS nanokompozit yapıların yüzey pürüzlülükleri (kabalıkları) artan depolama sıcaklıklarına göre sırası ile 44,11 nm, 68,86 nm, 70,17 nm ve 52,35 nm olarak belirlenmiştir. rGO/SnSbS nanokompozit yapıların artan depolama sıcaklıklarına göre kalınlıkları ise sırası ile 125,22 nm, 126,27 nm, 132,95 nm ve 157,16 nm olarak belirlenmiştir. Buna göre depolama sıcaklığının artması ile kalınlıkların arttığı, yüzeylerin daha homojen hale geldiği ve 80 °C'de kristalit yapıların düzgün bir yapı oluşturduğu görülmektedir.



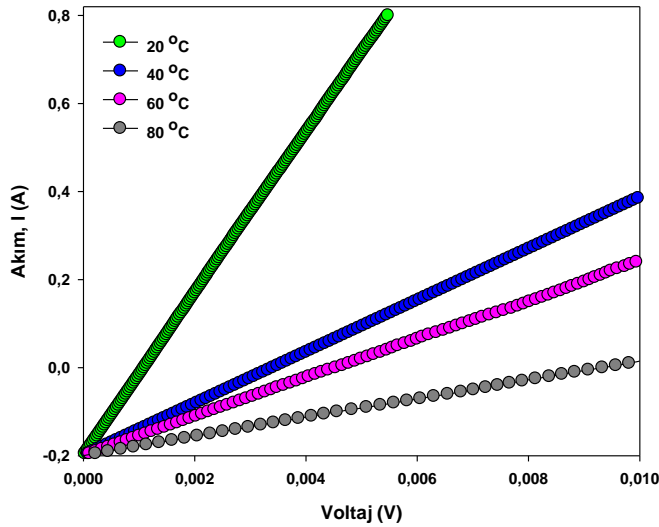


Şekil 5. rGO/SnSbS nanokompozit yapıların farklı depolama sıcaklıklarına bağlı AFM analizi.

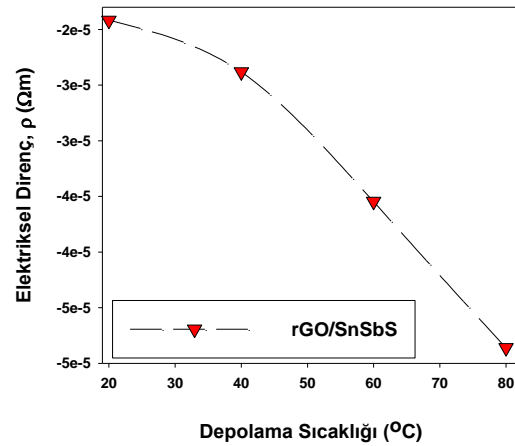
3.2. Elektriksel direnç karakterizasyonu

rGO/SnSbS nanokompozit yapıların farklı depolama sıcaklıklarına (20 °C, 40 °C, 60 °C ve 80 °C) bağlı akım-voltaj (I-V) ölçümleri Keithley 2400 sourcemeter ve 2100/220 Keithley multimetre cihazlarından oluşan dört nokta tekniği (four point probe) ile -0,2 ile +0,8 V aralığında alınmıştır. Kullanılan probe'ların yarıçapları 0,5 mm' dir. Probe'ların arasındaki uzaklık 1 mm olacak şekilde ayarlanmıştır ve gümüş pasta ile oluşturulan kontaklara hafifçe dokundurulmuştur. Bütün ölçümler oda sıcaklığında ve karanlık ortamda alınmıştır. rGO/SnSbS nanokompozit yapıların farklı depolama sıcaklıklarına (20 °C, 40 °C, 60 °C ve 80 °C) bağlı elektriksel direnç değerleri AFM analizi ile belirlenen kalınlıkları yardımı ile denklem (1) (Tezel vd., 2019-a; Tezel vd., 2019-b) kullanılarak hesaplanmıştır. Burada ρ elektriksel direnç, I akım, V potansiyel fark, t ise kalınlıkları ifade etmektedir. rGO/SnSbS nanokompozit yapıların farklı depolama sıcaklıklarına (20 °C, 40 °C, 60 °C ve 80 °C) bağlı I-V ve ρ -T grafikleri Şekil 6 (a ve b)'de verilmiştir.

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right) \quad (1)$$



a)



b)

Şekil 6. rGO/SnSbS nanokompozit yapıların farklı depolama sıcaklıklarına (20 °C, 40 °C, 60 °C ve 80 °C) bağlı a) akım-voltaj (I-V), b) Elektriksel Direnç-Sıcaklık (ρ -T) grafiği.

Buna göre rGO/SnSbS nanokompozit yapıların depolama sıcaklığı arttıkça elektriksel öz direnç değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi vardır; birincisi sıcaklık arttıkça rGO/SnSbS nanokompozit yapıların kalınlıkları artmıştır ve amorf yapılar yarı amorf-kristalli yapılara dönüşmüştür. İkincisi ise EDX analizlerinden görüldüğü üzere elementel oranın artması ile elektriksel iletkenliğin artıp direncin düşmesidir.

4. Sonuçlar

Bu çalışma rGO/SnSbS nanokompozit yapıların farklı depolama sıcaklığına bağlı yapısal, yüzeysel ve elektriksel direncin araştırılmasını ortaya koymuştur. Elde edilen verilere göre sıcaklığın artması ile amorf yapıdan, yarı kristalli amorf yapılara dönüşüm gözlenmiştir. Ayrıca bu nanokompozit yapıların kalınlıkları sıcaklığın artması ile artmıştır ve bu durum yüzey morfolojilerinin daha homojen ve daha yoğun olmasını sağlamıştır. Sıcaklığın artması ile kalınlıkların artmasının yanı sıra elementel oranın da artması, elektriksel direncin düşmesine neden olmuştur. Böylesi düşük dirence sahip nanokompozit yapılar yük depolama cihazları/aparatları/elektrotları, güneş pilleri, güneş panelleri, ısı sensörleri, güç kaynakları-UPS, kamera flaşları, TV uydu alıcıları, yakıt hücreleri, taksi metreler, hibrit elektrik araçlar, diz üstü bilgisayarlar, uçakların acil çıkış kapılarındaki elektronik devreler vb. alanlarda kullanıma sahiptir.

Teşekkür

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından KBÜBAP-21-DS-012 nolu proje ile desteklenmiştir. Finansal desteklerinden dolayı KBU-BAP birimine teşekkür ederiz.

Referanslar

- Abdelkader, D., ben Rabeah, M., Khemiri, N., &Kanzari, M. (2014). Investigation on optical properties of $\text{Sn}_x\text{Sb}_y\text{S}_z$ sulfosalts thin films. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 21(1), 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2014.01.027>
- Abdelkader, D., Chaffar Akkari, F., Khemiri, N., Gallas, B., Antoni, F., &Kanzari, M. (2015). Structural and spectroscopic ellipsometry studies on vacuum-evaporated $\text{Sn}_{2m-4}\text{Sb}_4\text{S}_{2m+2}$ ($m = 2.5, 3$ and 4) thin films deposited on glass and Si substrates. *Journal of Alloys and Compounds*, 646, 1049–1057. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.06.114>
- Akram, M., Saleh, A. T., Ibrahim, W. A. W., Awan, A. S., &Hussain, R. (2016). Continuous microwave flow synthesis (CMFS) of nano-sized tin oxide: Effect of precursor concentration. *Ceramics International*, 42(7), 8613–8619. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.02.092>
- Antitomaso, P., Fraisse, B., Sougrati, M. T., Morato-Lallemand, F., Biscaglia, S., Aymé-Perrot, D., Girard, P., &Monconduit, L. (2016). Ultra-fast dry microwave preparation of SnSb used as negative electrode material for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 325, 346–350. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.06.010>
- Chen, J., &Cheng, F. (2009). Combination of light weight elements and nanostructured materials for batteries. *Accounts of Chemical Research*, 42(6), 713–723. <https://doi.org/10.1021/ar800229g>
- Dittrich, H., Stadler, A., Topa, D., Schimper, H. J., &Basch, A. (2009). Progress in sulfosalts research. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, 206(5), 1034–1041. <https://doi.org/10.1002/pssa.200881242>
- Dong, X., Liu, W., Chen, X., Yan, J., Li, N., Shi, S., Zhang, S., &Yang, X. (2018). Novel three dimensional hierarchical porous Sn-Ni alloys as anode for lithium ion batteries with long cycle life by pulse electrodeposition. *Chemical Engineering Journal*, 350, 791–798. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.031>
- Duan, J., Yu, J., Feng, S., & Su, L. (2016). A rapid microwave synthesis of nitrogen-sulfur co-doped carbon nanodots as highly sensitive and selective fluorescence probes for ascorbic acid. *Talanta*, 153, 332–339. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.03.035>
- Fan, W., Liu, X., Wang, Z., Fei, P., Zhang, R., Wang, Y., Qin, C., Zhao, W., & Ding, Y. (2018). Synergetic enhancement of the electronic/ionic conductivity of a Li-ion battery by fabrication of a carbon-coated nanoporous SnO: XSb alloy anode. *Nanoscale*, 10(16), 7605–7611. <https://doi.org/10.1039/c8nr00550h>
- Gassoumi, A., &Kanzari, M. (2011). Growth and post-annealing effect on the properties of the new sulfosalts SnSb_2S_4 thin films. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 44(1), 71–74. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2011.07.007>
- Gutwirth, J., Wágner, T., Némec, P., Kasap, S. O., &Frumar, M. (2008). Thermal and optical properties of AgSbS_2 thin films prepared by pulsed laser deposition (PLD). *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354(2–9), 497–502. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2007.08.083>

- He, M., Kravchyk, K., Walter, M., & Kovalenko, M. v. (2014). Monodisperse antimony nanocrystals for high-rate li-ion and na-ion battery anodes: Nano versus bulk. *Nano Letters*, 14(3), 1255–1262. <https://doi.org/10.1021/nl404165c>
- He, M., Walter, M., Kravchyk, K. v., Erni, R., Widmer, R., & Kovalenko, M. v. (2015). Monodisperse SnSb nanocrystals for Li-ion and Na-ion battery anodes: Synergy and dissonance between Sn and Sb. *Nanoscale*, 7(2), 455–459. <https://doi.org/10.1039/c4nr05604c>
- <https://www.chemguide.co.uk/analysis/ir/interpret.html>. (2019).
- Huang, Z., Chen, Z., Ding, S., Chen, C., & Zhang, M. (2018). Multi-protection from nanochannels and graphene of SnSb-graphene-carbon composites ensuring high properties for potassium-ion batteries. *Solid State Ionics*, 324, 267–275. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2018.07.019>
- Ismail, B., Mushtaq, S., Khan, R. A., Khan, A. M., Zeb, A., & Khan, A. R. (2014). Enhanced grain growth and improved optical properties of the Sn doped thin films of Sb₂S₃ orthorhombic phase. *Optik*, 125(21), 6418–6421. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.06.138>
- Jena, S., Mitra, A., Patra, A., Sengupta, S., Das, K., Majumder, S. B., & Das, S. (2018). Sandwich architecture of Sn–SnSb alloy nanoparticles and N-doped reduced graphene oxide sheets as a high rate capability anode for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 401, 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.058>
- Khel, L. K., Khan, S., & Zaman, M. I. . (2005). SnS thin films fabricated by normal electrochemical deposition on aluminium plate. *J. Chem. Soc. Pak.*, 27(1), 24–28.
- Lakshmi, D., Nalini, B., Sivaraj, P., & Jayapandi, S. (2017). Electroanalytical studies on indium incorporated SnSb alloy anode for Li-ion batteries. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 801, 459–465. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.08.010>
- Li, Y., Huang, L., Zhang, P., Ren, X., & Deng, L. (2015). Synthesis of Si-Sb-ZnO Composites as High-Performance Anodes for Lithium-ion Batteries. *Nanoscale Research Letters*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s11671-015-1128-4>
- M. Armand, & J.-M. Tarascon. (2008). Building Better Batteries. *Nature*, 451, 652–657.
- Manolache, S., Duta, A., Isac, L., Nanu, M., Goossens, A., & Schoonman, J. (2007). The influence of the precursor concentration on CuSbS₂ thin films deposited from aqueous solutions. *Thin Solid Films*, 515(15 SPEC. ISS.), 5957–5960. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.12.046>
- Mariappan, R., Mahalingam, T., & Ponnuswamy, V. (2011). Preparation and characterization of electrodeposited SnS thin films. *Optik*, 122(24), 2216–2219. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2011.01.015>
- Mellouki, I., Mami, A., Bennaji, N., & Fadhli, Y. (2018). Study of doping and annealing effects on thermal properties of Sn_xSb₂Sy (1 ≤ x ≤ 3, 4 ≤ y ≤ 6) sulfosalts thin films by electro-pyroelectric technique. *Thermochimica Acta*, 670, 123–127. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2018.10.021>
- Nasrollahzadeh, M., Jaleh, B., & Jabbari, A. (2014). Synthesis, characterization and catalytic activity of graphene oxide/ZnO nanocomposites. *RSC Advances*, 4(69), 36713–36720. <https://doi.org/10.1039/c4ra05833j>
- Nithyadharseni, P., Reddy, M. v., Nalini, B., & Chowdari, B. V. R. (2015). Electrochemical investigation of SnSb nanoparticles for lithium-ion batteries. *Materials Letters*, 150, 24–27. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.02.124>
- Sudesh, Kumar, N., Das, S., Bernhard, C., & Varma, G. D. (2013). Effect of graphene oxide doping on superconducting properties of bulk MgB₂. *Superconductor Science and Technology*, 26(9). <https://doi.org/10.1088/0953-2048/26/9/095008>
- Tesfaye, A. T., Yücel, Y. D., Barr, M. K. S., Santinacci, L., Vacandio, F., Dumur, F., Maria, S., Monconduit, L., & Djenizian, T. (2017). The Electrochemical Behavior of SnSb as an Anode for Li-ion Batteries Studied by Electrochemical Impedance Spectroscopy and Electron Microscopy. *Electrochimica Acta*, 256, 155–161. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.10.031>
- Tezel, N. S., Tezel, F. M., & Kariper, I. A. (2019a). Surface and electro-optical properties of amorphous Sb₂S₃ thin films. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 125(3). <https://doi.org/10.1007/s00339-019-2475-2>
- Tezel, N. S., Tezel, F. M., & Kariper, I. A. (2019b). The impact of pH on the structural, surface, electrical and optical properties of nanostructured PbSe thin films. *Materials Research Express*, 6(7). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab1675>
- Wagner, T., Krbal, M., Nemeč, P., Frumar, M., Wagner, T., Vlček, M., Perina, V., Macková, A., Hnatovitz, V., & Kasap, S. O. (2004). AgAsS₂ amorphous chalcogenide films prepared by pulsed laser deposition. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 79(4–6), 1563–1565. <https://doi.org/10.1007/s00339-004-2848-y>

- Wang, H., Wu, Q., Cao, D., Lu, X., Wang, J., Leung, M. K. H., Cheng, S., Lu, L., & Niu, C. (2016). Synthesis of SnSb-embedded carbon-silica fibers via electrospinning: Effect of TEOS on structural evolutions and electrochemical properties. *Materials Today Energy*, 1–2, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2016.11.003>
- Wu, H., Yu, G., Pan, L., Liu, N., McDowell, M. T., Bao, Z., & Cui, Y. (2013). Stable Li-ion battery anodes by in-situ polymerization of conducting hydrogel to conformally coat silicon nanoparticles. *Nature Communications*, 4. <https://doi.org/10.1038/ncomms2941>
- Xia, X., Li, Z., Xue, L., Qiu, Y., Zhang, C., & Zhang, X. (2017). The electrochemical performance of SnSb/C nanofibers with different morphologies and underlying mechanism. *Journal of Materials Research*, 32(6), 1184–1193. <https://doi.org/10.1557/jmr.2016.508>
- Xia, X., Li, Z., Zhou, H., Qiu, Y., & Zhang, C. (2016). The effect of deep cryogenic treatment on SnSb/C nanofibers anodes for Li-ion battery. *Electrochimica Acta*, 222, 765–772. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.11.034>
- Yi, Z., Han, Q., Geng, D., Wu, Y., Cheng, Y., & Wang, L. (2017). One-pot chemical route for morphology-controllable fabrication of Sn-Sb micro/nano-structures: Advanced anode materials for lithium and sodium storage. *Journal of Power Sources*, 342, 861–871. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.01.016>
- Zhang, G., Zhu, J., Zeng, W., Hou, S., Gong, F., Li, F., Li, C. C., & Duan, H. (2014). Tin quantum dots embedded in nitrogen-doped carbon nanofibers as excellent anode for lithium-ion batteries. *Nano Energy*, 9, 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.06.030>
- Zhang, L., Lu, L., Zhang, D., Hu, W., Wang, N., Li, Y., & Zeng, H. (2016). Dual-buffered SnSe@CNFs as negative electrode without standing lithium storage performance. <http://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/>
- Zou, Y., & Wang, Y. (2011). Sn@CNT nanostructures rooted in graphene with high and fast Li-storage capacities. *ACS Nano*, 5(10), 8108–8114. <https://doi.org/10.1021/nn2027159>



An Overview to Unmanned Aerial Vehicles from Perspectives of Quality and Safety Management in Aviation

Ozlem Senvar^{1*} , Seckin Unver^{1,2} 

¹Marmara University, Department of Industrial Engineering, TURKEY

²Getir Perakende Lojistik A.Ş., TURKEY

Başyuru/Received: 28/01/2022

Kabul / Accepted: 27/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Abstract

Aviation is one of the pioneer industries of technology and military aviation has been a big contributor to the technological developments in the industry. The Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have been in the military domain for years; however, their civil applications are fairly new and rapidly expanding. Due to their capabilities and ease of handling, they have been utilized in various operations such as monitoring, surveillance, remote sensing and delivery. Although their engines and avionics have been improved, there have been still major challenges with UAVs in terms of reliability, safety and maintenance. Quality and safety management concepts are inevitable for civil aviation industry and liable to many regulations and standards. These concepts are not yet fully established for UAVs and the regulations and standards are still in progress. The objective of this study is to provide an overview to UAVs from perspectives of quality and safety management in aviation. Additionally, new trends, developments and research areas are discussed as well.

Key Words

“Unmanned aerial vehicle (UAV), Drone, Quality management, Safety management”

1. Introduction

Quality and safety management of services are more difficult compared to manufacturing because a product or a good is more tangible than a service and circumstances or preferences influence the perception of that service. Additionally, too much is at stake in service operations in terms of customer lives if safety risks present. Due to the increasing demand for air travel, the terms quality and safety have more emphasis in the aviation domain more than ever. In order to satisfy this demand, airline organizations aim to have competitive advantage by focusing on providing high quality and safety with affordable prices.

The aviation industry has an especially critical role for providing fast connections for people by linking the distant parts of the world. Usually, this is a very desired and advantageous quality. However, in some rare occasions, this high-paced and intensely technological service may end up in disastrous situations very quickly. Thus, preventive actions are taken continuously to avoid these unwanted scenarios. The modern aviation organizations today are well-informed about terms such as risk management, hazard identification, and quality engineering and management. These terms create a framework for the organizations to focus on required areas to maintain a safe and reliable working environment. Beside these terms, aviation industry is subject to various regulations and legislations developed by both international and national organizations such as Federal Aviation Administration (FAA) (FAA - AC 120-92B, 2006), European Union Aviation Safety Agency (EASA) (EASA - EU OPS 1.037, 2008) and ICAO (ICAO - Annexes 1 to 18, 2012). These regulations create a base for quality and safety standards for all aviation organizations and their ground and flight operations.

Very recently, the world has been facing such a situation where the airspaces became the main focus of the 2019-2020 global pandemic of COVID-19 outbreak and because people weren't prepared for it, international agents had to act fast and come up with special regulations concerning aviation safety. Especially during the first months of the global disaster, the whole world population was challenged with unprecedented global safety risk against their health or even their lives which mostly spread through all continents via commercial flights and airports. Although the aviation industry is one of the main actors responsible for spreading the virus globally, it is also one of the victims of the global pandemic and its effects. The COVID-19 pandemic has been affecting the aviation industry since the beginning of 2020 and the most severe effect was economical. According to the International Civil Aviation Organization (ICAO), there has been a loss of 74% international and 50% domestic passengers on average and approximately USD 371 billion loss on revenue throughout the entire industry (ICAO, 2021). This downfall was not isolated and impacted on other industries in chain as well. Besides airlines, connected sectors such as airports, aircraft manufacturers, food and retail services, and eventually global tourism and tourism-dependent businesses are all negatively (Gössling, 2020). Overall, this was an eye-opening lesson for all organizations and all human beings in general about how important risk and safety management in today's very global world are, especially in the aviation industry as it is ensuring most of the international connections

Due to these recent developments and in order to handle the operations advertently, ICAO published a new guidance on COVID-19 safety risks in aviation (ICAO - Doc 10144, 2020). This publication aims to help countries while addressing safety risks arising in aviation and produced for civil aviation authorities and national aviation regulators. The new handbook contains new adjustments to overcome the challenges created by the pandemic.

In the digitalization era, one of the recent focuses is fully autonomous systems supported by artificial intelligence (AI). Self-driving cars, trucks or pilotless aircrafts are developed via AI technology. Among the emerging robotic technologies, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have powerful flight and movement capabilities in comparison to other non-aerial robotic systems. UAVs are an emerging technology and a new branch in the aviation ecosystem. Their capabilities create new potential business areas, in fact, it is expected to see over 100,000 new UAV-related jobs in the United States alone by the year 2025 (Rana et al., 2016). In recent years, there has been an increasing interest in the studies and applications related to UAVs (Al-Turjman, 2020)(Shakhatreh et al., 2019)(Otto et al., 2018). Due to this recent interest, both international and national aviation authorities such as ICAO and EASA are rushed to establish regulations in order to control and organize the adrift utilization trend of UAVs (ICAO - Circular 328-AN/190, 2011) (EASA - NPA 2017-05 (A), 2017). Beside their popularity in other areas, UAVs are a hot topic in aviation for various operations such as maintenance, inspection and control as well (Sappington et al., 2019). However, the increasing popularity of UAVs will expand their utilization to many other areas in the coming years. The restrictions and limitations caused by COVID-19 also supported this popularity further. Especially in crowded areas, where it is a health risk to be during a pandemic, UAVs are used in many applications with different purposes such as crowd surveillance and screening, public announcements and supply deliveries (Chamola et al., 2020). According to Yatıştırın and Yaz, (Yatıştırın & Yaz, 2020), UAVs have been utilized in various domains like military defense systems, agriculture, transportation, and etc.. Especially in transportation, tech giants such as Amazon and global logistics giants such as UPS and DHL are promoting the utilization of UAVs in this area for almost a decade (Özoğlu et al., 2019). With the help of wireless technologies and the advancement in studies focusing on extending battery life, we will see the transformation in the workplace and operation field as several other of the operations will be taken over and carried out by robotic systems. The first phase of this study is briefly describing the role of quality and safety management from the viewpoint of the aviation industry. The next phases focus on the concepts of reliability, maintenance, resilience engineering and their use in civil aviation. Then, as the main focus, UAV technologies and their fields of applications, especially in the aviation industry, are detailed. Although COVID-19 global pandemic revealed the extra benefits of UAV utilization, there are still both technologic and legal limitations, since their capabilities for aerial operations make them a part of the aviation industry and liable to its regulations. Thus, the aim of this study is to create a framework for UAVs from the perspective of quality and safety management practices in aviation,

along with the applications of reliability and maintainability concepts. In addition to UAV technologies, several new trends and developments in aviation are discussed as well. New research areas such as data science, machine learning, augmented and virtual reality, artificial intelligence and mobile technologies and their current and potential application opportunities are presented in the last phase of the study.

2. Quality and Safety Management in Aviation

Quality management concept has been investigated extensively over the past few decades. A few of the pioneer thoughts on quality management concept gather around constant innovation through top management (Deming, 1986), cost cutting via quality improvement (Crosby, 1979), quality improvement to reduce the cost of poor quality (Juran & Gryna, 1993), quality control by involving individually and personal responsibility (Ishikawa, 1985) and customer-oriented quality (Feigenbaum, 1991). Quality management in general, is a tool which ensures the products and/or services of an organization meet the demand of customers and requirements of regulations and organization itself.

The aviation is one of the pioneer industries in terms of technologies, services and operations. Airplane manufacturing, flight procedures and upkeeping measures are all synchronized and policies ensure that the quality standards are met during all these procedures. Business activities in aviation, or airline industry particularly, is mainly consist of flight and ground operations, engineering and maintenance and finally sales and marketing as seen in Figure 1 (Subagyo, 2002).

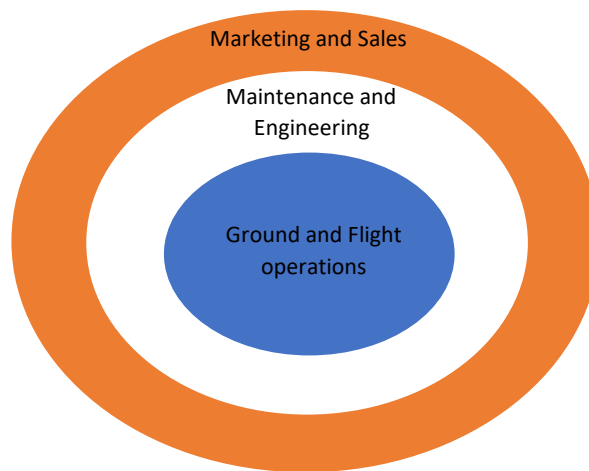


Figure 1. Framework of aviation operations (Subagyo, 2002)

Ground and flight operations are at the core of the aviation activities. Maintenance and engineering activities support the ground and flight activities while ensuring safety in operations. Marketing and sale activities only apply in civil aviation but it is a major part as well since the aviation industry itself has a constantly growing economy with a rate between 4.6% and 4.9% annually (Schmidt, 2017).

International legislations and regulations enforce aviation organizations to comply their airport, pilot, air traffic controller and aircraft maintenance training programs, as well as their operations to ensure airworthiness and flight safety. In order to meet the regulatory quality standards of civil aviation authorities, aviation procedures, programs and equipment should be monitored by the quality assurance system. International Organization for Standardization (ISO) defines the quality assurance system as systematic actions to provide confidence that the organization will fulfill the quality requirements. In ISO 9001:2015, the systematic actions as the eight quality management principles for all organizations to follow in order to develop an integrated quality management system are defined as below (ISO 9001:2015, 2015):

- I. Customer focus: meet the current and future customer requirements,
- II. Leadership: create unity of direction and purpose and provide environment for engagement of people,
- III. Engagement of people: respect all individuals at all levels and involve them,
- IV. Process approach: understand the underlying system properties and analyze the results,
- V. System approach to management: understand and manage interconnected processes as one coherent system,
- VI. Improvement: create new opportunities and react to changes,
- VII. Evidence-based decision making: understand the importance of cause-and-effect connection and unintentional potential consequences,
- VIII. Relationship management: optimize the impact of interested parties on organizational performance by managing relationships.

These principles encourage the organizations to meet the requirements while improving the processes continuously, which ultimately constitute the base for Quality Management System for the organizations.

While using a product or a service, injuries, accidents or different adverse consequences may happen. In order to prevent these consequences, some principles, measures, processes and frameworks should be applied. Safety management is mainly utilized to apply these preventive actions and helps design better operational systems while predicting systemic shortcomings before occurrence or identifying and correcting such failures (Hollnagel, 2018).

In aviation, safety management concept covers the processes which structure flight safety such as aerodrome operations management or air navigation. Strategically, aviation safety management mainly relied on reactive risk management guidelines up until the 90s, then reactive strategies evolved into advanced risk management strategies with more preventive precautions (Stolzer & Goglia, 2016). Reactive safety management is based on:

- Minimum safety measures and preventive actions.
- Low level of safety due to reported safety incidents. Furthermore, these reports are limited only to actual failures and no safety trends affect the reports due to insufficient data.
- Measures taken after the incident happens to prevent re-occurrence.

Predictive safety management is based on:

- Forecasting future for potential incident occurrences.
- Identifying potential risk areas by analyzing operations.
- Regular system analysis and reviews.

Proactive safety management on the other hand, is based on the following:

- Upper management's commitment to safety through safety policies,
- Risk management and hazard identification,
- Safety occurrence reporting of safety related data,
- Safety performance assessment and monitoring,
- Training for safety-related personnel,
- Building safety culture throughout the organization (McDonald et al., 2014).

These actions, all as integrated, increase the system preparedness for unsafe conditions and, it is generally referred as Safety Management System to utilize safety strategies in a consistent manner. Safety evaluation and safety enhancement for particular components of UAVs should be taken into account considering failures. As a matter of fact, failure rates of UAVs are higher than the failure rates of manned aircrafts (Bone & Bolkcom, 2003) in which failures face both safety and financial risks (Segal & Bot, 2018).

2.1. Quality management systems in aviation

In the early stages of aviation industry, the major aerospace manufacturers adopted the ISO quality standards which covers the requirements of the automotive industry. However, aerospace suppliers had specific requirements which ISO 9001 standards did not address. Thus, AS9000 quality standards, based on ISO 9001, are developed by the International Aerospace Quality Group (IAQG) in order to provide immediate solutions for aviation industry (Barker, 1998). Later on, IAQG expanded these standards into global forms in order to help the original equipment manufacturers to operate globally (IAQG, 2019). The current standards developed by IAQG are listed as below:

- AS9100 - Quality Management Systems - Requirements for Aviation, Space and Defense Organizations
- AS9101 - Quality Management Systems - Audit Requirements for Aviation, Space, and Defense Organizations
- AS9102 - Aerospace First Article Inspection Requirement
- AS9103 - Aerospace Series - Quality Management Systems - Variation Management of Key Characteristics
- AS9104/1 - Requirements for Aviation, Space, and Defense Quality Management System Certification Programs
- AS9104/2 - Requirements for Oversight of Aerospace Quality Management System Registration/certification Programs
- AS9104/3 - Requirements for Aerospace Auditor Competency and Training Courses
- AS9107 - Direct Delivery Authorization Guidance for Aerospace Companies
- AS9110 - Quality Management Systems - Requirements for Aviation Maintenance Organizations
- AS9114 - Direct Ship Guidance for Aerospace Companies
- AS9115 - Quality Management Systems - Requirements for Aviation, Space and Defense Organizations - Deliverable Software
- AS9116 - Aerospace Series - Notification of Change (NOC) Requirements
- AS9117 - Delegated Product Release Verification
- AS9120 - Quality Management Systems - Requirements for Aviation, Space and Defense Distributors
- AS9131 - Aerospace Series - Quality Management Systems - Nonconformance Data Definition and Documentation
- AS9132 - Data Matrix Quality Requirements for Parts Marking
- AS9133 - Qualification Procedure for Aerospace Standard Products
- AS9134 - Supply Chain Risk Management Guideline

- AS9136 - Root Cause Analysis and Problem Solving (9S Methodology)
- AS9137 - Guidance for the Application of AQAP 2110 within a 9100 Quality Management System
- AS9138 - Aerospace Series - Quality Management Systems Statistical Product Acceptance Requirements
- AS9145 - Aerospace Series - Requirements for Advanced Product Quality Planning and Production Part Approval Process
- AS9146 - Foreign Object Damage (FOD) Prevention Program - Requirements for Aviation, Space, and Defense Organizations
- AS9162 - Aerospace Operator Self-Verification Programs

Although AS9100 standards are derived from ISO 9001 series, the main differences rest on the industry-specific requirements. AS9100 series contain additional quality and safety standards and differs from the ISO standards by their scope, term definitions and realization of products.

2.2. Safety management system in aviation

As mentioned earlier, a Safety Management System (SMS) is a systematic approach in order to manage safety risks. It requires planning and organizing, providing directions and communication to fully function and as a result, it continuously improves the overall safety for aviation system (Cacciabue et al., 2015).

According to Advisory Circular 120-92 published by the Federal Aviation Administration (FAA), there are four basic components that the SMSs structured on (FAA - AC 120-92B, 2006):

1. **Safety policy:** Defined policies and procedures to accomplish SMS goals. It outlines the steps for accessing acceptable levels of organizational safety.
2. **Safety planning:** Implementation of hazard identification and safety risk management procedures to contain operational risks.
3. **Safety assurance:** After these controls are determined, operations must be monitored and controls are practiced continuously to achieve predetermined objectives.
4. **Safety culture:** Safety must be advocated as a core value and practiced throughout the organization.

2.2.1. SMSs in airline industry

Airline organizations provide the service of air transport for passengers and freightage in a continuously growing industry, as mentioned earlier. In order to cope with this growth in general, extra measures should be considered under the roof of SMSs. However, instead of merely applying regulatory requirements to comply with the authorities, SMSs can be utilized to achieve key goals by enhancing safety performance. There are a number of regulations prepared by different organizations and are expected to be followed by airline businesses. The Convention on International Civil Aviation: Annex 6 prepared by ICAO, divides the aircraft operations in three parts as:

1. International commercial air transport,
2. Aircrafts in international general aviation,
3. Helicopters in international operations,

and suggests a comprehensive safety program on operations of aircraft (ICAO - Annexes 1 to 18, 2012). EASA provides safety requirements under flight safety program (EASA - EU OPS 1.037, 2008). The program suggests that:

1. Flight safety and accident prevention program shall be established and must include:
 - Risk awareness for operation-related personnel,
 - Accident and incident occurrence reporting scheme,
 - Evaluation of accidents and incidents on information base,
 - Flight data monitoring program with safeguards to protect data,
 - Appointment of program manager
2. Program manager shall be responsible for the results of the applied program
3. Quality manager shall monitor the effectiveness of the program.

2.2.2. SMSs in aerodrome operations

Aerodrome safety basically involves the safety of general aviation airfields, military airbases and large commercial airports. Safety at aerodromes includes procedures, responsibilities, organizational structure, provisions and processes and the aerodrome operator provides the safety control and safe use of aerodrome (ICAO - Doc 9774, 2001). Also, Annex 14 defines actions to ensure the safety of the aerodromes as below (ICAO - Annexes 1 to 18, 2012):

- Aerodromes must have obstacle-free airspace to ensure the safety of approaches and departures of aircrafts.
- The volume of the airspace must allow the growth and existence of the aerodrome.
- Safety performance targets must be set for operations such as pavement maintenance, movement area safety and electrical services.
- National regulations and ICAO standards must be complied continuously
- Audit of the aerodrome must be arranged both internally and externally for the inspection of equipment and facilities.
- Operational and maintenance records as well as facilities related to safety must be documented.

- Adequacy of the personnel and their safety-related training must be provided.
- Construction works on aerodrome must have system control measures and relevant procedures must be incorporated to safety-related clauses.

2.2.3. SMSs in air traffic management

Assisting departure, air transit and landing of an aircraft, air traffic services, airspace and air traffic flow and capacity management operations are collected under the roof of Air Traffic Management. ICAO Annex 11 dictates the safety of air traffic services by implementation of a SMS which is acceptable and conducted by and air traffic service provider (ICAO - Annexes 1 to 18, 2012). The main goal here is to prevent aircraft collisions while taking off, landing, maneuvering, in the holding or en route. Maintaining a flow order in air traffic and providing information for efficient and safe flights, alerting the operators for distressed aircrafts are defined as the air traffic safety objectives as well. These services can be maintained by:

- Safety hazards identification.
- Implementation of remedial actions to maintain the safety on an acceptable level.
- Constant monitoring and routine evaluation of the achieved safety level.
- An objective to make consistent enhancements to the overall safety level.

2.3. New trends in quality and safety management in aviation

Although quality management in aviation, having only been introduced at the end of 1990's, is a relatively new concept, at its base the standards to follow have been quite steady with little to no change over the years. However, the notion's starting point coincides with the beginning of a very fast paced development era for the modern technology which also meant new developments for the aviation industry that ultimately caused new trends to appear in aviation generally, creating a certain need for coming up with some updates in standards for the quality and safety management concerning aviation.

In today's world, especially with commercial flights becoming more and more common, more advanced aviation SMS solutions are required for flight operations to ensure safety management in a systematic approach (ARC, 2018). According to the article, because of the quickly evolving SMS technology and best practices, 4 new trends have been recently determined to keep pace with:

- **Mobile safety management:** As we use our mobile devices more and more in our daily routines to take care of our problems and tasks so as the pilots and safety systems because mobile devices make most things quicker and simpler, therefore it is expected for Mobile Safety Management to become progressively relevant in the coming years. It is especially helpful for areas such as immediate reporting of incidents making it effortless to catch the most important details.
- **Data and metrics:** Better and more utilization of data will increase SMS performance since it will reveal risk patterns of incidents and prevent potential disasters.
- **SMS integration:** The trend on Integrated Aviation Management Systems will tie various elements such as security, safety, risk, quality and supplier management into an integrated system with efficient software environment which benefits from data and mobile capabilities.
- **Operational risk management:** Updating regulations and standard on a real-time basis will increase the change response ability and keep the SMS up-to-date.

Data science has become a major topic in various fields and in aviation as well (Chung et al., 2020). Real-time data with substantial amounts are available now regarding flight performance, flight information, airport operation flows and air traffic and weather conditions. Aviation organizations can easily advance operation and service effectiveness, ensure and improve safety in their environment and reduce their cost by analyzing these forms of data.

Airline industry is continuously growing and consequently, airline organizations are forced to expand their fleet due to increasing demand. This increase results in requirement of efficiently planning, organization and allocation of resources and manpower in areas such as maintenance. Using data science and analytics, operators will analyze the real-time and historical flight data of aircrafts, external factors such as weather and will organize their maintenance activities correspondingly (Eltoukhy et al., 2019).

Accurately planning and management of operational capacity is essential for operators to improve service quality, reduce costs and environmental impacts. By using statistical data analysis and forecasting methods effectively, aviation organizations will also be able to calculate the capacity-related stress factors on system which will also affect the flight and aircraft maintenance operations. Reliable and robust forecasting technologies will enable the development of the industry (Xu et al., 2019).

External factors such as weather conditions play a significant role on flight operations. Providing a safe flight mostly depends on the accurate weather activity observations and forecasts. Machine learning techniques will help accurately predicting weather activities which will eventually increase the safety of the operations, and the ability to manage the ground delay program as well

(Yulin Liu et al., 2019). Machine learning techniques will also help improve the runway safety by analyzing runway utilization and factors such as arrival runway occupancy time (Herrema et al., 2019).

Automation in air traffic control seems inevitable with the help of technologies such as Internet of Things (IoT) and artificial intelligence. Virtual air traffic control towers will replace the physical ones in near future and it is believed that it will increase the operation safety while decreasing operational costs drastically (Chung et al., 2020).

Beside VR in maintenance activities, Augmented Reality (AR) is another concept which is gaining traction in aviation maintenance in order to create an environment for human-machine collaboration (Palmarini et al., 2018). AR-supported aircraft and component inspections are encouraged to be implemented since it will definitely improve the fault detection success rate of human workers and the performance of procedures such as ground test instructions (Eschen et al., 2018).

3. Reliability and Maintenance in Aviation

Reliability is generally defined as the probability of a component or system, under some previously stated operational conditions, to operate without a failure for a specific period of time. Reliability engineering is the field of study focused on lifetime performance and dependability of these type of systems and components. Reliability engineering applications plays an important role on the lifecycle of a system or component by both as engineering and services. Engineering part mainly plays a role on design, growth planning and warranty and maintenance parts while services cover the repairable inventory systems, supplying spare parts and end-of-life product recycling and remanufacturing (see Figure 2) (Jin, 2019).

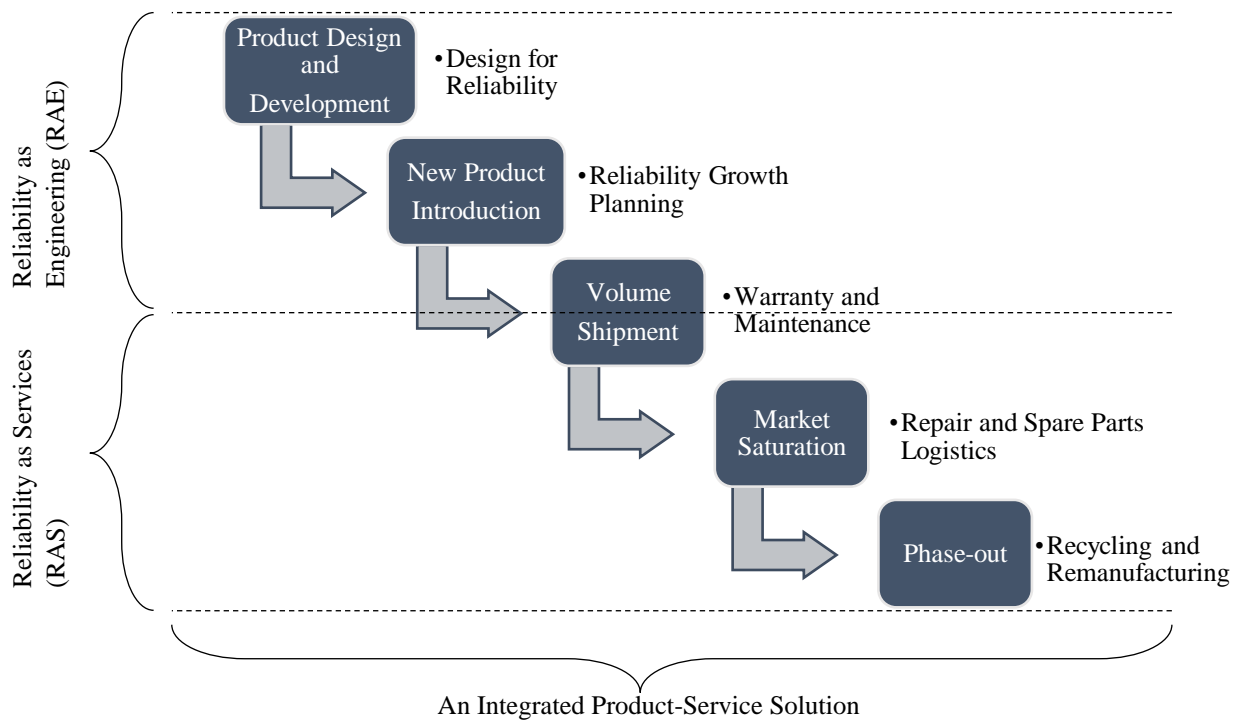


Figure 2. Reliability in product lifecycle management adopted from (Jin, 2019)

In aviation, reliability concept applies mainly on aircrafts during phases such as design, development, manufacturing and operation (Zio et al., 2019). Design solutions for systems and components are determined in order to fulfill design requirements in the design and development stage. Validation and verification are performed after the design and development stage to check the requirements if they are met by the design solution or not. These steps need to be repeated until the design requirements are met. Hereafter, the stage of large-scale manufacturing begins for aircraft production where quality assurance is the key factor to guarantee the fulfillment of production specifications. The manufactured aircrafts are delivered for field operation in the last stage. The reliability of an aircraft must be maintained during the operation stage of the aircraft as well. Increasing rate of using air travel creates safety concerns naturally, thus the term “airworthiness” certification, which will be explained later, is introduced and applied by aviation authorities to check if the aircraft producers follow the reliability requirements (Vieira et al., 2016).

The reliability of a UAV on the other hand, is correlated with the maintenance intervals. That is to say; there is a higher failure rate leading to very expensive repairs. It is important to enhance required reliability level by using high quality, derated components with a very detailed selection of a redundant subsystem during the design phase. For further directions, a very large number of variables for all systems and subsystems may be considered to minimize uncertainty (Petriloti et al., 2018).

3.1. Reliability in aviation

Reliability and safety are directly connected and both of them are high priority items on the agenda of aviation operators. Especially safety and reliability of the flight operations must be retained continuously by maintaining aircraft operability since the fragility and possible disastrous consequences of those operations. In order to maintain aircraft operability, operational requirements in respect to operational reliability must be met. Reliability in design must be allocated in component-level as well, in three main sub-group: hardware, software and human elements (Zio et al., 2019). Human reliability is especially important due to the high contribution of human error to accidents in aviation (ICAO, 2019).

Concepts of reliability are generally based on mathematical explanations and they may not be easily explained by only telling (Levin & Kalal, 2005). However, the importance of the subject dictates that a brief explanation for some of the basic concepts of reliability commonly used in aviation is to be given as follows:

The bathtub curve: It is one of the most fundamental concepts and it corresponds to displaying a way of failures in a product population as a cumulative number and represent as rate of failure instead of number of failures. As seen in Figure 3, it consists of three stages, namely infant mortality, useful life and wear-out phase.

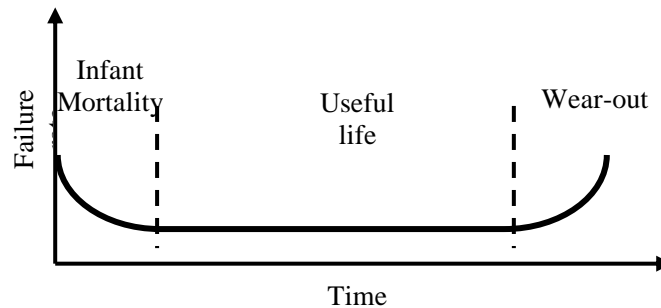


Figure 3. The bathtub curve

“Infant mortality” stands for quality related early phase failures or failures occur during initial product introduction. The steady line in the graph represents “Useful life” of a product where the failure rate is stabilized for a period of time. “Wear-out” phase means that the product has reached the end of its useful life and degradation failures are beginning.

Essential and Common Reliability Concepts Used in Aviation are explained as follows:

- **Mean residual life:** It represents the remaining life of a component or system, given that it has reached a certain time of its life.
- **Mean time between failure:** It measures the failure rate of a component or system during normal life period.
- **Mean time between repair:** It measures the time between repairs in average for a component or system.
- **Mean time between maintenances:** It measures the time between maintenance (both repair and preventive maintenance) in average for a component or system.
- **Mean time to failure:** It measures the average time until next failure for a non-repairable component or system.
- **Mean time to repair:** It measures the average time to repair and also represents the unavailability of a component or system during a repair.
- **Mean time to restore system:** It is similar to mean repair time, though with additional time spent during obtaining the needed parts to restore the component or system.
- **Reliability growth:** It measures the improvement of component or system reliability after removing the failure mechanisms. As a result, it is expected for mean time between failures to increase for each eliminated defect.
- **Reliability demonstration testing:** It is often confused with reliability growth; however, it is a process to ensure statistically that the predetermined reliability goal is reached. It starts just after the design is finalized the final product or state of the system is tested in the end. While reliability growth improves the mean time between failures of a component or system, reliability demonstration testing is utilized to verify the outcomes of that improvement.

Beside the general terms, there are also specific reliability performance indicators for aircraft operations as listed below (Zio et al., 2019):

- **In-flight shutdown rate:** The number of shutdowns or power losses on an engine during flight hours.
- **Mean time between unscheduled removal:** It is the ratio of total number of flight hours to the number of unscheduled removals of a component in a given period.
- **Mean flight hour between failure:** Failure rate of a component in terms of number of flight hours.
- **Engine shop visit rate (Time on wing):** It is obtained by dividing total number of visits occurred to the engine shop by the total number of flight hours in a given period.

3.2. Maintenance in aviation

The degradation and failure of objects vary due to their environment, design or usage intensity; however, effective maintenance controls these factors and helps maintaining a desired performance. In aviation, this is also valid for aircraft maintenance, since no aircraft is tolerant to corrosion, wear, fatigue or operational failures. Maintenance in aviation is a process to ensure that intended functioning of safety and reliability of the system continues to perform at designed-in level (Kinnison & Siddiqui, 2012). Aircraft maintenance is the most problematic part of maintenance in aviation due to its complex structure as it requires coordination and cooperation of the service groups such as engine, airframe, instrument, electrical and electronic (Kim & Song, 2016).

Airworthy is a term to define an aircraft or a component part belong to the aircraft which meets the corresponding type design and the condition of the aircraft or the component part is sufficient for safe operation (FAA - AC 43.13-1B, 1998). An aircraft must certify airworthiness by meeting certification codes prior to beginning service. It guarantees aircrafts or other airborne systems to avoid significant hazard to passengers, ground crew and air crew or other parties during operation and throughout its lifecycle. According to ICAO Annex 8, when an aircraft exceeds its limits specified in flight manual during operation may cause airworthiness invalidation (ICAO - Annexes 1 to 18, 2012). Also, in order to remain airworthy, continuous airworthiness is a key point in aviation and in a maintenance program to guarantee such permanence, maintenance needs must be fulfilled by both inspection functions and individual maintenance utilized by operators.

3.3. Reliability-Centered maintenance

The first industry to acknowledge the approach of Reliability-Centered Maintenance (RCM) is the aircraft industry and the term first used by F. Stanley Nowlan and Howard F. Heap for designing new and economically viable aircraft maintenance activities (Nowlan & Heap, 1978). It aims to identify preventive maintenance tasks in order to provide equipment reliability by exerting minimum resources. The focus here is to maintain the system function instead of returning the equipment to its ideal status. In aviation, each aircraft component is assessed for potential functional failures as well as failure modes and their effects and consequences. Next, a maintenance plan, which even lets the components to fail, is formed with the aim of increased reliability and lowered maintenance costs.

The main approach in RCM is the component and system prioritization considering the aftermaths of the failure. Preventable failures and their dominant causes are prioritized and appropriate maintenance policies are selected accordingly. In civil aviation, Maintenance Steering Group handbooks, MSG-1, MSG-2 and MSG-3, are developed by Boeing first for the Air Transport Association (ATA), known as Airlines For America (A4A) today. These documents provide the methodology to develop maintenance tasks and scheduled intervals for the manufacturers and the operators. The first handbook was published in 1968 and it was used for maintenance of Boeing 747 aircrafts. The latest updated version is the MSG-3 and it has two different volumes for fixed-wing aircrafts (A4A, 2018a) and rotorcrafts (A4A, 2018b). For modern commercial aircrafts, these documents provide methods to be used in development of initial maintenance requirements.

3.4. Maintenance applications in aviation

Maintenance applications in aviation are usually grouped as below (Hinsch, 2018):

Line maintenance: Maintenance activities performed before the flight to check the fitness of the aircraft for intended flight. It is also called Light maintenance and consist of limited and routine maintenance activities. It aims to modify defects on the aircraft which occur during flight and make the aircraft departure-ready to maintain the punctuality and steadiness of flight operations. Typical Line maintenance activities are:

- Troubleshooting and visual inspections.
- Defect rectification.
- Replacement of components which may include engines or propellers.
- Scheduled maintenance via superficial visual inspection to detect obvious failures.

Base maintenance: Also called the Heavy maintenance activities, they are performed less frequently than Line maintenance, however, contain more long-lasting and in-depth tasks. It aims to fix the faults occurred during Line maintenance and flight, to apply preventive maintenance and to verify airworthiness. Typical Base maintenance activities are:

- Periodic controls for deterioration of the engines, systems and airframe
- Defect rectification (may be performed during Line maintenance)
- Modifications and technology upgrades
- Cabin reconfiguration, aircraft painting

Technical support: Inspection and engineering services are part of the technical support where engineering services supports the field mechanic by providing technical resources and inspection checks the appropriateness of the maintenance process (Kim & Song, 2016). Beside the maintenance activities in the hangar or directly on the aircraft, various aircraft components such as navigational instruments, landing gears, hydraulic pumps and galleys are removed and delivered to specialized workshops with appropriate equipment and qualified staff for overhaul.

Virtual inspection and maintenance: Virtual Reality (VR) concept has been around for quite some time and it has a wide range of applications. In aviation, VR technologies are mainly adopted in maintenance design and operations in order to fix design faults which eventually affects maintainability or to inspect components of the aircraft for cracks or deformations. There are many applications of VR in aircraft maintenance such as disassembly processes (Zhou et al., 2010)(Z. Liu et al., 2014), engine component replacement (Amundarain et al., 2004), cargo bay inspection (Bowling et al., 2008). Virtual maintenance training is another aspect of VR applications in aviation which is evidently makes the environment safer and more economic for both technicians and operators (Vander Weide & Secretan, 2009).

3.5. Resilient systems in aviation

Safety always is the main issue in aviation given that the effects of an air disaster would be excruciating. Traditional risk assessment methods mainly concentrates on functional failures, however, the role of human and software are increasing in supervisory control, causing the dysfunctional interactions (Chialastri & Pozzi, 2008). A solution to this problem is by enhancing the ability of as system to create both robust and flexible processes through resilience engineering to endure for internal and external disruptions. As the accidents in a system are considered combination of unexpected events leading to disaster, resilience corresponds to the ability of the system to cope with these unexpected situations to avoid jeopardizing the whole system.

Resilience in aviation is a complex notion and has many shareholders. First, international authorities set the rules for air transport. For civil aviation in global, airlines must follow the criteria for Airworthiness of operation certificate and flight procedures which ICAO designed, and the national regulations as well (ICAO - Doc 9906, 2009). Then the responsibility falls to the actors of airline industry (Chialastri & Pozzi, 2008):

Manufacturers: Building the aircraft according to the regulations, selling after flight tests with operation manual.

Operators: Buying the aircraft from manufacturer and planning the operating schedule, providing crew with conduction rules beside the manual from manufacturer.

Crews: Flying the aircraft according to the international and national laws and regulations while following the procedures from manuals both from manufacturer and operator.

Auxiliary services: Airport services, maintenance, air traffic management and marketing services.

Besides autopilot features, which was still guided by pilots, automation in flight management is not an old concept and has been around thirty years. This concept is created in order to provide a strategic approach to automation. With the introduction of Flight Management System, input of a pilot is minimized by transferring management and computation of various flight aspect to the system and protection against issues caused by flying skills is provided. However, this might shift the risk factor as over-redundancy might keep the pilot from taking control when needed (Kongoli, 2012).

As any action has an effect on the final result, each operator in aviation shares the basic approach to safety since each individual working with aircrafts has the role of assuring safety. Thus in aviation, a knowledge-based approach is adopted on level of performance of a single operator to ensure the system resilience (Chialastri, 2011).

4. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)

UAVs or drones, as commonly referred to, are remotely controlled aircrafts with a degree of autonomy. UAVs are generally a part of a system called Unmanned Aircraft System (UAS) which consist of a ground-based control mechanism, an UAV and a communication system to link these two sub-systems (N. Singh et al., 2019). However, according to Joint Air Power Competence Centre (JAPCC), principally the structure of UASs have many components such as support elements, payload or data links, as displayed in Figure 4 (JAPCC - UAS CONEMP, 2010).

The first examples of UAVs were used in 1916 during American Civil War as attack balloons with explosives and the interest in UAVs began to rise during World War II and still continues to grow today (Demir et al., 2015). Although the initial purpose of using UAVs is purely military, several different types of UAVs are designed and developed since the beginning of the 21st century for various functions.

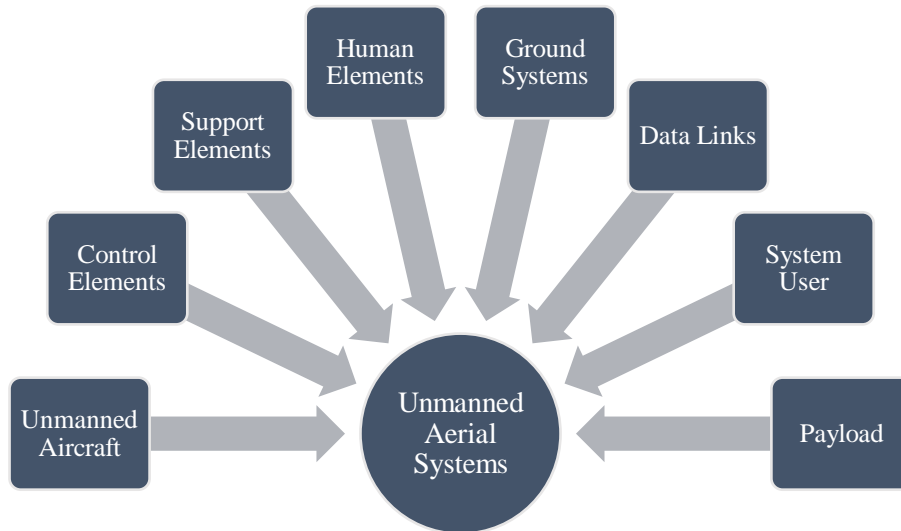


Figure 4. Fundamental elements of unmanned aerial systems (JAPCC - UAS CONEMP, 2010)

4.1. UAV types and applications

As previously mentioned, various types of UAVs can be listed according to their intended usage but can be grouped under three different categories such as military, industrial and commercial.

In military, UAVs are mainly utilized for surveillance and intelligence gathering, anti-aircraft target practices and aerial operations as attack aircrafts with weapon platforms. After civil applications of UAVs are allowed, numerous of them for industrial purposes are performed such as monitoring crops and lands, surveying power grids and lines, delivering small packages by companies working in agriculture, energy and logistic sectors, respectively. These features expanded the utilization areas of UAVs to capturing images or videos for movie industry and commercial agencies as well (N. Singh et al., 2019). Their ease of use and deployment, hovering ability and low cost of maintenance make them attractive for civil applications (Shakhatreh et al., 2019). Table 1 shows literature review of civil application areas for UAVs.

Table 1. Civil application areas for UAVs

Author (Year)	Focus of Application	Contribution Area
Vrba et al., (2022) Canisius et al., (2019)	<ul style="list-style-type: none"> Active sensing systems Passive sensing systems 	Remote Sensing
N. A. Khan et al., (2020) Mliki et al., (2020) Outay et al., (2020)	<ul style="list-style-type: none"> Traffic control Behavior recognition Roadside assistance 	Real-Time Monitoring
Du et al., (2019) Patil et al., (2022) Schweizer et al., (2018)	<ul style="list-style-type: none"> Locating missing individuals Delivering medicine, food and water to the injured Taking images of areas or infrastructures for damage assessment after disasters 	Search and Rescue
Yanchao Liu, (2019) Bhatt et al., (2018) Sumanth Reddy et al., (2019)	<ul style="list-style-type: none"> Food delivery Medicine and blood samples delivery Lightweight commercial products delivery 	Delivery of Goods
Ghazali et al., (2021) Wu et al., (2021) Tazibt et al., (2022) S. K. Khan et al., (2021) Marchese et al., (2019)	<ul style="list-style-type: none"> Network gateways Omnipresent coverage Data collection Relay nodes between wireless devices Worldwide coverage via satellites 	Providing Wireless Coverage

Table 1 (cont). Civil application areas for UAVs

Author (Year)	Focus of Application	Contribution Area
Fu et al., (2020) Christiansen et al., (2017) Romero et al., (2018) Façal et al., (2017) Kerkech et al., (2020) Stroppiana et al., (2018) Huuskonen & Oksanen, (2018) Kavoosi et al., (2020)	<ul style="list-style-type: none"> • Crop maturity and yield mapping • Field tile mapping • Irrigation scheduling • Pesticide spraying • Disease detection • Weed detection • Soil texture mapping • Residue cover and tillage mapping 	Precision Agriculture
Kas & Johnson, (2020) Gopalakrishnan et al., (2018) Tan et al., (2021) Jalil et al., (2019) Gu et al., (2020) Nordin et al., (2022)	<ul style="list-style-type: none"> • Infrastructure internal inspection • Surface degradation assessment and crack detection • Vertical inspection for towers and high rise • Power transmission lines inspection • Wind and oil/gas turbine inspection • Onshore and offshore asset inspection 	Infrastructure Inspection

Other than their operational purposes, the types of UAVs also differ according to their design features which affect their flying principles. In Figure 5, UAV types are classified first according to their vehicle mass, then the heavy types are further classified to rotor and wing types (Liew et al., 2017). Being wing-type, rotor-type or hybrid and vehicle mass determines their leveling, position holding, landing and take-off, flight time and distance functions as well (Hassanalian & Abdelkefi, 2017).

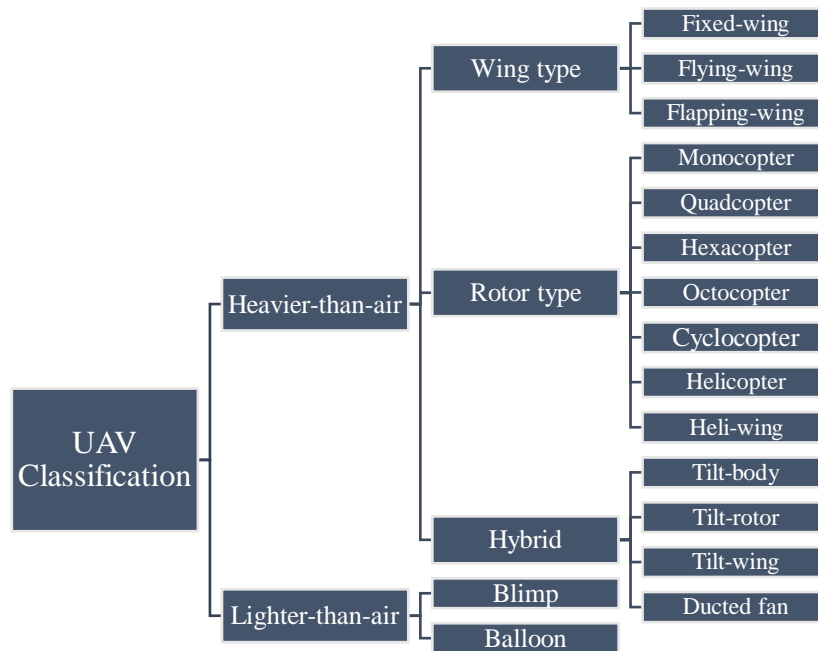


Figure 5. Classification of UAV types according to their flying principles adopted from (Liew et al., 2017) and (Hassanalian & Abdelkefi, 2017).

4.2. Limitations of UAVs in military and civil aviation

Being a fairly new element of the airspace, UAVs may pose potential risks to other elements in the sky or on the ground. Aviation authorities consider these risk factors to be minimized and as a result, certain regulations are established. These regulations mainly focus on minimizing the danger which UAVs pose to the manned aircrafts by regulating the airspace, securing appropriate flights with operational limitations and procedures such as pilot licenses flight permissions and data collection permissions (Stöcker et al., 2017).

The efforts to regulate UAV utilization in aviation was at national level starting from World War II until 2002 when a UAV task force was established by European Organization for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL) for the integration of UAVs into European Airspace via updating civil aviation regulations for UAVs (Stöcker et al., 2017). Until then, various standards and procedures are recommended by international civil aviation authorities for UAVs integration into national airspaces. Initially, ICAO published an international framework as a first step in global regulations (ICAO - Circular 328-AN/190, 2011), then published a toolkit with the purpose of establishing a global framework and declaring UAVs as equal partners of civil aviation as other aircrafts which also interacts with air traffic control on real-time (ICAO - Doc 10019, 2015). The Riga Declaration on Remotely Piloted Aircrafts was published in European Union for future UAV regulations (EASA, 2015c). This framework highlights five key points:

- I. UAVs are defined as a new type of aircraft and treated by new rules,
- II. UAV service safety rules are urged to be developed,
- III. For full integration of UAVs into European Airspace, development of technologies and standards are requested,
- IV. UAV services can grow further by public acknowledgment,
- V. Operator is the responsible figure for the use of UAV.

EASA also proposed common rules for operating UAVs (EASA, 2015a), regulatory framework for UAVs (EASA - NPA 2017-05 (A), 2017), and concept of UAV operations (EASA, 2015b) as regulatory frameworks. The State Airport Administration of Turkey (SAMA) is in the process of establishing new regulations for operating UAVs in Turkish national airspace (SAMA, 2022). According to these regulations, any individual or establishment must register their UAVs to the system before using and piloting certificate can be obtained as well through Directorate General of Civil Aviation website.

Utilization of UAVs brought vitally important ethical questions about their use. For utilization of UAVs, ethical issues regarding responsibilities for unintentional harm should be delicately anticipated. As a matter of fact, ethical principle of autonomy should be taken into account considering the humanitarian values, responsibilities and trusts.

UAVs are called as “Remotely Piloted Aircraft” by military and aviation authorities due to the fact that they fly under direct control of human operators. However, military requires greater autonomy in UAVs for reducing operating costs. For this reason, the responsibility for the actions of the UAV becomes ambiguous. For military utilizations of UAVs, when and where the law requires human presence in the decision cycle should be planned with respect to human interference with the weapon or weapon system. For further challenges, the vision of a world where decisions about life and death will be made by machines rather than human direct control must be considered urgently.

UAVs along with autonomous UAVs are facing challenges for the judiciary and ethics related to liability for damage. There are potential liability gaps in the moral and legal responsibility system which must be properly handled via technical solutions as well as official regulations. In the literature for UAVs, risk analyses, which have been handled considering mainly commercial systems through data from civil aviation, are based on probabilistic approaches without proposing hazards and respective requirements (Plioutsias et al., 2018).

4.3. Reliability, availability, maintenance and safety assessment

During the design phase of UAVs, critical parts which would increase the rate of failure can be detected through Reliability, Availability, Maintenance and Safety (RAMS) assessment (Petrinoli et al., 2018). RAMS assessment guarantees the ability of UAVs to perform a function given in design phase, to keep functioning in a particular environment, to be maintained easily and on time, and to not pose any harm during operations to those around the UAV. Considering the costs and limitations, RAMS predictions can distinguish a problematic element and estimate the value of a failure by finding the corresponding failure rate (Hao et al., 2009). The failure rate here helps finding the problematic area by considering all components and their failure rates.

Table 2. Classification of common UAV maintenance tasks (Hobbs & Herwitz, 2008)

	Scheduled	Unscheduled
Aircraft	<ul style="list-style-type: none"> • Verification of secure connections during assembly • Checking control actuators movement • Deflection measuring on control surfaces • Testing flight termination system • Balance and weight check for aircraft, placing balance weights if required • Battery charging • Aircraft fueling with accurate measurement 	<ul style="list-style-type: none"> • Correcting gasoline engine and fuel system problems • Repairing electrical connectors, airframe, landing skids and wheels • Tightening fasteners and screws loosened after flight vibrations • Responding to overheating avionics • Failed servo replacement • Repairing structural damages due to transport, packing and flight • Responding to payload changes

Table 2 (cont). Classification of common UAV maintenance tasks (Hobbs & Herwitz, 2008)

	Scheduled	Unscheduled
Ground Systems	<ul style="list-style-type: none"> • Computer battery charge verification • Checking for latest flight software and virus protection update • Confirming no background program or extraneous utilities running • Routine computer maintenance • Checking antennas and verifying connections, performing range checks 	<ul style="list-style-type: none"> • Responding to computer performance problems or software faults • Required software patch installation • Responding to viruses • If signal is interrupted, diagnosing and correcting the problem

4.4. UAV reliability

The reliability of a UAV can be ensured by first defining the failures which the UAV must be reliable for. The seriousness of a failure mainly depends on the outcome. When the type of the failure is defined, their criticality levels will be defined as well and it will be clearer to link them with the minimum acceptable reliability level (Blom, 2010). According to De Francesco et al. (De Francesco et al., 2014), for UAVs, there are four types of failures, which are described as follows: Catastrophic failures, where the UAV crashes with the possibility of injuries or death on the ground; Severe failures, where there is expectation of heavy damage and low probability of repair; Moderate failures, where there is no severe damage but moderate function degradation with the possibility of aborting mission; and Soft failures, where there is light damage on UAV but no mission cancellation.

The design phase and the completed design of an UAV is the main focus of reliability studies. The outputs of a reliability analysis, a list of recommendations and criticality points, provides feedback to the designers to fix the original design. This way, it is likely to achieve a higher level of reliability by taking measures and upgrading the system during the design phase of the UAV (Beard & McLain, 2012).

4.5. Maintenance for UAVs

As briefly described in Section 7.2, rapid growth in utilization of UAVs arise many concerns about operating these aircrafts safely. In this context, maintenance for UAVs generally aims to avoid outcomes of hazardous incidents such as damaging humans or assets on the ground by collision or damaging other airspace users while airborne. While having similarities with conventional maintenance in aviation, UAV maintenance has its own specific actions and procedures.

Airworthiness is also applicable for UAVs yet airworthiness certification is not required. According to the Title 14 Part 107 of Code of Federal Regulations, a civil UAV can only be operated by a person if it is in safe operation condition. The remote pilot must check the condition of UAV for safe operation before each flight (Electronic Code of Federal Regulations, 2016).

In general, maintenance activities for UAVs can be divided into two categories as scheduled and unscheduled maintenance (Hobbs & Herwitz, 2008). Scheduled tasks mainly consist of replacement of components, adjustments and routine inspections. Pre-flight functional tests, battery charging, fuel mixing and system assembly are included in scheduled tasks as well. In other respect, unscheduled tasks consist of damage identification and repair or replacement of components. Typical maintenance tasks for UAVs for the aircraft itself and ground control systems are shown in Table 2.

Beside the commonalities between conventional aviation and UASs, manufacturing standards and maintenance requirements are clearly different (Mrusek et al., 2018). Soydan et al. emphasized that surface quality of materials with high corrosion and high heat resistance are preferably considered in aviation (Soydan et al., 2020). Since UAV design and manufacturing processes have no standards, unlike manned aircrafts, various materials used on the UAS generally have no existing history of failure rates and maintenance issues. Links of data and communication and ground control units are critical systems, thus, safety of operations depends on continued airworthiness of these systems (Ley, 2016). UAVs are generally powered by consumer grade lithium batteries which are sensitive to deformation and heat and they require maintenance, inspection and extra care. Additionally, assembly and disassembly before and after each flight is not a standard procedure for most manned aircrafts, however for UAVs, this process has possible effects on the life expectancy of hardware components.

Along with hardware maintenance in UASs, the software and firmware are subject to maintenance as well (Mrusek et al., 2018). As part of the maintenance, these software and firmware are often updated and the update processes follow different paths from software update for manned aircraft avionics. For instance, one of the vital requirements of UAV relay networks is to preserve the connectivity between nodes in the network for providing reliable data communication. Connectivity maintenance in a UAV network can be a complicated task due to the fact that moving any node can affect the existing links between other nodes. Also, the software and firmware update management may require different skill set than the one which hardware maintenance needs.

4.6. UAV as a quality and safety assessment tool

The gradual shift in the commercial use of UAVs has emerged new utilization areas and opportunities. Remote sensing and high mobility capabilities allow them to inspect and analyze their environment more effectively than humans. In fact, 45% share of the UAV market belong to applications of infrastructure and construction inspection (Shakhatareh et al., 2019). As the awareness of resource-efficiency and sustainability increases, requirement for efficient methods in construction and infrastructure applications increases as well.

Structure inspections is conventionally based on visual analysis and inspection of plants and large structures are expensive and technically demanding. Special equipment such as scaffolding or access units are required for hard-to-reach structural components (Morgenthal & Hallermann, 2014). Thus, UAVs appeal for quality and safety inspections by their virtues such as remotely controlled or autonomous operation ability, ease of flight and great maneuverability. Inspections are performed with UAVs by mounting digital equipment which are able to acquire and transmit information, namely, thermal, color or infrared cameras, ultrasonic sensors or laser range finders (Máthé & Buşoniu, 2015). Sensor types can be classified as (Giacobbe & Biancuzzo, 2018):

- Proprioceptor: compass, gyroscope, altimeter, accelerometer, payload measurement, GPS module
- Interoceptive: CMOS camera, infrared camera, gamma sensors (sonar, radar, lidar)
- Exteroceptive: camera with gimbal, internal / external thermometer.

4.6.1. Quality assessment with UAVs

Inspection and analysis for quality assessment using UAV has been applied to many areas. Usual tasks related to construction such as project monitoring, quality control or defect detection are some of the examples of UAV utilization, however, a detailed list of examples according to their application area are given below (Jordan et al., 2018):

- Construction quality control assessment is applied using UAVs with integration of Building Information Modeling (Wang et al., 2015).
- Image processing methods are used for crack detection on structure surfaces to assess surface quality (Sankarasrinivasan et al., 2015).
- Vertical inspection is performed for high structures such as electricity poles, streetlights and cell towers to inspect the general condition of the structure (Sa & Corke, 2014).
- High voltage power transmission lines are inspected and:
 - the real temperature of joints on power lines are estimated (Luque-Vega et al., 2014),
 - multi UAV cooperation efficiency for inspections is proposed (Deng et al., 2014).
- Oil and gas pipelines are inspected to detect leakages (Gómez & Green, 2017)(Barchyn et al., 2017).

4.6.2. Safety assessment with UAVs

Safety inspections in the work environment generally includes monitoring employees and the working site by regular direct observations. Safety inspections on work sites generally has three main requirements (Gheisari et al., 2014):

1. Work site monitoring, identification of hazards and application of safe practices must be maintained by daily inspections.
2. Real-time data must be collected through personal examination by safety inspectors during routine activities and for observation and reporting in case of an accident.
3. Workplace safety practices must be encouraged by direct contact with the employees for immediate feedback.

These three requirements can easily be fulfilled by UAVs and in fact, applications are already present for some aspect such as real-time monitoring of a construction site (P. Liu et al., 2014) and inspection of employees on a work site to check if they are wearing hard hats (Gheisari et al., 2014).

4.6.3. Airport safety and aircraft inspections with UAVs

UAV-aided inspection applications emerge in the aviation among other examples as well. Since safety and maintenance are extremely vital in this domain, transferring some of the task to UAVs gives more safe, efficient and economical solutions (Sappington et al., 2019). Thus, proper utilization of UAVs in airports would be beneficial in numerous ways:

- Pictures of runways and pavement can be taken by performing hovering flights to detect cracks and obstacles.
- Take-off and landing operations can be coordinated to reduce human labor and increase safety.
- Periodic inspection and calibration of lightening systems requires photometric calibration equipment which requires different heights and adjustments. UAVs can easily hover at desired height and relieve the operator of time-consuming adjustments.
- Pre-flight and post-flight inspections of aircrafts which performed for every flight and requires visual inspection can be carried out in much less duration.
- Bird strikes create major problems for airports which may cause critical damages to aircrafts. UAVs can be used to scare and control the bird population around airports.

4.7. UAV Utilization During COVID-19 Global Pandemic

The COVID 19 global pandemic has forced people to stay distant with each other and be cautious when making a contact with other people or materials and surfaces. This situation provided an opportunity for robotic technologies to utilize them in various areas in order to decrease human contact as much as possible. A private company in India has provided UAVs to the local police forces to monitor areas for surveillance and handling unwarranted situations (Cyient, 2020). In many cities in China, UAVs equipped with speakers are deployed to observe and instruct crowds during the pandemic (Marr, 2020). In order to inform people about the state of emergency guidelines and social distancing rules, UAVs with speakers are used in Spain and other European countries as well (Gascueña, 2020)(Sharma, 2020)(Carassava, 2021). While UAVs are utilized for crowd surveillance, there are many applications of surveillance performed by sensors rather than security cameras such as infrared thermometers which can check individuals or groups of people simultaneously for body temperature (NDTV, 2020)(P. Singh, 2020)(UniSa, 2020)(Ratcliffe, 2021). Disinfecting public areas has become one of the common priorities during the pandemic and agricultural UAVs are adopted to spray disinfecting chemicals on these areas (Pan, 2020). Aside from these examples, the majority of the UAV applications are focused on collecting blood samples, transporting medicine, vaccines, food and other supplies before and during the global pandemic (Nui Galway, 2019)(Ackerman, 2020)(Dash, 2020)(Bateman, 2021). Their speed and agility provide quick solutions for delivering supplies between facilities or to rural areas where it would take too long to reach with conventional methods (Yang, 2020)(Adwibowo, 2021).

In the light of recent events, it can easily be observed that there will be various new utilization areas for UAVs. The developments in UAV manufacturing technologies will minimize their current weaknesses to malicious attacks and new regulations will provide a suitable environment to utilize their full potential while preventing unauthorized applications.

5. Conclusion

Aviation management is a highly complex process that requires an excessive amount of concentration to detail. A minor fault or an accident has the constant possibility of causing a disaster. Aviation operators always have to consider these matters and act on predicting or preventing such issues. Considerations about quality and safety of the operations and services are at the core of all processes throughout the organization. In this paper, the ideas of quality and safety in aviation and how they are applied to the organizations and their operations are explained. These quality and safety standards, established by international authorities, ensure the organization is eligible to provide safe operations and services which are able to fulfill customer needs. Reliability in aviation ensures the operations are safe and uninterrupted by shaping the maintenance and support mechanisms. Resilience on the other hand, attempts to minimize the probability of system failure by making the system robust and flexible. These concepts and their effects on quality and safety of operations are shown and explained with examples.

UASs have been implemented in various parts of many industries since the beginning of the Industry 4.0 revolution and will be in many different forms and many other industries and our daily lives. As seen in Table 1, the integration of UAVs in civil area of applications such as agriculture, construction, logistics and network technologies are emerging in an exponential fashion. Beside the commercial usefulness, UAVs provide safety and minimize risk factors by taking over dangerous tasks and perform these tasks faster than the conventional methods. Post-disaster, post-accident management or potentially risky inspection missions require intense focus and prompt action which UAVs can carry out with ease considering the human factor. Autonomous systems and robotics applications will continue to expand and the aviation industry will be a vital part of this course. There have been innovative challenges in avionics. However, there have been still major problems of UAVs such as reliability, safety and maintenance although their engines have become more robust. For UAVs, efficient maintenance and logistics management should be performed considering optimization regarding system availability at lowest possible Life-Cycle cost.

Although the utilization of UAVs in the aviation industry is not new and there are numerous applications, potential areas for UAVs and other technologies such as AR, machine learning, data science and mobile technologies will emerge. The industry should be in an adaptive and embracing position for these renovations and should prepare mental and infrastructural states of the organization and its entities. During extraordinary events such as COVID-19 pandemic, UAVs ensure the safety of the customers and personnel by taking over some of the workload and decreasing the human contact level to minimum. It is a recent example for all organizations to emphasize the importance and advantages of fast adaptation to utilization of UAVs in operations.

Additionally, the quality and safety regulations regarding the UAVs are still in progress. Implementation of new UAV regulations into the current international and national aviation domain will cause a necessity for the present regulations of civil aviation to be updated considering possible effects.

For further directions, there are challenges and the new directions to be considered for airport management and airlines management in a post COVID-19 era: Security and privacy are serious challenges for utilization of UAVs. Moreover, autonomous operation of UAVs is another challenge that should be taken into account because sensing of humans is required to avoid collisions. There should be a balance between supervisor interventions and autonomous operations of UAVs.

Future challenges should be toward effective integration of UAVs considering future passengers' transportation services in a post COVID-19 era.

References

- A4A. (2018a). *MSG-3: Operator/Manufacturer Scheduled Maintenance Development, Volume 1 - Fixed wing aircraft*. Airlines For America. <https://publications.airlines.org/CommerceProductDetail.aspx?Product=278>
- A4A. (2018b). *MSG-3: Operator/Manufacturer Scheduled Maintenance Development, Volume 2 - Rotorcraft*. Airlines For America. <https://publications.airlines.org/CommerceProductDetail.aspx?Product=279>
- Ackerman, E. (2020, April 3). *Zipline Wants to Bring Medical Drone Delivery to U.S. to Fight COVID-19*. <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/drones/zipline-medical-drone-delivery-covid19>
- Adwibowo, A. (2021). Assessments of heavy lift UAV quadcopter drone to support COVID 19 vaccine cold chain delivery for indigenous people in remote areas in South East Asia. *MedRxiv*, 2021.01.09.21249494. <https://doi.org/10.1101/2021.01.09.21249494>
- Al-Turjman, F. (Ed.). (2020). *Unmanned Aerial Vehicles in Smart Cities*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-38712-9>
- Amundarain, A., Borro, D., García-Alonso, A., Gil, J. J., Matey, L., & Savall, J. (2004). Virtual reality for aircraft engines maintainability. *Mécanique & Industries*, 5(2), 121–127. <https://doi.org/10.1051/meca:2004076>
- ARC. (2018). *Four SMS Trends To Watch For In 2018*. ARC Safety Management. https://arcsky.com/arc_blog/four-sms-trends-2018/
- Barchyn, T., Hugenholtz, C. H., Myshak, S., & Bauer, J. (2017). A UAV-based system for detecting natural gas leaks. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, juvs-2017-0018. <https://doi.org/10.1139/juvs-2017-0018>
- Barker, E. M. (1998). Aerospace Basic Quality System Standard SAE AS9000. *Quality Congress. ASQ's ... Annual Quality Congress Proceedings; Milwaukee*, 595.
- Bateman, T. (2021, June 4). *Drone delivery of vaccine doses speeds up COVID-19 vaccinations in remote areas of Ghana*. <https://www.euronews.com/next/2021/06/04/drone-delivery-of-vaccine-doses-speeds-up-covid-19-vaccinations-in-remote-areas-of-ghana>
- Beard, R. W., & McLain, T. W. (2012). *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton University Press.
- Bhatt, K., Pourmand, A., & Sikka, N. (2018). Targeted Applications of Unmanned Aerial Vehicles (Drones) in Telemedicine. *Telemedicine and E-Health*, 24(11), 833–838. <https://doi.org/10.1089/tmj.2017.0289>
- Blom, J. D. (2010). *Unmanned Aerial Systems: A Historical Perspective*. Combat Studies Institute Press.
- Bone, E., & Bolkcom, C. (2003). *Unmanned Aerial Vehicles: Background and Issues for Congress*. https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metacrs5693/m1/1/high_res_d/RL31872_2003Apr25.pdf
- Bowling, S. R., Khasawneh, M. T., Kaewkuekool, S., Jiang, X., & Gramopadhye, A. K. (2008). Evaluating the Effects of Virtual Training in an Aircraft Maintenance Task. *The International Journal of Aviation Psychology*, 18(1), 104–116. <https://doi.org/10.1080/10508410701749506>
- Cacciabue, P. C., Cassani, M., Licata, V., Oddone, I., & Ottomaniello, A. (2015). A practical approach to assess risk in aviation domains for safety management systems. *Cognition, Technology & Work*, 17(2), 249–267. <https://doi.org/10.1007/s10111-014-0294-y>
- Canisius, F., Wang, S., Croft, H., Leblanc, S. G., Russell, H. A. J., Chen, J., & Wang, R. (2019). A UAV-Based Sensor System for Measuring Land Surface Albedo: Tested over a Boreal Peatland Ecosystem. *Drones*, 3(1), 27. <https://doi.org/10.3390/drones3010027>
- Carassava, A. (2021, June 7). *Greece Deploys Drones to Stop Partygoers From Breaching COVID Rules*. <https://www.voanews.com/europe/greece-deploys-drones-stop-partygoers-breaching-covid-rules>
- Chamola, V., Hassija, V., Gupta, V., & Guizani, M. (2020). A Comprehensive Review of the COVID-19 Pandemic and the Role of IoT, Drones, AI, Blockchain, and 5G in Managing its Impact. *IEEE Access*, 8, 90225–90265. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2992341>

- Chialastri, A. (2011). Resilience and Ergonomics in aviation. In *Proceedings of the fourth Resilience Engineering Symposium* (pp. 65–71). Presses des Mines. <https://doi.org/10.4000/books.pressesmines.980>
- Chialastri, A., & Pozzi, S. (2008). Resilience in the Aviation System. In M. D. Harrison & M.-A. Suján (Eds.), *International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security* (pp. 86–98). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-87698-4_10
- Christiansen, M., Laursen, M., Jørgensen, R., Skovsen, S., & Gislum, R. (2017). Designing and Testing a UAV Mapping System for Agricultural Field Surveying. *Sensors*, 17(12), 2703. <https://doi.org/10.3390/s17122703>
- Chung, S.-H., Ma, H.-L., Hansen, M., & Choi, T.-M. (2020). Data science and analytics in aviation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 134, 101837. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101837>
- Crosby, P. B. (1979). *Quality is free: the art of making quality certain*. McGraw-Hill. <https://books.google.com.tr/books?id=0RxtAAAAMAAJ>
- Cyient. (2020, April 2). *Cyient Provides Drone-Based Surveillance Technology to Support Telangana State Police in Implementing COVID-19 Lockdown*. <https://www.cyient.com/prlisting/corporate/cyient-provides-drone-based-surveillance-technology-to-support-telangana-state-police-in-implementing-covid-19-lockdown>
- Dash, S. (2020, March 31). *This drone is delivering medicines, collecting blood samples and spraying sanitizers in Telangana*. <https://www.businessinsider.in/business/startups/news/coronavirus-innovation-this-drone-is-delivering-medicines-collecting-blood-samples-and-spraying-sanitizers-in-telangana/articleshow/74882886.cms>
- De Francesco, E., De Francesco, R., Leccese, F., & Cagnetti, M. (2014). Risk analysis in aviation: The forensic point of view. In *Proceedings of the 20th IMEKO TC4 Symposium on Measurements of Electrical Quantities, Research on Electrical and Electronic Measurement for the Economic Upturn, Together with 18th TC4 International Workshop on ADC and DCA Modeling and Testing*, 563–568.
- Deming, W. E. (1986). *Out of the crisis / W. Edwards Deming*. Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Engineering Study ; Cambridge University Press.
- Demir, K. A., Cicibas, H., & Arica, N. (2015). Unmanned Aerial Vehicle Domain: Areas of Research. *Defence Science Journal*, 65(4), 319. <https://doi.org/10.14429/dsj.65.8631>
- Deng, C., Wang, S., Huang, Z., Tan, Z., & Liu, J. (2014). Unmanned Aerial Vehicles for Power Line Inspection: A Cooperative Way in Platforms and Communications. *Journal of Communications*, 9(9), 687–692. <https://doi.org/10.12720/jcm.9.9.687-692>
- Du, Y.-C., Zhang, M.-X., Ling, H.-F., & Zheng, Y.-J. (2019). Evolutionary Planning of Multi-UAV Search for Missing Tourists. *IEEE Access*, 7, 73480–73492. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2920623>
- EASA. (2015a). A Proposal to Create Common Rules For operating Drones in Europe. *European Aviation Safety Agency*.
- EASA. (2015b). Concept of Operations for Drones: A Risk Based Approach to Regulation of unmanned Aircraft. *European Aviation Safety Agency*.
- EASA. (2015c). Riga Declaration on Remotely Piloted Aircraft (Drones). *European Aviation Safety Agency*.
- EASA - EU OPS 1.037. (2008). Regulations. *Official Journal of the European Union*, 238.
- EASA - NPA 2017-05 (A). (2017). Introduction of a regulatory framework for the operation of drones—Explanatory Note. *European Aviation Safety Agency*. https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/NPA_2017-05_%28A%29_0.pdf
- Electronic Code of Federal Regulations. (2016). *Title 14 Part 107*.
- Eltoukhy, A. E. E., Wang, Z. X., Chan, F. T. S., & Fu, X. (2019). Data analytics in managing aircraft routing and maintenance staffing with price competition by a Stackelberg-Nash game model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 122, 143–168. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.12.002>
- Eschen, H., Kötter, T., Rodeck, R., Harnisch, M., & Schüppstuhl, T. (2018). Augmented and Virtual Reality for Inspection and Maintenance Processes in the Aviation Industry. *Procedia Manufacturing*, 19, 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.01.022>
- FAA - AC 120-92B. (2006). Safety Management Systems for Aviation Service Providers. *Federal Aviation Administration*:

Advisory Circular 120-92. https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_120-92B.pdf

FAA - AC 43.13-1B. (1998). *Acceptable Methods, Techniques, and Practices - Aircraft Inspection and Repair*. federal Aviation Administration.

Faiçal, B. S., Freitas, H., Gomes, P. H., Mano, L. Y., Pessin, G., de Carvalho, A. C. P. L. F., Krishnamachari, B., & Ueyama, J. (2017). An adaptive approach for UAV-based pesticide spraying in dynamic environments. *Computers and Electronics in Agriculture*, 138, 210–223. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.04.011>

Feigenbaum, A. V. (1991). *Total Quality Control, Revised*. McGraw-Hill Companies. <https://books.google.com.tr/books?id=kkFoPgAACAAJ>

Fu, Z., Jiang, J., Gao, Y., Krienke, B., Wang, M., Zhong, K., Cao, Q., Tian, Y., Zhu, Y., Cao, W., & Liu, X. (2020). Wheat Growth Monitoring and Yield Estimation based on Multi-Rotor Unmanned Aerial Vehicle. *Remote Sensing*, 12(3), 508. <https://doi.org/10.3390/rs12030508>

Gascueña, D. (2020, April 16). *Drones to stop the COVID-19 epidemic*. <https://www.bbva.com/en/drones-to-stop-the-covid-19-epidemic/>

Ghazali, M. H. M., Teoh, K., & Rahiman, W. (2021). A Systematic Review of Real-Time Deployments of UAV-Based LoRa Communication Network. *IEEE Access*, 9, 124817–124830. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3110872>

Gheisari, M., Irizarry, J., & Walker, B. N. (2014). UAS4SAFETY: The Potential of Unmanned Aerial Systems for Construction Safety Applications. *Construction Research Congress 2014*, 1801–1810. <https://doi.org/10.1061/9780784413517.184>

Giacobbe, F., & Biancuzzo, E. (2018). Inspection of Components with the Support of the Drones. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5(12), 1784–1789.

Gómez, C., & Green, D. R. (2017). Small unmanned airborne systems to support oil and gas pipeline monitoring and mapping. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(9), 202. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2989-x>

Gopalakrishnan, K., Gholam, H., Vidyadharan, A., Choudhary, A., & Agrawal, A. (2018). Crack damage detection in unmanned aerial vehicle images of civil infrastructure using pre-trained deep learning model. *International Journal for Traffic And Transport Engineering*, 8(1), 1–14. [https://doi.org/10.7708/ijtte.2018.8\(1\).01](https://doi.org/10.7708/ijtte.2018.8(1).01)

Gössling, S. (2020). Risks, resilience, and pathways to sustainable aviation: A COVID-19 perspective. *Journal of Air Transport Management*, 89, 101933. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101933>

Gu, W., Hu, D., Cheng, L., Cao, Y., Rizzo, A., & Valavanis, K. P. (2020). Autonomous Wind Turbine Inspection using a Quadrotor. *2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 709–715. <https://doi.org/10.1109/ICUAS48674.2020.9214066>

Hao, L., Jinsong, Y., Ping, Z., & Xingshan, L. (2009). A review on fault prognostics in integrated health management. *2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, 4-267-4–270. <https://doi.org/10.1109/ICEMI.2009.5274082>

Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 91, 99–131. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>

Herrema, F., Curran, R., Hartjes, S., Ellejmi, M., Bancroft, S., & Schultz, M. (2019). A machine learning model to predict runway exit at Vienna airport. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 131, 329–342. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.10.002>

Hinsch, M. (2018). *Industrial Aviation Management: A Primer in European Design, Production and Maintenance Organisations*. Springer Berlin Heidelberg. <https://books.google.com.tr/books?id=oVptDwAAQBAJ>

Hobbs, A., & Herwitz, S. R. (2008). *Maintenance Challenges of Small Unmanned Aircraft Systems - A Human Factors Perspective*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1858.8647>

Hollnagel, E. (2018). *Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management*. CRC Press.

Huuskonen, J., & Oksanen, T. (2018). Soil sampling with drones and augmented reality in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 154, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.039>

IAQG. (2019). *Published Standards*. <https://iaqg.org/standards/>

- ICAO. (2019). *State of Global Aviation Safety*. International Civil Aviation Organization. https://www.icao.int/safety/Documents/ICAO_SR_2019_final_web.pdf
- ICAO. (2021). *First two weeks ADS-B data indicates improvement in overall international and domestic traffic*. https://www.icao.int/sustainability/Documents/COVID-19/ICAO_COVID_2021_03_17_Economic_Impact_TH_Toru.pdf
- ICAO - Annexes 1 to 18. (2012). *The Convention on International Civil Aviation*.
- ICAO - Circular 328-AN/190. (2011). Unmanned Aircraft Systems (UAS). *International Civil Aviation Organization*.
- ICAO - Doc 10019. (2015). Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS). *International Civil Aviation Organization*.
- ICAO - Doc 10144. (2020). *Handbook for CAAs on the Management of Aviation Safety Risks related to COVID-19*. https://www.icao.int/safety/SafetyManagement/Doc10144/Doc_10144.pdf
- ICAO - Doc 9774. (2001). Manual on Certification of Aerodomes. *International Civil Aviation Organization*.
- ICAO - Doc 9906. (2009). Quality Assurance Manual for Flight Procedure Design. *International Civil Aviation Organization, Volume 1*. https://www.icao.int/Meetings/PBN-Symposium/Documents/9906_v1_cons_en.pdf
- Ishikawa, K. (1985). *What is total quality control? The Japanese way*. Prentice-Hall. <https://books.google.com.tr/books?id=59hTAAAAMAAJ>
- ISO 9001:2015. (2015). Quality Management Principles. *International Organization for Standardization*. <https://www.iso.org/publication/PUB100080.html>
- Jalil, B., Leone, G. R., Martinelli, M., Moroni, D., Pascali, M. A., & Berton, A. (2019). Fault Detection in Power Equipment via an Unmanned Aerial System Using Multi Modal Data. *Sensors*, 19(13), 3014. <https://doi.org/10.3390/s19133014>
- JAPCC - UAS CONEMP. (2010). Strategic concept of employment for unmanned aircraft systems in NATO. *Joint Air Power Competence Centre UAS Conemp Report*. http://www.japcc.org/wp-content/uploads/UAS_CONEMP.pdf
- Jin, T. (2019). *Reliability Engineering and Services*. Wiley, 1st Edition. <https://books.google.com.tr/books?id=Nlh-DwAAQBAJ>
- Jordan, S., Moore, J., Hovet, S., Box, J., Perry, J., Kirsche, K., Lewis, D., & Tse, Z. T. H. (2018). State-of-the-art technologies for UAV inspections. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 12(2), 151–164. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0251>
- Juran, J. M., & Gryna, F. M. (1993). *Quality Planning and Analysis: From Product Development Through Use*. McGraw-Hill. <https://books.google.com.tr/books?id=w95TAAAAMAAJ>
- Kas, K. A., & Johnson, G. K. (2020). Using unmanned aerial vehicles and robotics in hazardous locations safely. *Process Safety Progress*, 39(1). <https://doi.org/10.1002/prs.12066>
- Kavoosi, Z., Raoufat, M. H., Dehghani, M., Abdolabbas, J., Kazemeini, S. A., & Nazemossadat, M. J. (2020). Feasibility of satellite and drone images for monitoring soil residue cover. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 19(1), 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2018.06.001>
- Kerkech, M., Hafiane, A., & Canals, R. (2020). Vine disease detection in UAV multispectral images using optimized image registration and deep learning segmentation approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 174, 105446. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105446>
- Khan, N. A., Jhanjhi, N. Z., Brohi, S. N., Usmani, R. S. A., & Nayyar, A. (2020). Smart traffic monitoring system using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Computer Communications*, 157, 434–443. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.04.049>
- Khan, S. K., Naseem, U., Siraj, H., Razzak, I., & Imran, M. (2021). The role of unmanned aerial vehicles and mmWave in 5G: Recent advances and challenges. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 32(7). <https://doi.org/10.1002/ett.4241>
- Kim, C.-Y., & Song, B.-H. (2016). An Empirical Study on Safety Culture in Aviation Maintenance Organization. *International Journal of U- and e- Service, Science and Technology*, 9(6), 333–344. <https://doi.org/10.14257/ijunesst.2016.9.6.30>
- Kinnison, H. A., & Siddiqui, T. (2012). *Aviation Maintenance Management, Second Edition*. McGraw-Hill Education. <https://books.google.com.tr/books?id=dsmNupJXILYC>

- Kongoli, F. (2012). Automation in aviation. In *Automation* (pp. 79–102). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/49949>
- Levin, M., & Kalal, T. (2005). Reliability Concepts. In *Improving Product Reliability: Strategies and Implementation* (pp. 47–63). <https://doi.org/10.1002/0470014024.ch6>
- Ley, S. C. (2016). *UAS Maintenance, modification, repair, inspection, training, and certification considerations: A review of existing UAS maintenance data*. Alliance for System Safety of UAS Through Research Excellence (ASSURE). [http://www.assureuas.org/projects/deliverables/a5/Deliverable 1 - Task 1 Review of UAS Maint Data.pdf](http://www.assureuas.org/projects/deliverables/a5/Deliverable%201%20Task%201%20Review%20of%20UAS%20Maint%20Data.pdf)
- Liew, C. F., DeLatte, D., Takeishi, N., & Yairi, T. (2017). Recent Developments in Aerial Robotics: A Survey and Prototypes Overview. *Arvix*. <http://arxiv.org/abs/1711.10085>
- Liu, P., Chen, A. Y., Huang, Y.-N., Han, J.-Y., Lai, J.-S., Kang, S.-C., Wu, T.-H., Wen, M.-C., & Tsai, M.-H. (2014). A review of rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering. *Smart Structures and Systems*, 13(6), 1065–1094. <https://doi.org/10.12989/sss.2014.13.6.1065>
- Liu, Yanchao. (2019). An optimization-driven dynamic vehicle routing algorithm for on-demand meal delivery using drones. *Computers & Operations Research*, 111, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.05.024>
- Liu, Yulin, Liu, Y., Hansen, M., Pozdnukhov, A., & Zhang, D. (2019). Using machine learning to analyze air traffic management actions: Ground delay program case study. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 131, 80–95. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.09.012>
- Liu, Z., Xie, C., Yan, M., Bu, S., & Zhang, C. (2014). Maintenance Path Planning for Aircraft Virtual Maintenance. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 296, 587–597. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54236-7_64
- Luque-Vega, L. F., Castillo-Toledo, B., Loukianov, A., & Gonzalez-Jimenez, L. E. (2014). Power line inspection via an unmanned aerial system based on the quadrotor helicopter. *MELECON 2014 - 2014 17th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, 393–397. <https://doi.org/10.1109/MELCON.2014.6820566>
- Marchese, M., Moheddine, A., & Patrone, F. (2019). IoT and UAV Integration in 5G Hybrid Terrestrial-Satellite Networks. *Sensors*, 19(17), 3704. <https://doi.org/10.3390/s19173704>
- Marr, B. (2020, March 18). *Robots And Drones Are Now Used To Fight COVID-19*. <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2020/03/18/how-robots-and-drones-are-helping-to-fight-coronavirus/#2a8bfbc2a12>
- Máthé, K., & Buşoniu, L. (2015). Vision and Control for UAVs: A Survey of General Methods and of Inexpensive Platforms for Infrastructure Inspection. *Sensors*, 15(7), 14887–14916. <https://doi.org/10.3390/s150714887>
- McDonald, N., Corrigan, S., Ulfvengren, P., & Baranzini, D. (2014). Proactive Safety Performance for Aviation Operations. In D. Harris (Ed.), *International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics* (pp. 351–362). Springer International Publishing.
- Mliki, H., Bouhlel, F., & Hammami, M. (2020). Human activity recognition from UAV-captured video sequences. *Pattern Recognition*, 100, 107140. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2019.107140>
- Morgenthal, G., & Hallermann, N. (2014). Quality Assessment of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Based Visual Inspection of Structures. *Advances in Structural Engineering*, 17(3), 289–302. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.17.3.289>
- Mrusek, B. M., Kiernan, K. W., & Clark, P. J. (2018). UAS Maintenance: A Critical Component in Maintaining Airworthiness. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 5(5).
- NDTV. (2020, April 11). *Delhi Civic Body Begins Thermal Screening People On Balconies With Drones*. <https://www.ndtv.com/delhi-news/coronavirus-delhi-civic-body-using-drones-to-check-temperature-of-people-on-balconies-2209832>
- Nordin, M. H., Sharma, S., Khan, A., Gianni, M., Rajendran, S., & Sutton, R. (2022). Collaborative Unmanned Vehicles for Inspection, Maintenance, and Repairs of Offshore Wind Turbines. *Drones*, 6(6), 137. <https://doi.org/10.3390/drones6060137>
- Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). Reliability-Centered Maintenance. In *United Airline Publications*. Dolby Access Press.
- Nui Galway. (2019, September 16). *NUI Galway makes Aviation History by Completing the World's First Diabetes Drone Mission from Mainland to Aran Islands*. <https://www.nuigalway.ie/about-us/news-and-events/news-archive/2019/september/nui-galway-makes-aviation-history-by-completing-the-worlds-first-diabetes-drone-mission-from-mainland-to-aran-islands.html>

- Otto, A., Agatz, N., Campbell, J., Golden, B., & Pesch, E. (2018). Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: A survey. *Networks*, 72(4), 411–458. <https://doi.org/10.1002/net.21818>
- Outay, F., Mengash, H. A., & Adnan, M. (2020). Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 141, 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.09.018>
- Özoğlu, B., Çakmak, E., & Koç, T. (2019). Clarke & Wright's Savings Algorithm and Genetic Algorithms Based Hybrid Approach for Flying Sidekick Traveling Salesman Problem. *European Journal of Science and Technology*, 185–192. <https://doi.org/10.31590/ejosat.637816>
- Palmarini, R., Erkoyuncu, J. A., Roy, R., & Torabmostaedi, H. (2018). A systematic review of augmented reality applications in maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, 215–228. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.06.002>
- Pan, C. (2020, April 1). *Spain's military uses DJI agricultural drones to spray disinfectant in fight against Covid-19*. <https://www.scmp.com/tech/gear/article/3077945/spains-military-uses-dji-agricultural-drones-spray-disinfectant-fight>
- Petritoli, E., Leccese, F., & Ciani, L. (2018). Reliability and Maintenance Analysis of Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors*, 18(9), 3171. <https://doi.org/10.3390/s18093171>
- Plioutsias, A., Karanikas, N., & Chatzimihailidou, M. M. (2018). Hazard Analysis and Safety Requirements for Small Drone Operations: To What Extent Do Popular Drones Embed Safety? *Risk Analysis*, 38(3), 562–584. <https://doi.org/10.1111/risa.12867>
- Rana, K., Praharaj, S., & Nanda, T. (2016). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): An Emerging Technology for Logistics. *International Journal of Business and Management Invention*, 5(5), 86–92.
- Ratcliffe, R. (2021, June 7). *Police in Malaysia use drones to detect high temperatures amid Covid surge*. <https://www.theguardian.com/world/2021/jun/07/police-in-malaysia-use-drones-to-detect-high-temperatures-amid-covid-surge>
- Romero, M., Luo, Y., Su, B., & Fuentes, S. (2018). Vineyard water status estimation using multispectral imagery from an UAV platform and machine learning algorithms for irrigation scheduling management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.013>
- Sa, I., & Corke, P. (2014). Vertical Infrastructure Inspection Using a Quadcopter and Shared Autonomy Control. In *Field and Service Robotics* (pp. 219–232). https://doi.org/10.1007/978-3-642-40686-7_15
- SAMA. (2022). *Regulations on Unmanned Aerial Vehicles (SYH-IHAS)*. The State Airport Administration of Turkey. <https://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/mevzuat/sektorel/taaslaklar/2022/SHY-IHAS.pdf>
- Sankarasrinivasan, S., Balasubramanian, E., Karthik, K., Chandrasekar, U., & Gupta, R. (2015). Health Monitoring of Civil Structures with Integrated UAV and Image Processing System. *Procedia Computer Science*, 54, 508–515. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.06.058>
- Sappington, R. N., Acosta, G. A., Hassanalian, M., Lee, K., & Morelli, R. (2019, June 17). Drone Stations in Airports for Runway and Airplane Inspection Using Image Processing Techniques. *AIAA Aviation 2019 Forum*. <https://doi.org/10.2514/6.2019-3316>
- Schmidt, M. (2017). A review of aircraft turnaround operations and simulations. *Progress in Aerospace Sciences*, 92, 25–38. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.05.002>
- Schweizer, E. A., Stow, D. A., & Coulter, L. L. (2018). Automating Near Real-Time, Post-Hazard Detection of Crack Damage to Critical Infrastructure. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 84(2), 75–86. <https://doi.org/10.14358/PERS.84.2.75>
- Segal, A., & Bot, Y. (2018). Maintenance of a Drone Fleet. *2018 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/RAM.2018.8463142>
- Shakhatareh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., Othman, N. S., Khreishah, A., & Guizani, M. (2019). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. *IEEE Access*, 7, 48572–48634. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>
- Sharma, M. (2020, April 20). *How drones are being used to combat COVID-19*. <https://www.geospatialworld.net/blogs/how-drones-are-being-used-to-combat-covid-19/>

- Singh, N., Muthukrishnan, P., & Sanpini, S. (2019). *Industrial System Engineering for Drones: A Guide with Best Practices for Designing*. Apress, Berkeley, CA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3534-8>
- Singh, P. (2020, April 11). *Thermal scan: Drones check people for fever in Delhi*. <https://timesofindia.indiatimes.com/city/delhi/thermal-scan-drones-check-people-for-fever/articleshow/75088774.cms>
- Soydan, O., Göv, K., & Eyercioğlu, Ö. (2020). Surface Finishing of Aerospace Materials. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 7(2), 700–709. <https://doi.org/10.31202/ecjse.691548>
- Stöcker, C., Bennett, R., Nex, F., Gerke, M., & Zevenbergen, J. (2017). Review of the Current State of UAV Regulations. *Remote Sensing*, 9(5), 459. <https://doi.org/10.3390/rs9050459>
- Stolzer, A. J., & Goglia, J. J. (2016). *Safety Management Systems in Aviation*. CRC Press. <https://books.google.com.tr/books?id=Qk6rCwAAQBAJ>
- Stroppiana, D., Villa, P., Sona, G., Ronchetti, G., Candiani, G., Pepe, M., Busetto, L., Migliazzi, M., & Boschetti, M. (2018). Early season weed mapping in rice crops using multi-spectral UAV data. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15–16), 5432–5452. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1441569>
- Subagyo, T. H. (2002). *Quality management practices in the South East Asian airlines' operations function*. PhD Thesis, Cranfield University, College of Aeronautics.
- Sumanth Reddy, T. B., Harsha Teja, P., Pavan Teja, R., & Praneeth, T. (2019). Adaptive Autonomous Technology in Unmanned Aerial Vehicles for Parcel Delivery. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 07–12. <https://doi.org/10.32628/CSEIT1951138>
- Tan, Y., Li, S., Liu, H., Chen, P., & Zhou, Z. (2021). Automatic inspection data collection of building surface based on BIM and UAV. *Automation in Construction*, 131, 103881. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103881>
- Tazibt, C. Y., Achir, N., & Djamah, T. (2022). Online drone-based data gathering strategies for ground sensor networks. *International Journal of Sensor Networks*, 38(3), 177. <https://doi.org/10.1504/IJSNET.2022.121702>
- UniSa. (2020, March 26). *UniSA working on 'pandemic drone' to detect coronavirus*. <https://www.unisa.edu.au/Media-Centre/Releases/2020/unisa-working-on-pandemic-drone-to-detect-coronavirus/>
- Vander Weide, S. A., & Secretan, J. (2009). The Potential for Improving Maintainer, Equipment and Flight Safety through Virtual Maintenance Training. *SAE Technical Paper 2009-01-3225*. <https://doi.org/10.4271/2009-01-3225>
- Vieira, D. R., Rebaiaia, M.-L., & Chain, M. C. (2016). The Application of Reliability Methods for Aircraft Design Project Management. *American Journal of Industrial and Business Management*, 6, 967–992. <https://doi.org/10.4236/ajibm.2016.69094>
- Vrba, M., Stasinchuk, Y., Báča, T., Spurný, V., Petrlik, M., Heřt, D., Žaitlík, D., & Saska, M. (2022). Autonomous capture of agile flying objects using UAVs: The MBZIRC 2020 challenge. *Robotics and Autonomous Systems*, 149, 103970. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103970>
- Wang, J., Sun, W., Shou, W., Wang, X., Wu, C., Chong, H.-Y., Liu, Y., & Sun, C. (2015). Integrating BIM and LiDAR for Real-Time Construction Quality Control. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 79(3), 417–432. <https://doi.org/10.1007/s10846-014-0116-8>
- Wu, Q., Xu, J., Zeng, Y., Ng, D. W. K., Al-Dhahir, N., Schober, R., & Swindlehurst, A. L. (2021). A Comprehensive Overview on 5G-and-Beyond Networks With UAVs: From Communications to Sensing and Intelligence. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(10), 2912–2945. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2021.3088681>
- Xu, S., Chan, H. K., & Zhang, T. (2019). Forecasting the demand of the aviation industry using hybrid time series SARIMA-SVR approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 122, 169–180. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.12.005>
- Yakıştıran, Ö., & Yaz, M. (2020). Fuzzy Logic Positioning of a Vehicle in the Movement Direction. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 7(1), 1–8. <https://doi.org/10.31202/ecjse.581440>
- Yang, J. (2020, March 16). *3 ways China is using drones to fight coronavirus*. <https://www.weforum.org/agenda/2020/03/three-ways-china-is-using-drones-to-fight-coronavirus/>
- Zhou, D., Shi, J. M., Geng, J., & Lv, C. (2010). Virtual Maintenance Concepts and Methods. *Applied Mechanics and Materials*, 26–28, 714–719. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.26-28.714>

Zio, E., Fan, M., Zeng, Z., & Kang, R. (2019). Application of reliability technologies in civil aviation: Lessons learnt and perspectives. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(1), 143–158. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.05.014>



Betonarme Çerçeve Binaların Tasarımında Kullanılan Sonlu Eleman Programlarının TBDY-2019'da Yer Alan Periyot, Taban Kesme Kuvveti ve Görelî Kat Ötelemesi Bağlamında Değerlendirilmesi

Evaluation of Finite Element Programs Used in the Design of Reinforced Concrete Frame Buildings in the Context of Period, Base Shear Force and Relative story drift in TBEC-2019

Yusuf Uysal¹, Ceyhan Aksoylu^{*1}, Musa Hakan Arslan¹

¹Konya Teknik Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği, 42250 Selçuklu, Konya, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 13/03/2022

Kabul / Accepted: 03/06/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Gelişen yazılım teknolojisi ile birlikte tasarımcı, seçilen deprem yönetmeliğine göre yapının analizini paket programlar yardımıyla kolaylıkla yapabilmektedir. Deprem yükünün tespitinde en önemli aşama yapının doğal titreşim periyodunun belirlenmesidir. Yönetmelikler tasarımcının, basit periyot bağıntıları (amprik) ve fiktif kuvvetler altındaki deplasmanlara bağlı literatürde kabul görmüş yöntemlere göre hesap yapmasını istemektedir. Bu çalışmada SAP2000 ve ETABS analiz programları kullanılarak yapının doğal titreşim periyodu tespit edilmiş ve elde edilen periyot değerleri TBDY-2019'da verilen yaklaşımlardan elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Çalışmada İstanbul/Avçılar'da yapılacak olan 2-9 katlı çerçeve tipi betonarme binaların, ZA ve ZC zemin sınıfları için ETABS ve SAP2000 analizinden elde edilen periyot, taban kesme kuvveti ve görelî kat ötelemeleri karşılaştırılmıştır. Analiz programlarının periyot seçerken yaptığı hesap kabullerinden dolayı 4-9 katlı binalarda ETABS'da bulunan periyot SAP2000'de bulunan periyottan %9,5-40 kadar daha az sonuç vermiştir. Dolayısıyla yapıya gelen taban kesme kuvveti de aynı oranda değişmiştir. Ayrıca yalnızca SAP2000'de iki zemin sınıfı için yapılan analizler sonunda ZC zemin sınıfında elde edilen taban kesme kuvveti ZA zemin sınıfına göre %50-80 daha fazla olduğu görülmüştür. Görelî kat ötelemeleri ise ZA zemin sınıfı yerine ZC zemin sınıfı seçilmesi durumunda %49,2-92 kadar daha fazla elde edilmiştir. Sonuç olarak tasarımcılara yol gösterici olması amacıyla analiz programlarında yapılan hesap kabulleri açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Betonarme bina, ETABS, SAP2000, Periyod, Taban kesme kuvveti, TBDY-2019”

Abstract

With the developing software technology, the designer can quickly analyze the structure according to the chosen earthquake code with the help of package programs. The most critical step in determining the earthquake load is to determine the natural vibration period of the structure. Regulations require the designer to calculate according to methods accepted in the literature based on simple period relations (empirical) and displacements under fictitious forces. In this study, the natural vibration period of the structure was determined using the SAP2000 and ETABS analysis programs and the obtained period values were compared with the values obtained from the approaches given in TBDY-2019. In the study, the period, base shear force and relative story drifts obtained from the ETABS and SAP2000 analysis for the ZA and ZC soil classes of the 2-9 story frame type RC buildings to be built in İstanbul/Avçılar were compared. Due to the calculation assumptions made by the analysis programs when choosing the period, the period found in ETABS in 4-9-story buildings yielded 9.5-40% fewer results than the period found in SAP2000. Therefore, the base shear force on the structure also changed at the same rate. In addition, at the end of the analyzes made for only two soil classes in SAP2000, it was seen that the base shear force obtained in the ZC soil class was 50-80% higher than in the ZA soil class. Relative story drifts were obtained as 49.2-92% higher when ZC soil class was chosen instead of the ZA soil class. As a result, the analysis programs' calculations are explained to guide the designers.

Key Words

“RC building, ETABS, SAP2000, Period, Base shear force, TBEC-2019”

1. Giriş

Türkiye’de 21.yy’a kadar hemen hemen her dönemde meydana gelen yıkıcı depremlerden dolayı can ve mal kayıpları yaşanmıştır (Arslan & Korkmaz, 2007; Öztürk, 2018; Aksoylu vd., 2020, Işık, 2022; Avcil vd., 2022; Shendkar vd., 2022; Kaltakçı vd.,2008). Depremın yıkıcı etkisinin kontrol altına alınması için depreme dayanıklı yapı tasarımı felsefesi ortaya çıkmış ve bu alanda araştırmalar yapılarak sürekli iyileştirici adımlar devam etmektedir (Bilgin vd., 2022; Aksoylu ve Kara, 2020; Aksoylu ve Sezer 2018; Aksoylu, 2021; Aksoylu vd. 2021;Aksoylu vd., 2020; Özkılıç vd., 2021; Arslan vd., 2022). Türkiye’de yapıların depremden daha az etkilenmesi için ilk yönetmelik, 26 Aralık 1939 yılında yaklaşık 30.000 insanın ölmesine neden olan Erzincan depreminin ardından 1940 yılında yürürlüğe girmiştir (Özkat & Kuruşçu, 2019). Zamanla özellikle yazılım teknolojisindeki gelişmeler ve yapılan araştırmalar ile yönetmeliklerde değişiklikler yapılmıştır. İlk yayımlanan yönetmeliklerin deprem davranışını belirleme hususunda yeterli başarı elde edemediği ve yayımlanan her yeni yönetmeliğin deprem tecrübesi sonrası ortaya çıktığı bilinmektedir. Özellikle 1999 Marmara depremi sonrası yapılan radikal değişiklikler yapıların depreme karşı daha iyi davranış sergilemesini sağlamıştır. Bu durum sünek tasarım felsefesinin benimsenmesi ile ön plana çıkmaktadır. 1998, 2007 yönetmelikleri ile oldukça iyi duruma gelen yapı davranışı, son olarak 1 Ocak 2019 yılında yürürlüğe giren yeni Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2019) ile üst seviyelere çıkarılmıştır. TBDY-2019 ile deprem davranışının anlaşılması ve açıklanması yönünden çok sayıda parametre ASCE 7-16 (ASCE 7-16, 2017) yönetmeliğine benzer şekilde dikkate alınmış ve oldukça büyük ilerlemeler katedilmiştir (Aksoylu & Arslan, 2021).

TBDY-2019 yönetmeliği, yapıların deprem davranışını belirlemek amacıyla doğrusal ve doğrusal olmayan hesap yöntemleri sunmaktadır (Cansız, 2022). Doğrusal hesap yöntemleri eşdeğer deprem yükü yöntemi (EDYY), mod birleştirme yöntemi (MBY) ve mod toplama yöntemi (MTY) şeklindedir. Statik itme yöntemleri ve zaman tanım alanında hesap yöntemleri ise doğrusal olmayan hesap yöntemleri olarak bilinmektedir. TBDY-2019’da yer alan deprem hesap yöntemlerinden en basit olanı EDYY’dır (Özmen & Sayın, 2021). Çünkü EDYY, karmaşık deprem hesaplarını basitleştirmek amacıyla en büyük kütle katılımına sahip olan 1.mod salınım periyodunu dikkate alarak doğrusal hesaplar yapmaktadır. Burada modelleme ve analiz sonrası elde edilen taban kesme kuvveti her kata statik bir yük olarak aktarılmakta ve bu sayede iç kuvvetler hesaplanarak tasarım gerçekleştirilmektedir. Ancak bu yöntem belli şartlar altında uygulanabilmektedir. Yani kat sayısı az ve yapı düzensizlikleri buldurmuyan binalar için daha çok uygulanabilir. Bu tip binalarda hakim olan 1. mod periyot değeri yapının öteleme yaptığı moddaki periyodudur (Börekçi, 2019). Yapılan bu hesaplarda binaların hakim doğal titreşim periyotlarının doğru bir şekilde belirlenmesi oldukça önemlidir. Çünkü depreme esas kütle belirlenmesi oldukça karmaşık bir problemdir. Bunun için hakim doğal titreşim periyodu belirlenirken rayleigh periyot formülü yaygın olarak kullanılmaktadır. Burada yapının kütlesi ve rijitliği dikkate alınarak periyot hesaplanmaktadır. Bunun dışında yönetmeliklerce önerilen basitleştirilmiş ampirik formüller belli şartlar altında kullanılmaktadır. Binaların modellenmesi ve analizinde uygulamada yaygın olarak kullanılan ticari paket programlar, kendi bünyelerinde ilgili yönetmelik şartlarını dikkate alarak analizler yapmaktadır. Bu programlar genellikle iki farklı periyot hesabını karşılaştırarak ve yönetmeliklerde belirtilen sınır şartları da dikkate alarak yapının depreme esas hakim doğal titreşim periyodunu belirlemektedir. Diğer bir ifade ile bu periyot yaklaşımları, kat yüksekliği ve bina türü parametrelerini içeren ampirik periyot ile yapının rijitliği ve kütlelerine bağlı olarak değişen rayleigh periyodunun karşılaştırılması şeklindedir (Aksoylu & Arslan, 2019a). Analiz programları iki periyot arasında karşılaştırma yaparak deprem hesaplarında dikkate alacağı hakim doğal titreşim periyodunu seçmektedir. Ayrıca tasarımcıların periyot seçimini yapabilmesine kendi bünyesinde yer alan seçenekler sayesinde belli sınırlara kadar izin vermektedir. Bu programların arka planda hesaplamaları yapması verdiği sonuçlarda belirsizlik oluşturabilmektedir. Bu yüzden paket programlar veya sonlu eleman ile analizler yapıldıktan sonra verilerin elle hesap yapılarak kontrol edilmesi oldukça önemlidir.

Literatürde yüksekliği az ve düzensizlik buldurmuyan binalar için araştırmacılar tarafından çok sayıda çalışmalar yapılmış ve bu binalar için yaklaşık periyot formülleri önerilmiştir (Aninthaneni & Dhakal, 2016; Çolak vd., 2019; Hsiao, 2009; Mirrashid & Naderpour, 2022; Salama, 2015; Sangamnerkar & Dubey, 2017). Ayrıca geçmişten günümüze kadar yayımlanan yönetmeliklerin (ABYYHY, 1998; Indian-Code, 2002; EC8, 2004; TDY, 2007; TCVN 9386, 2012; KBC, 2016; ASCE 7-16, 2017; İtalian NTC, 2018; TBDY, 2019) genelinde de periyot hesaplarının aynı teorik düşünceye dayandığı ve bu teorik düşünceler ışığında periyot hesaplamalarını daha basit bir şekilde ifade edebilmek için yaklaşık formüllere yer verildiği görülmektedir. Yönetmeliklerin karmaşık olan deprem hesaplarını daha basit hale getirmek için önerdikleri ampirik formüller, uygulama için kolaylıklar sağlasa da formül içerisinde sadece kat yüksekliği ve bina türü parametrelerinin yer alması daha fazla parametre içermesi gerekliliğini düşündürmektedir. Diğer taraftan analitik çalışmalar incelendiğinde genel anlamda yönetmelikte yer alan bilgilerin mevcut ticari programlar yardımıyla analizler yapılarak sorgulandığı görülmektedir. Bu çalışmalarda gerek TDY-2007 kapsamında gerekse TBDY-2019 kapsamında binaların davranışı incelenmekte ve çoğu çalışmada elde edilen sonuçlar için iki yönetmelik arasında karşılaştırmalar yapılmaktadır. Aksoylu ve Arslan (2019)’nın çalışmasında, ampirik periyot ile rayleigh periyodu analitik olarak karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada ETABS analiz programı kullanılarak 2-5 katlı konut ve okul binası perde+çerçevesel yapı olarak modellenmiş ve farklı zemin sınıflarına göre incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre iki periyot yaklaşımı arasında yapının taban kesme kuvvetinde önemli değişiklikler gözlenmiştir. Sonuç olarak TBDY-2019’da bina yükseklik sınıfına (BYS6, BYS7 ve BYS8) göre önerilen ampirik formüller yeniden değerlendirilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Bir diğer çalışmada ise Börekçi (2019), 6 katlı bir binanın hem SAP2000 analiz programında analizini hem de bazı araştırmacıların önerdiği ampirik periyodun elle hesabını yaparak hakim doğal titreşim periyodunu belirlemiş ve önerilen formüller ile SAP2000’de elde edilen periyot verilerinin yaklaşıklığını belirleyerek TBDY-2019’da verilen ampirik formül hesabı ile karşılaştırmıştır. Yaptığı karşılaştırmalara göre TBDY-2019’da verilen ampirik formülüne Goel ve Chopra (T_U) bağıntısı %97,4 ile en yakın sonuç verirken Koçak ve Yıldırım bağıntısı ise %31,7 ile en uzak sonuç verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca TBDY-2019 yönetmeliği esas alınarak duvarsız ve duvarlı modeller üzerinde analizler yaparak duvar etkisinin ne kadar dikkate alındığı araştırılmıştır. Bu verilere göre duvarsız modelden elde edilen periyot, duvarlı modelden elde edilen periyottan % 73,3 kadar daha fazla sonuç vermiştir. Özmen ve Sayın (2021)’nin

çalışmalarında, 5 katlı bir betonarme yapıyı EDYY kullanarak SAP2000 programında analiz etmiş ve TDY-2007 ve TBDY-2019'a göre binaya ait periyot ve taban kesme kuvvetleri incelenmiştir. Yapılan analizlerde farklı zemin sınıfları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre TBDY-2019 yönetmeliğinin daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Aninthaneni ve Dhakal (2016)'ın çalışmalarında, düzensizlik bulundurmeyen çerçeve tipi binaların periyodunu belirlemek için bina ağırlığı, kat yüksekliği, kat sayısı, aks açıklığı sayısı ve rijitlik parametrelerini içeren yaklaşık bir formül geliştirmişlerdir. Önerdikleri periyot formülünün güvenilirliğini ve çok yönlülüğünü doğrulamak için SAP2000 analiz programında 3-10 katlı binalardan elde edilen rayleigh periyotları ile kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar geliştirmiş oldukları yaklaşık periyodun rayleigh periyoduna göre tüm modellerde güvenilir tarafta kaldığını göstermiştir. Çalışmanın sonunda araştırmacılar, yapılacak periyot hesaplarında geliştirdikleri yaklaşık periyodun kullanımını önermektedirler. Chopra ve Goel (2000), yaptıkları çalışmada 1971 San Fernando depremi ile başlayan ve 1994 Northridge depremi ile biten toplamda sekiz California depremi sırasında kaydedilen verileri kullanarak ABD deprem yönetmeliklerinde yer alan periyot formüllerini sorgulamıştır. Yönetmelikteki formüllerden elde edilen periyot değerleri ölçülen periyot değerlerinden %50'ye ulaşan bir oranla daha düşük çıktığından dolayı bu formüllerin geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Hatzigeorgiou ve Kanapitsas (2013)'ün çalışmalarında, Yunanistan'da inşaa edilmiş 20 farklı konfigürasyona sahip gerçek binalar için üç boyutlu sonlu eleman analizi yapmışlardır. Modellerde dolgu duvarların rijitliğe katkısı ihmal edilmiştir. Her bir bina için periyot değerleri karşılaştırılarak periyot hesabı için bina yüksekliği, deprem doğrultusundaki bina plan uzunluğu, perde duvar miktarı, yapı ağırlığı ve zemin cinsi parametrelerini içeren yaklaşık bir formül önermişlerdir. Çalışmanın sonunda bina yüksekliği en fazla 30m olan az katlı ve orta katlı binalar için yaklaşık formül önerisi üç boyutlu analiz ile doğrulanmıştır. Leissa (2005)'nin yaptığı analitik çalışmada, Rayleigh ve Ritz yöntemlerini detaylı inceleyerek bu iki yöntem arasında bir karşılaştırma yapmıştır. Yaptığı detaylı araştırma sonunda Ritz yöntemi için Rayleigh yönteminin geniş kapsamlı bir genellemesi olduğu sonucunu elde etmiştir. Yani Rayleigh yöntemi serbest titreşim ve burkulmanın bulunması durumları için faydalı sonuçlar verse de Ritz yönteminin tüm yapılar için kullanılabilmesi Rayleigh yöntemini kapsayan bir yöntem olmuştur. Ditommaso vd. (2013)'nin yaptıkları bu çalışmada, betonarme binalar için yapı periyodunun yapısal ve yapısal olmayan hasar durumlarına bağlı olarak değişimini gözlemleyerek ampirik periyot önerisinde bulunmuşlardır. Bina yaşı, yüksekliği ve hasar seviyesi bakımında farklı özelliklere sahip 68 adet bina için ölçümler yapılarak EMS-98'e (Avrupa Makrosismik Skalası) göre hakim doğal titreşim periyotları karşılaştırılmıştır. Hasar seviyesi olarak EMS-98'de yer alan dört farklı hasar seviyesi dikkate alınmıştır. Sonuç olarak düşük hasar seviyesi için ölçüm yapılan periyot değerlerinin EMS-98 verilerinden daha düşük çıktığı görülmüştür. Ayrıca bina yaşı arttıkça ölçüm yapılan periyot değerlerinin de artmasına rağmen EMS-98'de verilen değerlerin altında kaldığı görülmüştür. Çalışmanın sonunda bina yaşı, yüksekliği ve hasar seviyesi parametrelerini içeren ampirik formül önerisi verilerek EMS-98 verilerinin tekrardan değerlendirilmesi gerektiği savunulmuştur.

Bu çalışmada İstanbul/Avcılar'da tasarlanan çerçeve tipi betonarme binalar, ZA ve ZC zemin sınıfları için EDDY'ye göre analiz edilmiştir. Yapılarda verilerin kolay yorumlanabilmesi için düzensizlik içermeyen taşıyıcı sistem biçimi seçilmiştir. Binaların taşıyıcı sistem modelleri SAP2000 v.23 (SAP2000 v.23) ve ETABS v.18.1.1'de (ETABS 18.1.1) gerçekleştirilmiştir. Yapı analiz programlarından elde edilen doğal titreşim periyodu, taban kesme kuvvetleri ve görelî kat ötelemeleri yönünden numerik olarak karşılaştırılmıştır. Özellikle TBDY-2019'da bina yükseklik sınıfı ve deprem tasarım sınıfını içeren sınır durumların sağlanması durumunda kullanılacak olan ampirik formül ve Rayleigh periyot formülünden elde edilen taban kesme kuvveti ve görelî kat ötelemeleri kapsamlı olarak incelenmiştir.

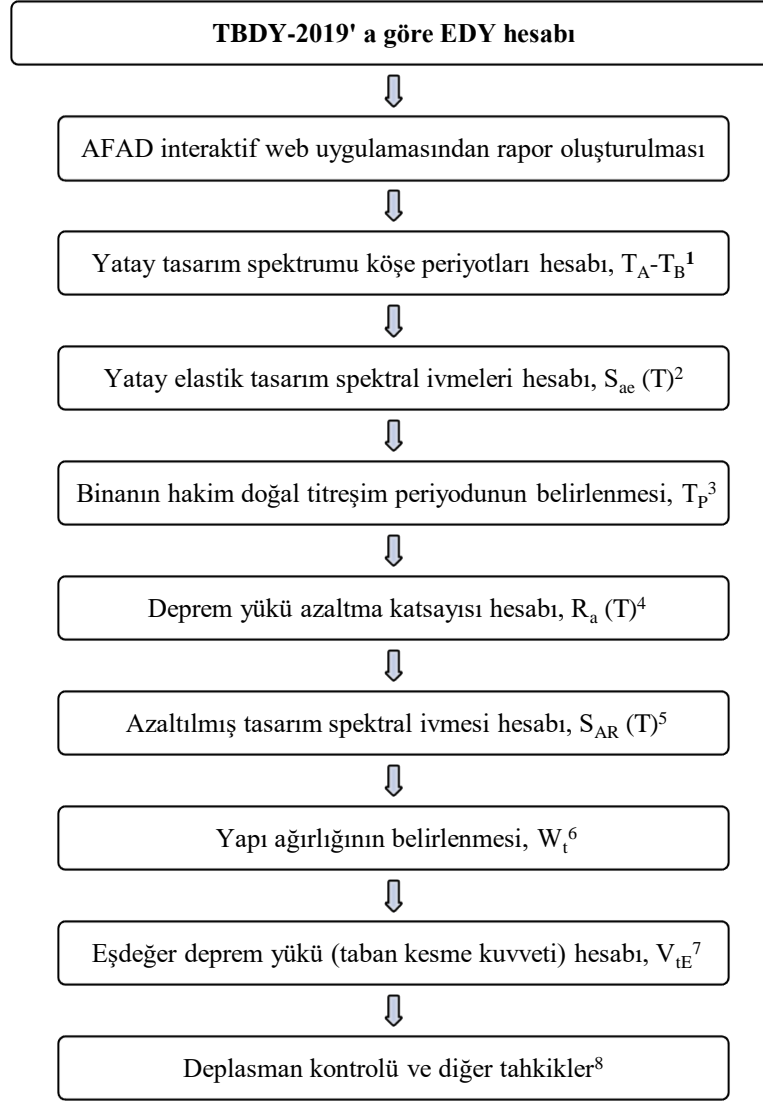
2. TBDY-2019 Doğrusal Hesap Yöntemleri

Depreme dayanıklı betonarme bina tasarımında doğrusal hesap yöntemleri olarak eşdeğer deprem yükü yöntemi (EDYY), mod birleştirme yöntemi (MBY), mod toplama yöntemi (MTY) ve zaman tanım alanında elastik yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Tasarımcı belli şartların sağlanması durumunda doğrudan EDYY'yi kullanabilirken aksi halde MBY veya MTY ile analizleri devam ettirmektedir. EDYY, deprem yükünü temsil eden ve yapıya yatay yönde her kat için artan bir statik yükün etki ettirilmesine dayanan hesap yöntemidir. Diğer bir ifade ile yapının kütlesi ile bina ivmesinin çarpılması sonucu bina tabanında oluşan taban kesme kuvveti, üçgen yük dağılımı gösterecek şekilde katlara dağıtılarak uygulanan statik bir yöntemdir.

TBDY-2019 yönetmeliği, TDY-2007 yönetmeliğine göre oldukça kapsamlı olmakla birlikte yapı elemanı ve yapı sistemleri bazında çok sayıda yenilikler ortaya koymuştur. Özellikle bina yükseklik sınıfı (BYS) ve kısa periyot spektral ivme katsayısına (S_{DS}) bağlı olarak belirlenen sekiz tane deprem tasarım sınıfı (DTS) TBDY-2019 ile tanımlanmıştır. DTS'ler, Türkiye Sismik Tehlike Haritalarının interaktif web uygulamasından alınan S_{DS} 'e bağlı olarak deprem riskinin en yüksek dereceden en düşük dereceye sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 değerlerini alabilmektedir. Ayrıca yapının kullanım amacı düşünülerek oluşturulan bina kullanım sınıfına (BKS) göre 1a, 2a, 3a ve 4a ifadelerine de yer verilmiştir. Bu durum $DTS = 1$ ve 1a olması durumunda en kritik deprem tasarım kurallarının, $DTS = 4$ ve 4a olması durumunda daha esnek deprem tasarım kurallarının uygulanması demektir. TBDY-2019'da yapılan radikal değişikliklerden biri de TDY-2007'de de yer alan taşıyıcı sistem davranış katsayısının (R) yanı sıra dayanım fazlalığı katsayısının (D) ilk kez kullanılmaya başlanmasıdır. Dayanım fazlalığı katsayısı, tasarım dayanımının akma dayanımına oranındaki fazlalığı ifade eden bir katsayıdır. Bu katsayı, taşıyıcı sistem türüne bağlı olarak 1,5-3 aralığında değerler almaktadır.

Kapasite tasarımı ilkeleri esas alınarak kolon, kiriş ve perde gibi taşıyıcı elemanlarda gevrek güç tükenmesine sebep olan kesit tesirleri, dayanım fazlalığı katsayısı ile artırılarak kesit geometrisi ve kesit içerisindeki donatılar hesaplanmaktadır. Böylece elverişsiz yükler altında taşıyıcı elemanların gevrek güç tükenmesinden uzaklaşıp sünek davranışa yaklaşması amaçlanmaktadır. Bilindiği üzere deprem kuvvetine maruz kalan bir yapıda çok sayıda mod salınım şekilleri oluşmaktadır. Fakat EDYY, hesapları kolaylaştırmak adına sadece en büyük kütle katılım oranına sahip olan 1.mod periyot değerlerini dikkate alarak doğrusal hesaplar yapmaktadır (Aksoylu & Arslan, 2019b). Böylece yer hareketi ve yapı davranışı alanında yaşanan gelişmeler neticesinde,

karmaşık analitik hesapları gerektiren deprem kuvveti, EDYY ile basitleştirilerek daha kolay ve uygulanabilir hale gelmiştir. Ancak bu yöntem her yapı yüksekliği ve türü için deprem yükünü güvenli bir şekilde temsil etmediğinden dolayı, TBDY-2019'da EDYY'nin uygulanabileceği sınır şartlar getirmiştir. DTS, burulma düzensizliği katsayısı (n_{bi}) ve B2 türü yapı düzensizliği parametrelerine bağlı olarak EDYY'nin uygulanabileceği binalar için BYS sınır şartlarına uyulması gerektiği belirtilmektedir. TBDY-2019'da BYS'ler deprem tasarım sınıflarına (DTS) bağlı olarak sekiz gruba ayrılmıştır. TBDY-2019'da yer alan BYS'ye ve DTS'ye göre tanımlanan bina yükseklik (H_N) aralıkları verilmiştir. Burada H_N ifadesi, yapıda bodrum perde varsa bodrum perde üst kotundan yoksa zemin kotundan başlayarak belirlenen yükseklik olarak ifade edilmiştir. TBDY-2019 yönetmeliğinde taban kesme kuvveti (V_{tE}) hesap adımlarının TDY-2007'ye benzer olmasına karşın EDYY için kullanılan verilerin elde edilmesinde büyük yenilikler mevcuttur. TBDY-2019'da yer alan EDYY için hesap aşamaları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. TBDY-2019'da verilen EDYY'ye ait hesap aşamalarının şematik gösterimi

Şekil 1'de verilen EDYY için hesap adımlarına ait denklemler sırasıyla Denklem 1-8 olarak Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 1'de semboller üzerinde gösterilen numaralar, hesap adımlarında kullanılan denklemlerin numaralarını göstermektedir.

Tablo 1. EDYY için hesap adımlarına ait denklemler

$T_A = \frac{0,2 * S_{D1}}{S_{DS}}$	$T_B = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$	(1)	
$S_{ae}(T) = \left(0,4 + 0,6 * \frac{T}{T_A} \right)$	$0 \leq T \leq T_A$	(2)	
$S_{ae}(T) = S_{DS}$	$T_A \leq T \leq T_B$		
$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1}}{T}$	$T_B \leq T \leq T_L$		
$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1} T_L}{T^2}$	$T_L < T$		
$T_p = 2\pi \left(\frac{\sum_{i=1}^N m_i d_{fi}^2}{\sum_{i=1}^N F_{fi} d_{fi}} \right)^{1/2}$		(3)	
$R_a(T) = \frac{R}{I}$	$T > T_B$	(4)	
$R_a(T) = D + \left(\frac{R}{I} - D \right) \frac{T}{T_B}$	$T \leq T_B$		
$S_{aR}(T) = \frac{S_{ae}(T)}{R_a(T)}$		(5)	
$w_j^{(s)} = w_{G,j}^{(s)} + w_{Q,j}^{(s)}$	$m_j^{(s)} = \frac{w_j^{(s)}}{g}$	(6)	
$V_{IE} = m_i S_{aR}(T_p) \geq 0,04 m_i I S_{DS} g$		(7)	
$\Delta_i^{(x)} = u_i^{(x)} - u_{i-1}^{(x)}$	$\delta_i = \frac{R}{I} \Delta_i$	$\lambda \frac{\delta_{i,max}}{h_i} \leq 0,008 \kappa$ $\lambda \frac{\delta_{i,max}}{h_i} \leq 0,016 \kappa$	(8)

EDYY’de kullanılan hâkim doğal titreşim periyodu yani Rayleigh periyodu (T_p), azaltılmış spektral ivme (S_{aR}) değerini doğrudan etkilediği için deprem etkisi altında yapıda meydana gelen taban kesme kuvvetini (V_{IE}) önemli ölçüde etkileyen bir parametredir. EDYY’nin uygulanabildiği tüm binalarda hâkim doğal titreşim periyodu daha kesin bir hesap yapılmadıkça Denklem 3’de verilen Rayleigh formülü ile hesaplanmaktadır. Başka bir ifadeyle Rayleigh formülünü her yapıda, her zaman ve her şartta uygulanabileceği belirtilmektedir. Bunun yanı sıra TBDY-2019 yönetmeliği, DTS = 1, 1a, 2, 2a ve BYS ≤ 6 olan binalarda ve DTS = 3, 3a, 4, 4a olan tüm binalarda Rayleigh hesabı yerine basitleştirilmiş ampirik periyodun (T_{pA}) kullanılabilirliğini önermektedir ($T_p \approx T_{pA}$). Ayrıca Rayleigh formülünden bulunan T_p periyodunun, Denklem 9’da verilen ampirik periyot değerinin 1,4 katından daha fazla alınmayacağı belirtilmektedir (TBDY, 2019). Bu sınırın aşılma durumu daha çok orta yüksekliğe sahip binalardan sonraki bina yüksekliğine karşılık gelen binalarda görülebilmektedir.

$$T_{pA} = C_t * H_N^{0,75} \quad (9)$$

Burada H_N , binanın toplam yüksekliğini ifade etmektedir. C_t katsayısı taşıyıcı sistemi sadece betonarme çerçevelerden oluşan yapılarda $C_t = 0,1$, çelik çerçevelerden ve çaprazlı çelik çerçevelerden oluşan binalarda $C_t = 0,08$, diğer tüm binalarda ise $C_t = 0,07$ alınacağı belirtilmektedir.

TBDY-2019’da dolgu duvar elemanlarının çerçeveye tamamen bitişik olması ve çerçeveden esnek derz uygulaması ile bağımsız olması durumlarına göre iki farklı sınır şart verilmiştir. Görelî kat ötelemeleri kontrolü yapılırken dolgu duvar elemanların çerçeveye bitişik olması durumu Denklem 10, çerçeve ile dolgu duvar elemanları arasında esnek derz bulunması durumu Denklem 11’de verilmiştir. Görüldüğü üzere dolgu duvarların taşıyıcı sisteme tam bitişik olması durumunda (ki imalatların genellikle bu

şekilde yapıldığı bilinmektedir) deplasman kontrolü için sınır değerin 2 kata çıkmasını sağlamıştır. Başka bir ifade ile dolgu duvar – çerçeve bağlantısının derzli teşkil edildiği binalarda 2 kat daha fazla ötelemeye müsaade edilmektedir. Bu durum deprem anında dolgu duvarların çerçeve sisteme bitişik olarak imal edilmesiyle depreme yükü etkisindeki çatlama anına kadar rijitliğe ciddi katkı sağladığını ve hesaplarda dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

$$\lambda \frac{\delta_{i,max}}{h_i} \leq 0,008\kappa \quad (10)$$

$$\lambda \frac{\delta_{i,max}}{h_i} \leq 0,016\kappa \quad (11)$$

Burada verilen h_i hesap yapılan i 'inci kat yüksekliğini ifade etmektedir. λ katsayısı, bina için esas alınan hakim titreşim periyodu için DD-3 deprem yer hareket düzeyine (50 yılda aşılma olasılığının %50) göre hesaplanan elastik tasarım spektral ivmesi' nin ($S_{ae}(T)_{DD-3}$), DD-2 deprem yer hareket düzeyine (50 yılda aşılma olasılığının %10) göre hesaplanan elastik tasarım spektral ivmesine ($S_{ae}(T)_{DD-2}$) oranı olarak Denklem 12'deki gibi tanımlanmaktadır. $\delta_{i,max}$ ise etkin görelî kat ötelemeleri içerisinde en büyük ötelemeye sahip değeri olarak ifade edilmektedir. κ katsayısı betonarme binalarda $\kappa = 1$, çelik binalarda ise $\kappa = 0,5$ olarak alınacağı belirtilmektedir.

$$\lambda = \frac{S_{ae}(T)_{DD-3}}{S_{ae}(T)_{DD-2}} \quad (12)$$

TBDY-2019'da esas alınan deprem doğrultusu için, yapının i 'inci katındaki kolon veya perde taşıyıcı elemanlar için etkin görelî kat ötelemesi (δ_i) Denklem 13'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

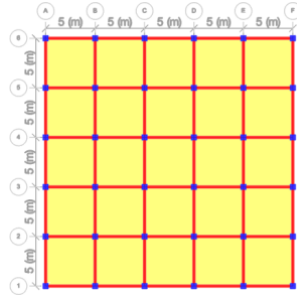
$$\delta_i = \frac{R}{I} \Delta_i \quad (13)$$

Denklemden verilen R , taşıyıcı sistem davranış katsayısını ve I bina önem katsayısını ifade etmektedir. Δ_i ise azaltılmış görelî kat ötelemesini temsil etmektedir. Azaltılmış görelî kat ötelemesi, üst kat deplasmanı ile alt kat deplasmanı arasındaki fark şeklinde hesap edilmektedir. Denklem 14'de azaltılmış kat ötelemelerinin elde edilmesi gösterilmiştir.

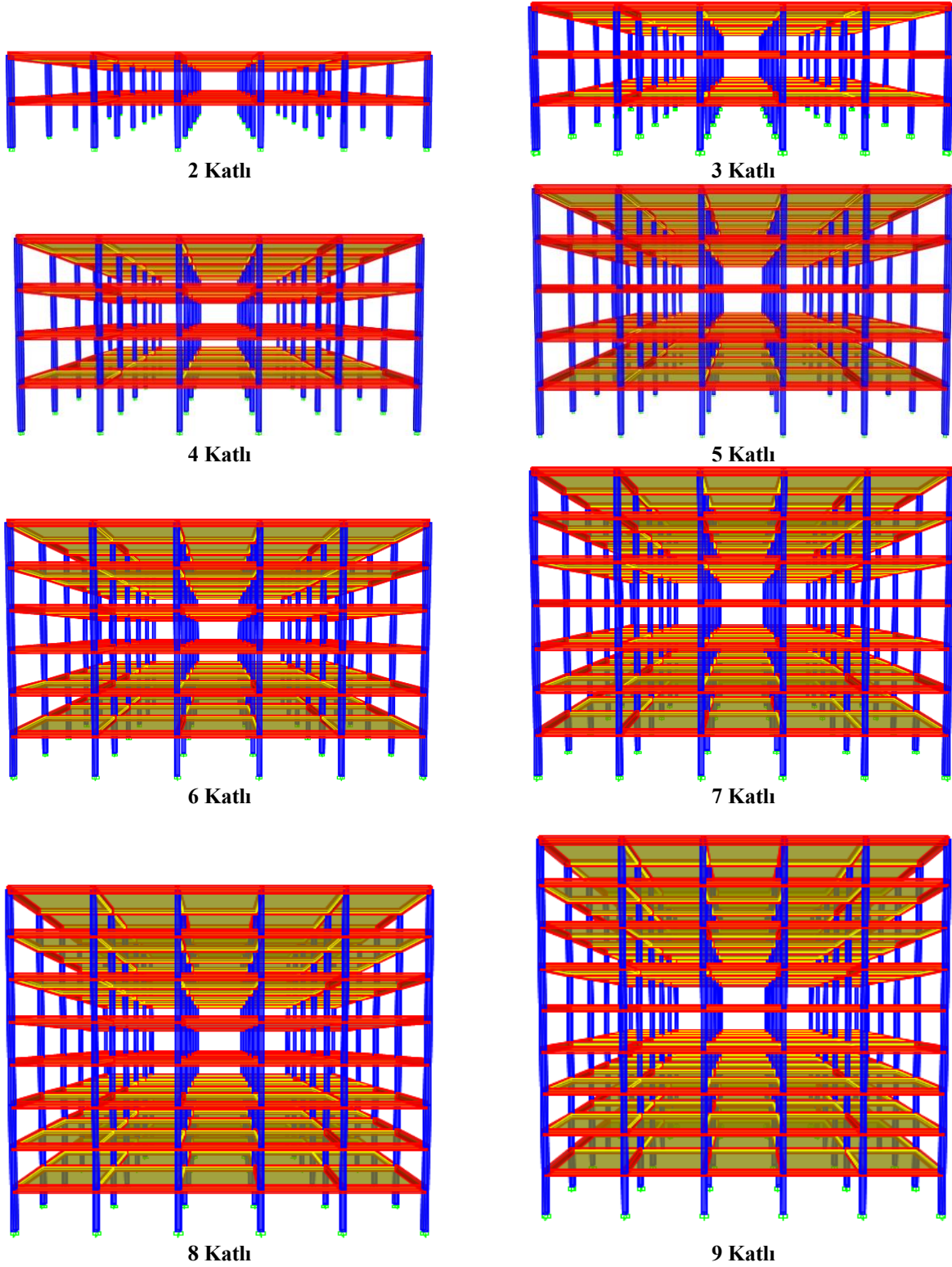
$$\Delta_i^{(x)} = u_i^{(x)} - u_{i-1}^{(x)} \quad (14)$$

3. Numerik Analiz

Numerik analizler İstanbul/Avcılar'da yer alan belediye binasının koordinatları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Modeller 2-9 katlı çerçeve tipi konut yapısını için oluşturulmuştur. Avcılar bölgesi, Kuzey Anadolu Fay Hattına yakın olduğu için deprem derecesi bakımından kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısına (S_{DS}) bağlı olarak belirlenen $DTS=1$ 'e karşılık gelmektedir. Toplam bina yükseklikleri (H_N) seçilirken doğrusal hesap yöntemi olan EDYY'nin uygulanabileceği bina yükseklik sınıfları (BYS) dikkate alınmıştır. X ve Y doğrultularında 5 açıklığa sahip binalar için kat yüksekliği 3m olarak seçilmiştir. Tüm modellerde plan geometrisi aynı olmakla birlikte her iki yöndeki plan uzunlukları 25m×25m olup kat alanı 625 m²'dir. ZA ve ZC olmak üzere iki farklı zemin sınıfı için AFAD'ın interaktif web uygulaması üzerinden elde edilen deprem verileri dikkate alınarak SAP2000 v.23 yapı analiz programında modeller oluşturulmuştur. Ayrıca ETABS v.18.1.1 yapı analiz programında da analizler yapılarak iki program arasında deprem hesabı yönünden karşılaştırmalar yapılmıştır. TBDY-2019'da verilen etkin kesit rijitlik çarpanları kolonlar için %70, kirişler için %35 ve döşemeler için ise %25 olacak şekilde tanımlanmıştır. Modelde çift yönlü döşeme için gerekli hesaplamalar yapılarak döşeme kalınlığı 160 mm olarak seçilmiştir. Döşeme kalınlığına göre de minimum kiriş boyutları 250mm×480mm olmasına rağmen uygulamada kolaylık sağlaması ve sehim şartları açısından 250mm×500mm olarak belirlenmiştir. Kolon boyutları düşey ve yatay yükler altındaki kombinasyonlar dikkate alınarak belirlenmiştir. 1,4G+1,6Q yüklemesi altında $0,6 \times f_{ck} \times A_c$ ile G+Q+E yüklemesi altında ise $0,4 \times f_{ck} \times A_c$ kontrollerine uygun olarak 550mm×550mm kolon boyutları seçilmiştir. Kolon boyutlarının aynı seçilmesinin sebebi yapılan 2-9 katlı tüm modeller için yeterli olmasından kaynaklanmaktadır. Bina temeli için ayrı bir boyutlandırma yapılmamış, ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır. Beton sınıfı C30 ve donatı sınıfı ise B420c seçilmiştir. Şekil 2 ve Şekil 3'de kullanım amacı konut olan ve bu çalışmada dikkate alınan modellerin kat planı ve üç boyutlu görünümüleri verilmiştir.



Şekil 2. SAP2000 yapı modeli kat planı



Şekil 3. Yapı modeli 3D görünümü

Numerik analizde kolon ve kirişler çerçeve (çubuk), döşemeler ise kabuk (shell) sonlu eleman olarak modellenmiştir. Her kat için rijit diyafram kabulü yapılmış ve sönüm oranı TBDY-2019'da betonarme binalar için verilen %5 olarak dikkate alınmıştır. Modellemelerde her bir yapı ağırlığı SAP2000 programına hesaplatılmış olup tüm kat döşemelerine ayrıca kaplama yükü 1.5kN/m^2 ve duvar yükü 2.5kN/m^2 olmak üzere toplam $g=4\text{kN/m}^2$ yayılı yük olarak uygulanmıştır (TS 498, 1997). Hareketli yük olarak döşemelere $q=2\text{kN/m}^2$ ve son kata ilave olarak İstanbul/Avcılar bölgesi için TS 498'de verilen kar yükü $q_k=0,75\text{kN/m}^2$ olarak uygulanmıştır. Yapılan analizlerde dolgu duvarlar ile çerçeve elemanlar arasında esnek derz olması durumu dikkate alınarak dolgu duvarların yapı rijitliğine katkısı olmadığı yalnızca düşey yük olarak etki ettiği kabul edilmiştir. Deprem etkilerinin süneklik düzeyi yüksek betonarme çerçeveler ile karşılandığı durum için taşıyıcı sistem davranış katsayısı ($R=8$) ve dayanım fazlalığı katsayısı ($D=3$) olarak dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamındaki modellemeler TBDY-2019'a göre dikkate alınan tasarım hesap parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

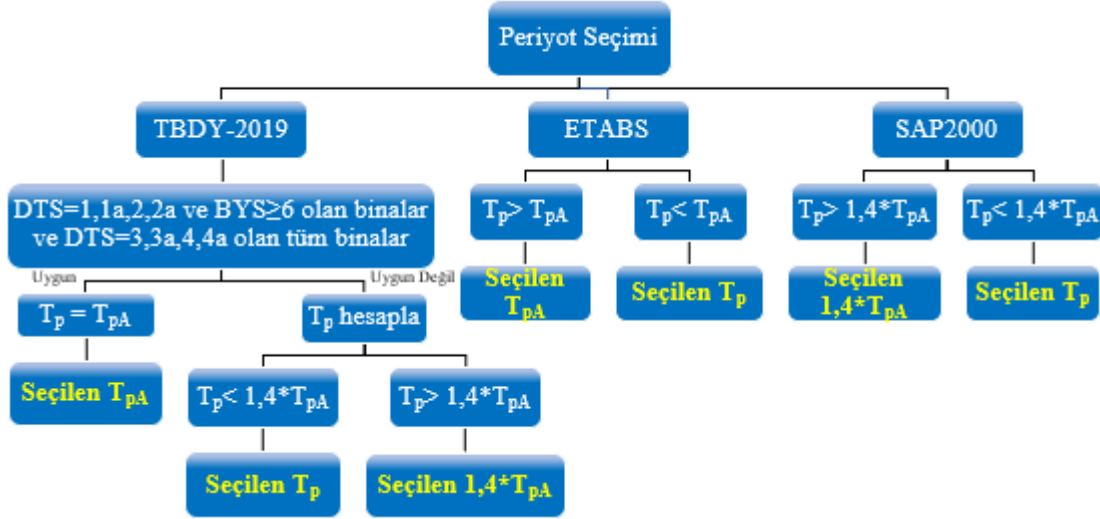
Tablo 2. Tasarım hesap parametreleri

Konum	İstanbul/Avcılar
Enlem	40.978817
Boylam	28.720963
Yerel Zemin Sınıfı	ZA (Sağlam, sert kayalar) ZC (Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar)
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD-2 (50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi)
Deprem Tasarım Sınıfı	DTS1
Bina Kullanım Sınıfı	BKS3 (Konut yapıları için $I=1$) BYS8 ($H_N=6\text{m}$)-2 katlı bina BYS7 ($H_N=9\text{m}$)-3 katlı bina
Bina Yükseklik Sınıfı	BYS6 ($H_N=12\text{m}$ ve 15m)-4 ve 5 katlı bina BYS5 ($H_N=18\text{m}$, 21m , 24m , 27m)-6,7,8 ve 9 katlı bina
S_s	1.283
S_1	0.346
PGA	0.525g
PGV	32.035cm/s

Modellemeler ilk olarak SAP2000 v.23'de gerçekleştirilmiştir. SAP2000'de deprem hesaplarında dikkate alınabilecek üç farklı periyot durumundan bahsedilmektedir. Bunlar Rayleigh periyodu (T_p), ampirik periyot (T_{pA}) ve kullanıcı tanımlı periyot değeridir. Tasarım mühendisi TBDY-2019'da yer alan sınır şartlara göre bu periyot hesap yaklaşımlarını tercih ederken program hakkında yeterli bilgiye sahip olması gerekir. Yani programın tasarımcıya sunduğu üç farklı periyot seçeneğine bağlı olarak yaptığı kabülleri bilmek gerekmektedir. Çünkü tasarımcının seçeceği periyot seçeneğine göre hesaplarda dikkate alınan periyot ve taban kesme kuvvetleri değişmektedir.

SAP2000'de 2-9 katlı tüm modeller için ampirik periyot (T_{pA}), Rayleigh periyodu (T_p) ve SAP2000 programının deprem hesabında dikkate aldığı periyot değerleri (T_{pA} , $1.4T_{pA}$ veya T_p) belirlenmiştir. TBDY-2019 yönetmeliği, DTS = 1, 1a, 2, 2a ve $BYS \geq 6$ olan binalarda ve DTS = 3, 3a, 4, 4a olan tüm binalarda Rayleigh periyodu hesaplanmaksızın doğrudan ampirik periyodun (T_{pA}) kullanılabilmesini önermektedir. Ayrıca TBDY-2019 yönetmeliği, bina için hesaplanan T_p değerinin T_{pA} değerinin 1,4 katından daha büyük olamayacağını belirtmektedir. Programlarda TBDY-2019'da verilen bu yaklaşımı DTS ve BYS 'yi dikkate almadan kullanıcının iznine bırakmıştır. Eğer kullanıcı tasarladığı binanın ampirik formül sınırları içerisinde olduğunu biliyorsa "yaklaşık (approximate)" seçeneğini doğrudan kullanabilir. Aksi halde "program calculated" seçeneğini seçmesi gerekmektedir. Bu seçenek ile SAP2000 ya Rayleigh periyodunu ya da $1.4T_{pA}$ periyodunu deprem hesabında dikkate almaktadır. Tasarımcı eğer farklı bir periyot değerini hesaplarda dikkate almak isterse kullanıcı tanımlı "user defined" seçeneğini de kullanabilmektedir.

Tasarımcılara yol gösterilmesi için binaya gelen taban kesme kuvvetini doğrudan etkileyen periyot hesabı, program yaklaşımlarına göre kapsamlı olarak araştırılmıştır. Bunun için ilk olarak Şekil 4'de gösterilen akış diyagramı oluşturulmuştur. Bu sayede TBDY-2019, SAP2000 ve ETABS için periyot hesapları karşılaştırılmıştır. Şekil 4 incelendiğinde SAP2000 programında program calculated seçildiğinde, T_p ile $1.4T_{pA}$ değerleri arasında karşılaştırma yaparak küçük olan periyot değerini deprem hesaplarında kullanmaktadır. ETABS ise T_p ile T_{pA} arasında kıyas yaparak doğrudan daha küçük olan periyodu dikkate almaktadır. Tablo 3 incelendiğinde SAP2000'de program calculated seçilmesi durumunda deprem hesabına esas dikkate alınan periyot değerleri gösterilmiştir.

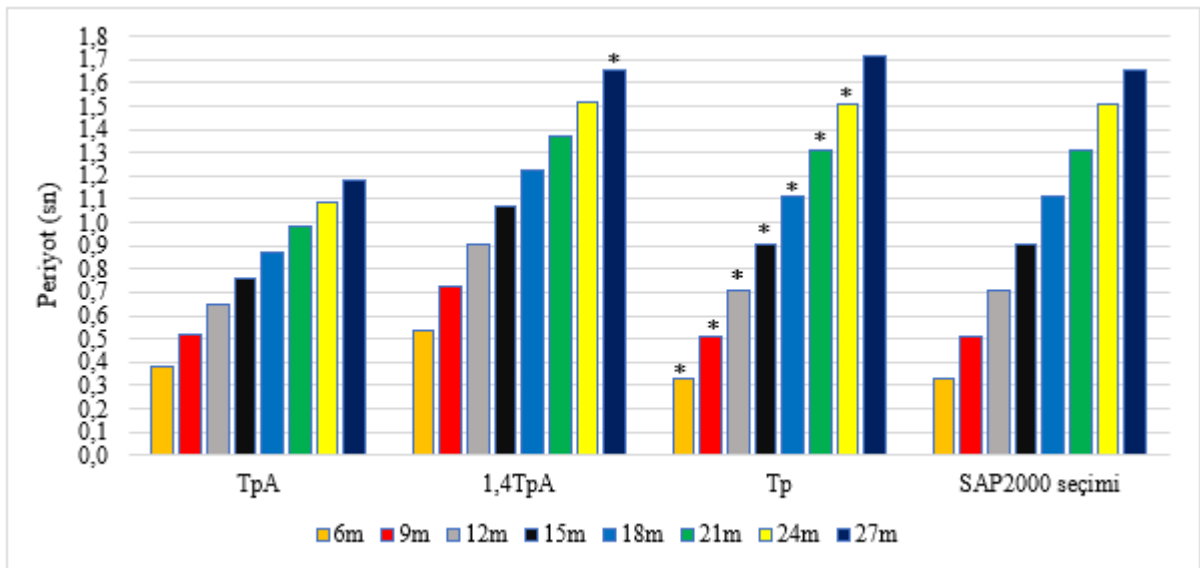


Şekil 4. Periyot seçimi yapılırken izlenecek adımlar

Tablo 3. SAP2000 programında ZA için periyot değerleri

Kat sayısı/ H_N	Deprem yönü	T_{pA} periyodu (sn)	$1,4 \times T_{pA}$ periyodu (sn)	Rayleigh periyodu (T_p) (sn)	SAP2000'in dikkate aldığı periyot (sn)
2/6m	X/Y	0,3834	0,5368	0,3277	0,3277
3/9m	X/Y	0,5196	0,7274	0,5118	0,5118
4/12m	X/Y	0,6447	0,9026	0,7060	0,7060
5/15m	X/Y	0,7620	1,0668	0,9081	0,9081
6/18m	X/Y	0,8739	1,2235	1,1086	1,1086
7/21m	X/Y	0,9810	1,3734	1,3103	1,3103
8/24m	X/Y	1,0843	1,5181	1,5128	1,5128
9/27m	X/Y	1,1845	1,6583	1,7158	1,6583

Tablo 3’de verilen farklı kat yüksekliğine sahip binalardan yalnızca 9 katlı yapı için T_p ’nin $1,4 \times T_{pA}$ ’dan daha yüksek sonuç verdiği ve SAP2000’in $1,4 \times T_{pA}$ periyodunu dikkate aldığı görülmüştür. Diğer tüm yapılarda ise Rayleigh periyodunu dikkate almıştır. Tasarımcı ilgili şartların sağlanması durumunda ampirik formülü kullanırsa approximate seçeneğini seçebilir. Yani SAP2000 kendi bünyesinde DTS ve BYS’yi dikkate almayıp tasarımcının tercihine bırakmıştır. Şekil 5’de deprem hesabına esas periyot değerleri seçilirken dikkate alınan T_p , T_{pA} , $1,4T_{pA}$ ve program calculated seçilmesi durumunda program tarafından seçilen periyot değerleri grafik halinde gösterilmiştir.



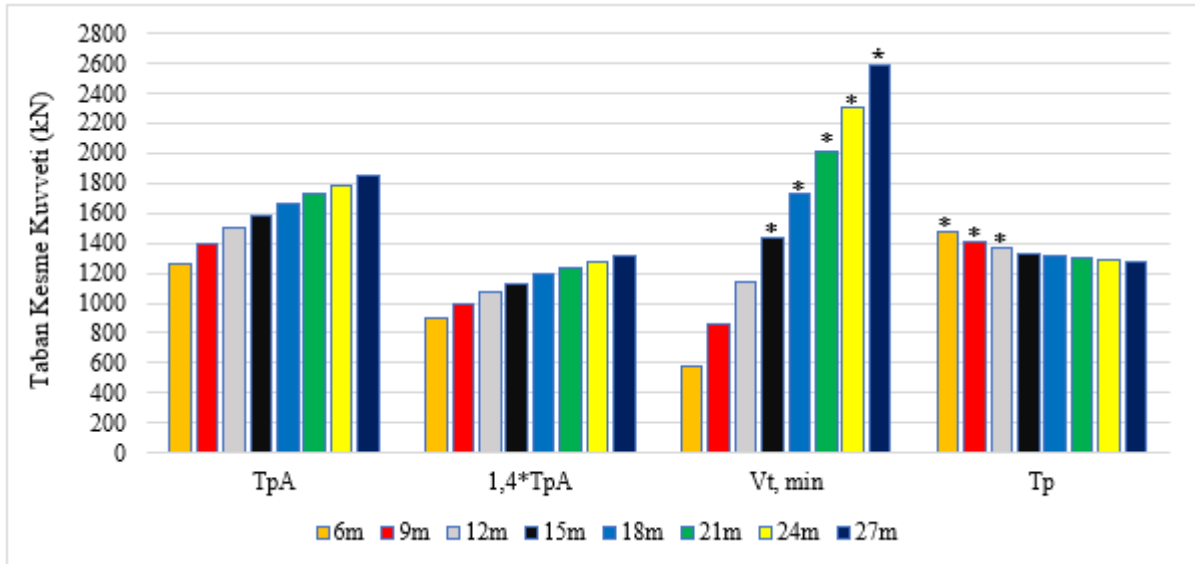
*Sap 2000 modelinde program calculated seçilmesi durumunda dikkate alınan periyota karşılık gelmektedir.

Şekil 5. Karşılaştırma yapılan periyotlar (ZA)

TBDY-2019'da deprem etkisi altında bina tabanında oluşan kesme kuvveti, periyottan bağımsız olarak dikkate alınacak minimum taban kesme kuvveti şeklinde verilmiştir. Minimum taban kesme kuvveti, $V_{t,min}=0,04 \times m_i \times I \times S_{DS} \times g$ formülü ile hesaplanmaktadır. Burada bina kütlesi (m_i), bina önem katsayısı (I), kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S_{DS}) ve yer çekimi ivmesi (g) ön plana çıkmaktadır. Tablo 6 ve Şekil 6 incelendiğinde SAP2000'de program calculated seçiliyen, $H_N=6$ ve $H_N=9$ (BYS-8 ve BYS-7) olan modellerde T_{pA} 'dan, $H_N=12$, $H_N=15$ (BYS-6) olan modellerde ise T_p 'den elde edilen taban kesme kuvvetleri daha düşük sonuçlar vermiştir. Son olarak $H_N=18$, $H_N=21$, $H_N=24$ ve $H_N=27$ (BYS-5) olan modellerde düşük taban kesme kuvvetleri elde edildiğinden SAP2000 programı doğrudan minimum deprem hesabını dikkate almıştır. Bu durum SAP2000 programında program calculated seçiliyen TBDY-2019 yönetmeliğinde verilen Rayleigh periyodunu dikkate aldığı ve buna göre taban kesme kuvveti hesapladığını ve minimum deprem kuvveti ile karşılaştırdığını göstermiştir. SAP2000'de program calculated seçiliyen TBDY-2019'da verilen ampirik formül önerisini DTS ve BYS şartlarına göre değerlendirmemektedir. Bu durum BYS-8 ve BYS-7 için yapıya etki eden deprem yükü, ampirik formül ile hesap edildiğinde Rayleigh periyoduna göre daha düşük seviyede olmaktadır. Dolayısıyla TBDY-2019'da verilen BYS-8 ve BYS-7 için ampirik formül önerisinin dikkate alınarak tasarımcı tarafından değerlendirilmesi gerektiği düşünülmektedir. Diğer taraftan BYS-6 için ise ampirik formülden elde edilen taban kesme kuvvetleri, Rayleigh formülünden elde edilen taban kesme kuvvetlerine göre daha yüksek elde edilmiştir. Bu durum yönetmelikte önerilen ampirik formül ile periyot hesabında emniyetli tarafta kalınmak istendiğini göstermektedir. BYS-5 için ise periyottan bağımsız olan minimum deprem kuvveti dikkate alınmıştır. Dolayısıyla SAP2000 analiz programı yapılan modellerde TBDY-2019 yönetmeliğinde verilen DTS ve BYS sınır şartlarını kullanıcının dikkate almasını isteyerek periyot seçimi yapmasını sağlamaktadır. Tablo 4'de ZA zemin sınıfı için taban kesme kuvvetleri, Şekil 6'da periyoda karşılık taban kesme kuvvetlerinin değişimi gösterilmiştir. Tablo 4'de 4 kata kadar Rayleigh periyodundan bulunan taban kesme kuvveti dikkate alınırken sonraki katlar için minimum taban kesme kuvveti dikkate alınmaktadır.

Tablo 4. SAP2000 programında periyotlara göre taban kesme kuvvetleri (ZA)

Kat Sayısı	Deprem Yönü	T_{pA} Periyodu (V_i)(kN)	$1,4 \times T_{pA}$ Periyodu (V_i)(kN)	Rayleigh Periyodu (V_i)(kN)	Minimum Taban Kesme Kuvveti (kN)	SAP2000 programının dikkate aldığı periyot (V_i)(kN)
2 (6m)	X/Y	1261,155	900,760	1475,5	573,7	1475,3
3 (9m)	X/Y	1390,468	993,245	1411,6	857,2	1411,7
4 (12m)	X/Y	1498,857	1070,587	1368,7	1146,6	1368,7
5 (15m)	X/Y	1587,694	1134,363	1332,6	1435,9	1435,9
6 (18m)	X/Y	1663,765	1188,365	1311,5	1725,2	1725,2
7 (21m)	X/Y	1730,674	1236,195	1295,7	2014,5	2014,5
8 (24m)	X/Y	1790,664	1278,978	1283,4	2303,9	2303,9
9 (27m)	X/Y	1845,034	1317,882	1273,7	2593,2	2593,2

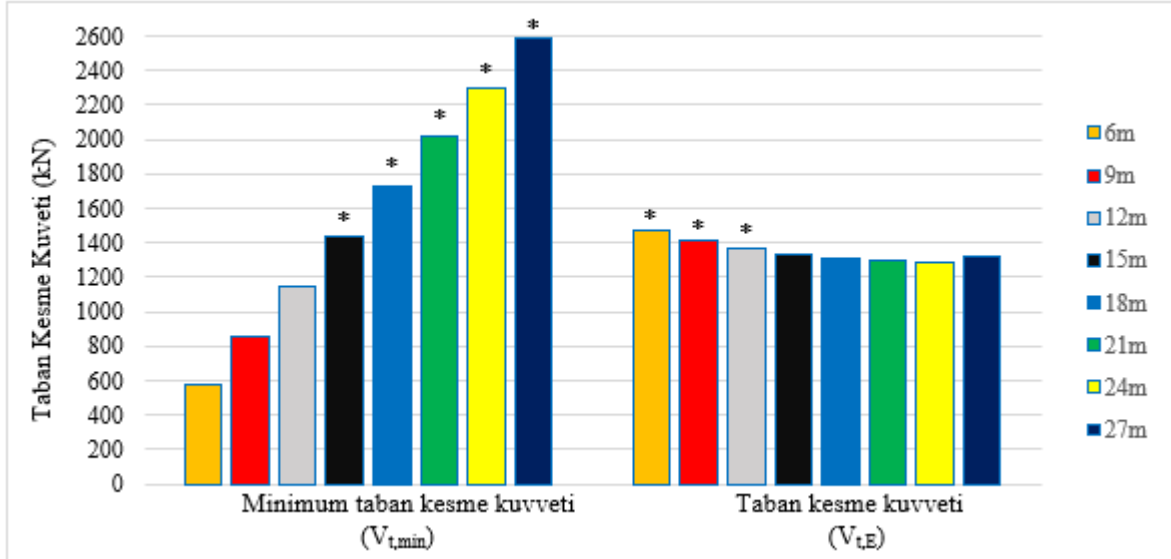


* SAP2000 modelinde program calculated seçilmesi durumunda dikkate alınan periyota karşılık taban kesme kuvveti değeridir.

Şekil 6. Periyotlara göre taban kesme kuvvetleri (ZA)

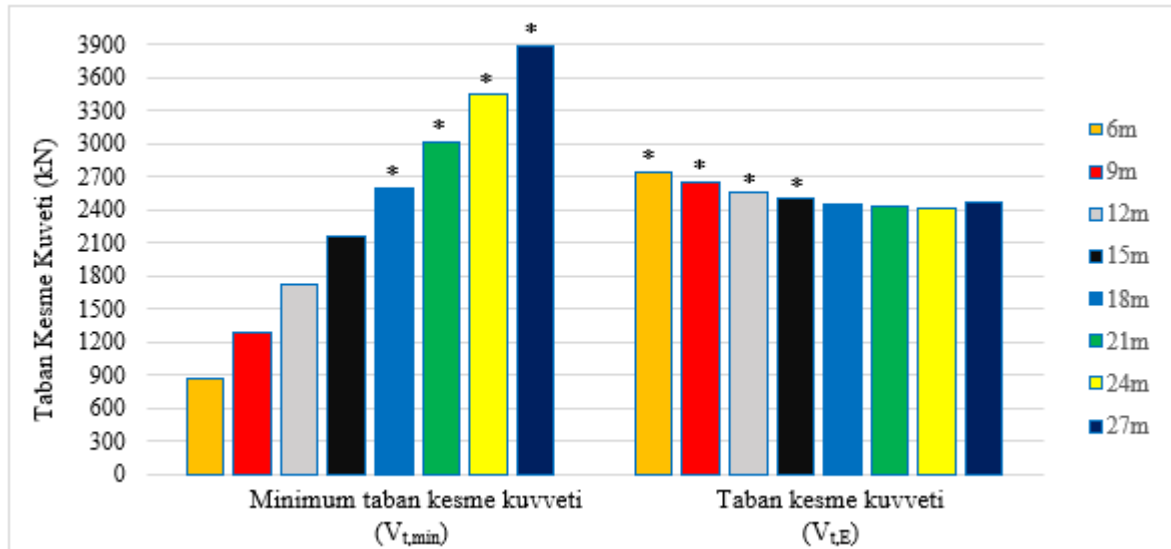
Şekil 7'de ZA zemin sınıfı Şekil 8'de ise ZC zemin sınıfı için elde edilen minimum taban kesme kuvvetleri ve deprem hesabında dikkate alınan taban kesme kuvvetleri verilmiştir. Ayrıca Tablo 5'de ZA ve ZC zemin sınıfı için minimum taban kesme kuvveti ve hesapta dikkate alınan kesme kuvvetleri yönünden karşılaştırmalar yapılmıştır. SAP2000 modelinde verilen sonuçlara bakıldığında, zeminin ZA olması durumunda 2, 3 ve 4 katlı; zeminin ZC olması durumunda 2, 3, 4 ve 5 katlı binalarda EDYY ile belirlenen taban kesme kuvveti, minimum taban kesme kuvvetinden daha büyük olduğu için hesapta EDYY ile belirlenen taban

kesme kuvveti dikkate alınmıştır. Bu durumun aksine zeminin ZA olması durumunda 5, 6, 7, 8 ve 9 katlı; zeminin ZC olması durumunda 6, 7, 8 ve 9 katlı binalarda EDYY ile belirlenen taban kesme kuvveti, minimum taban kesme kuvvetinden küçük olduğu için hesapta minimum taban kesme kuvveti dikkate alınmıştır. Yapılan analizler neticesinde ZA zemin sınıfında 5-9 katlı (15-27m) binalar için ve ZC zemin sınıfında ise 4-9 katlı (12-27m) binalar için rayleigh periyot değerleri yüksek çıktığından spektrum eğrisi dikkate alınınca taban kesme kuvvetleri azalmaktadır. Bu azalma SAP2000'in kendi bünyesinde var olan minimum taban kesme kuvveti hesabından daha düşük olduğundan, SAP2000 hesaplarında TBDY-2019'da da belirtildiği gibi minimum taban kesme kuvvetini dikkate almaktadır.



* SAP2000 modelinde program calculated seçilmesi durumunda dikkate alınan periyota karşılık taban kesme kuvveti değeridir.

Şekil 7. SAP2000' de seçilen taban kesme kuvvetleri (ZA)



* SAP2000 modelinde program calculated seçilmesi durumunda dikkate alınan periyota karşılık taban kesme kuvveti değeridir.

Şekil 8. SAP2000' de seçilen taban kesme kuvvetleri (ZC)

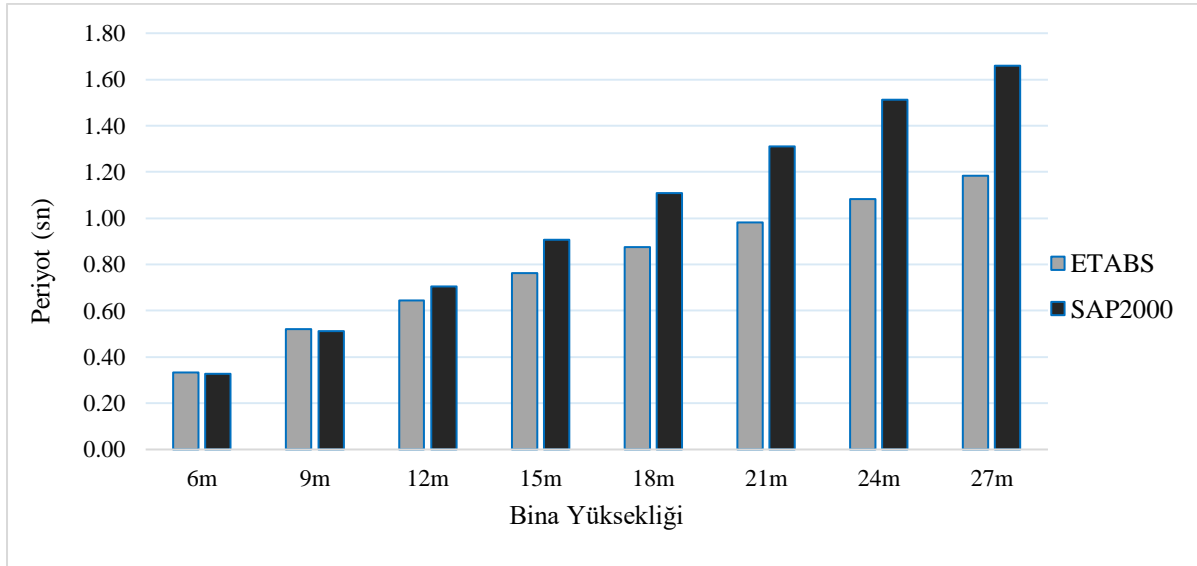
Tablo 5'de ZA ve ZC zemin sınıfları için katlara göre minimum taban kesme kuvveti ile hesaplarda dikkate alınan taban kesme kuvveti karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ZC zemin sınıfına sahip binalarda meydana gelen taban kesme kuvveti, ZA zemin sınıfına sahip binalarda meydana gelen taban kesme kuvvetinden değişen kat sayılarına bağlı olarak %50-80 daha yüksek sonuç verdiği görülmektedir. SAP2000 programında yapılan karşılaştırmalar ETABS programında da yalnızca ZC sınıfı için karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar ile programlar tarafından yapılan kabuller tespit edilerek araştırmacılara sunulmuştur. TBDY-2019'da yapının doğal titreşim periyodunun ampirik periyodun (T_{pA}) 1,4 katından büyük olamayacağı belirtilmektedir. SAP2000 program calculated seçeneği ile yönetmeliğe uygun olarak hesaplanmış olduğu Rayleigh periyodu ile $1,4 \times T_{pA}$ değeri arasında karşılaştırma yaparak küçük olan periyot değerini deprem hesabında kullanmaktadır. Fakat ETABS programı, hesaplanmış olduğu Rayleigh periyodu ile ampirik periyot (T_{pA}) arasında karşılaştırma yaparak küçük olan periyot değerini deprem hesabında kullanmaktadır. Yani 1,4 kat sayısını dikkate almamaktadır.

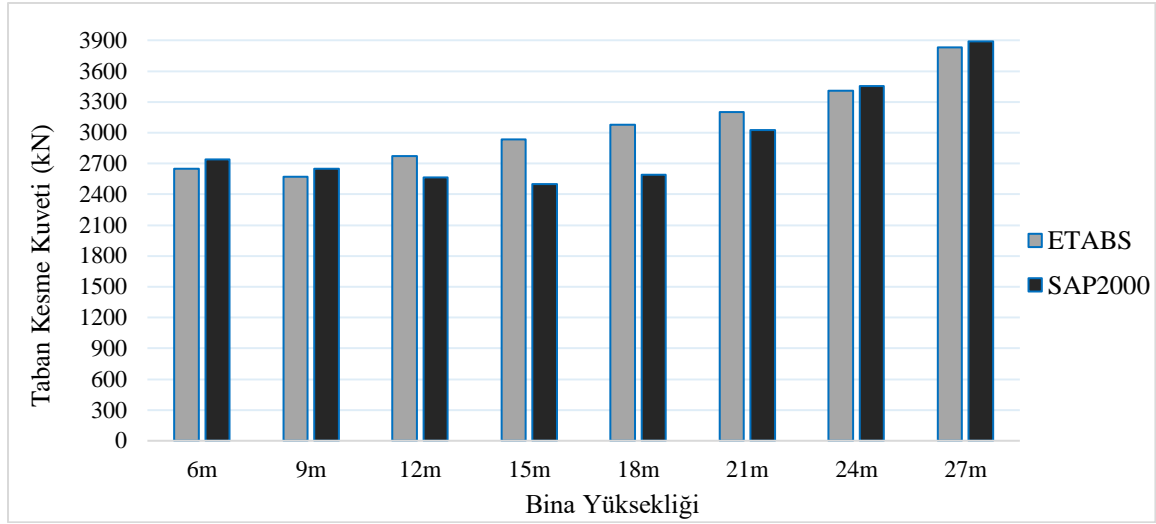
Tablo 5. ZA ve ZC zemin sınıflarına göre taban kesme kuvvetleri

Kat Sayısı	Kat Yüksekliği /BYS	Deprem Yöntü	Periyot (sn)*	Bina Ağırlığı $W=g+nq$ (kN)	ZA		ZC	
					Minimum Taban Kesme Kuvveti (kN)	Taban Kesme Kuvveti (kN)	Minimum Taban Kesme Kuvveti (kN)	Taban Kesme Kuvveti (kN)
2	6m/BYS8	X/Y	0,3277	13974,8	573,7	1475,4	860,8	2737,9
3	9m/BYS7	X/Y	0,5118	20881,1	857,3	1411,8	1286,3	2648,0
4	12m/BYS6	X/Y	0,7060	27928,1	1146,6	1368,8	1720,4	2567,3
5	15m/BYS6	X/Y	0,9081	34975,1	1435,9	1435,9	2154,5	2499,6
6	18m/BYS5	X/Y	1,1086	42022,1	1725,3	1725,3	2588,8	2588,8
7	21m/BYS5	X/Y	1,3103	49069,1	2014,6	2014,6	3022,9	3022,9
8	24m/BYS5	X/Y	1,5128	56116,1	2303,9	2303,9	3457,0	3457,0
9	27m/BYS5	X/Y	1,6583	63163,1	2593,2	2593,2	3891,2	3891,2

* SAP2000'deki T_p veya $1.4T_{pA}$ kıyasına göre alınan periyottur.

Çalışma kapsamında ETABS ve SAP2000 yazılım programları arasında ZC zemin sınıfı için Şekil 9'da doğal titreşim periyotları, Şekil 10'da taban kesme kuvveti ve Tablo 6'da deprem hesabında gerekli diğer veriler karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 2 ve 3 katlı binalarda ETABS'dan elde edilen rayleigh periyodu, SAP2000'den elde edilen periyot değerinden %1,2-1,6 kadar fazla olduğu görülmüştür. Çünkü 2 ve 3 katlı binalarda Rayleigh periyodu (T_p) ampirik periyottan (T_{pA}) daha düşük sonuç vermiştir. Bu durumda ETABS programı T_p ile T_{pA} arasında kıyas yaparak küçük olan T_p periyodunu dikkate almıştır. SAP2000 programı ise T_p ile $1,4 \times T_{pA}$ arasında kıyas yaparak küçük olan T_p periyodunu dikkate almıştır. 4-9 katlı binalarda ise ETABS'dan elde edilen periyot, SAP2000'den elde edilen periyot değerinden %9,5-40 kadar az olduğu görülmüştür. Çünkü 4-9 katlı binalarda T_p periyodu T_{pA} periyodundan daha yüksek sonuç vermiştir. Bu yüzden ETABS programı T_p ile T_{pA} arasında kıyas yaparak küçük olan T_{pA} periyodunu dikkate almıştır. SAP2000 programı ise T_p ile $1,4T_{pA}$ arasında kıyas yaparak 4-8 katlı binalar için küçük olan T_p periyodunu ve 9 katlı bina için küçük olan $1,4T_{pA}$ periyodunu dikkate almıştır. Değişen periyot değerlerine bağlı olarak 2 ve 3 katlı binalarda ETABS'dan elde edilen taban kesme kuvveti, SAP2000'den elde edilen taban kesme kuvveti değerinden %3-3,1 kadar daha az olduğu görülmüştür. 4, 5 ve 6 katlı binalarda ETABS'dan elde edilen taban kesme kuvveti, SAP2000'den elde edilen taban kesme kuvveti değerinden %7,9-18,8 kadar daha fazla olduğu tespit edilmiştir. 7, 8 ve 9 katlı binalarda ise hem ETABS programı hem de SAP2000 programı taban kesme kuvveti olarak minimum deprem kuvvetini dikkate almıştır. Fakat ETABS programından alınan bina toplam ağırlığı, SAP2000 programından alınan bina toplam ağırlığından %1,46 kadar daha az olduğundan bu durum aynı oranla taban kesme kuvveti hesabına da yansımıştır.

**Şekil 9.** Periyotlara göre ETABS ve SAP2000 karşılaştırılması (ZC)



Şekil 10. Taban kesme kuvvetine göre ETABS ve SAP2000 karşılaştırılması (ZC)

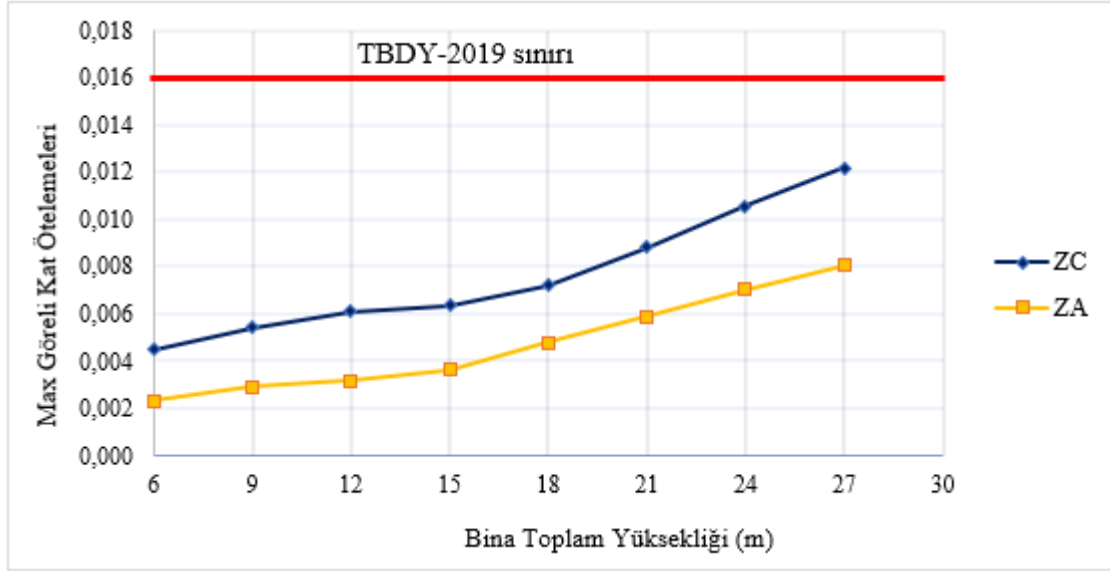
Tablo 6. ETABS ve SAP2000 deprem hesabının karşılaştırılması (ZA)

Kat Sayısı	T_{pA}	$1,4 \times T_{pA}$	Rayleigh (sn)		Bina Ağırlığı $W=g+nq$ (kN)		Periyot (sn)		Taban Kesme Kuvveti (kN)	
			Etabs	Sap2000	Etabs	Sap2000	Etabs	Sap2000	Etabs	Sap2000
2	0,383	0,537	0,332	0,328	13631,87	13974,76	0,332	0,328	2649,15	2737,93
3	0,520	0,727	0,518	0,512	20577,74	20881,13	0,518	0,512	2569,17	2648,01
4	0,645	0,903	0,724	0,706	27523,60	27928,12	0,645	0,706	2769,47	2567,31
5	0,762	1,067	0,928	0,908	34469,46	34975,12	0,762	0,908	2933,89	2499,63
6	0,874	1,223	1,134	1,109	41415,32	42022,11	0,874	1,109	3074,57	2588,77
7	0,981	1,373	1,341	1,310	48361,19	49069,11	0,981	1,310	3198,23	3022,90
8	1,084	1,518	1,549	1,513	55307,05	56116,10	1,084	1,513	3406,03	3457,03
9	1,185	1,658	1,759	1,716	62252,91	63163,09	1,185	1,658	3833,78	3891,16

Binaların görelî kat ötelemelerden maksimum olan değerler Tablo 7’de verilmiş ve Şekil 11’de ise grafik halinde gösterilmiştir. Elde edilen verilere göre tüm binalarda görelî kat ötelemeleri kontrolünün TBDY-2019’da verilen sınır şartın sağlandığı görülmüştür. Farklı zemin sınıfları bakımından incelendiğinde, ZA zemin sınıfı için elde edilen görelî kat ötelemeleri, ZC zemin sınıfı için elde edilen görelî kat ötelemelerinden %49,2-92 kadar daha az olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 7. 2-9 katlı binaların ZA ve ZC zemin sınıfına göre görelî kat öteleme sonuçları

Kat Sayısı	H_N (m)	BYS	Maksimum Görelî Kat Ötelemeleri		Oran $0,016 * \kappa$
			ZA	ZC	
2	6	8	0,0023	0,0044	<0,016
3	9	7	0,0029	0,0054	<0,016
4	12	6	0,0031	0,0060	<0,016
5	15	6	0,0036	0,0063	<0,016
6	18	5	0,0047	0,0072	<0,016
7	21	5	0,0058	0,0087	<0,016
8	24	5	0,0070	0,0105	<0,016
9	27	5	0,0080	0,0121	<0,016



Şekil 11. ZA ve ZC zemin sınıflarına göre 2-9 katlı binalarda göreli kat ötelemeleri

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada İstanbul/Avcılar bölgesinde yapılması planlanan 2-9 katlı konut tipi binalar ETABS ve SAP2000 programlarında analiz edilerek yapının periyodu, taban kesme kuvveti ve göreli kat ötelemeleri bağlamında karşılaştırmalar yapılmıştır. Ayrıca bu programların TBODY-2019 yönetmeliği esas alınarak deprem yükü hesabında izledikleri işlem adımları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Deprem tasarım sınıfı (DTS1) ve iki farklı zemin sınıfı olan ZA ve ZC için yapılmış olan bu çalışmada dikkate alınan çerçeve taşıyıcı sisteme sahip binaların deprem hesabı doğrusal hesap yöntemi olan EDYY kullanılarak yapılmıştır. Yapılan numerik çalışmanın sonunda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- SAP2000 ve ETABS analiz programları, deprem hesaplarında dikkate alınacak üç farklı periyot hesap yaklaşımı olduğunu belirtmektedir. Bunlar rayleigh periyodu (T_p), ampirik periyot (T_{pA}) ve kullanıcı tanımlı periyot değeridir. Program dilinde rayleigh periyodu “program calculated”, ampirik periyot “aproximate” ve kullanıcı tanımlı periyot ise “user defined” ifadelerine karşılık gelmektedir. Tasarımcı TBODY-2019’a uygun deprem hesabı yapabilmesi için SAP2000 ve ETABS programlarının üç farklı periyot hesap yaklaşımını doğru bilmesi gerekmektedir. Aksi durumda deprem hesaplarında dikkate alınan periyot ve taban kesme kuvvetleri büyük ölçüde değişmektedir.
- TBODY-2019 yönetmeliği, bina için hesaplanan rayleigh (T_p) periyodunun T_{pA} değerinin 1,4 katından daha büyük olamayacağını söylemektedir. Yapılan analizler sonunda, SAP2000 programı “program calculated” seçeneği seçili iken TBODY-2019 yönetmeliğinde yer alan bu sınır şartı dikkate alarak hesapladığı T_p periyodu ile $1,4T_{pA}$ arasında kıyas yaparak küçük olan periyot değerini deprem hesabında dikkate almaktadır. ETABS programı ise “program calculated” seçeneği seçili iken hesapladığı T_p periyodu ile T_{pA} arasında kıyas yaparak küçük olan periyot değerini deprem hesabında dikkate almaktadır.
- SAP2000 programı $1,4 T_{pA}$ sınır şartını dikkate almasına karşın ETABS programının bu sınır şartı dikkate almamasından dolayı “program calculated” seçiliyken 2 ve 3 katlı binalarda ETABS’da dikkate alınan periyot SAP2000’de dikkate alınan periyottan %1,2-1,6 kadar fazla sonuç vermektedir. 4-9 katlı binalarda ise ETABS’da dikkate alınan periyot, SAP2000’de dikkate alınan periyot değerinden %9,5-40 kadar düşük sonuç vermiştir.
- $1,4 T_{pA}$ sınır şartının dikkate alınıp alınmamasına bağlı olarak değişen periyot değerlerinden dolayı 2 ve 3 katlı binalarda ETABS’dan elde edilen taban kesme kuvveti, SAP2000’den elde edilen taban kesme kuvveti değerinden %3-3,1 kadar daha az olduğu görülmüştür. 4, 5 ve 6 katlı binalarda ise ETABS’dan elde edilen taban kesme kuvveti, SAP2000’den elde edilen taban kesme kuvveti değerinden %7,9-18,8 kadar daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Son olarak 7,8 ve 9 katlı binalarda ise SAP2000 ve ETABS programları, hesapta TBODY-2019’da da verilen minimum taban kesme kuvvetini dikkate almaktadır.
- Çalışmada “program calculated” seçeneği seçiliyken yapılan analiz sonunda elde edilen verilere göre farklı kat yüksekliğine sahip olan binalarda sadece 9 katlı bina modeli için rayleigh(T_p) periyodunun $1,4T_{pA}$ değerinden daha yüksek sonuç verdiği ve SAP2000 programının $1,4T_{pA}$ değerini dikkate aldığı görülmüştür. Diğer tüm bina modellerinde ise T_p periyodu deprem hesabında dikkate alınmıştır. Tasarımcı, TBODY-2019’da verilen şartları sağlaması durumunda ampirik formülü kullanmak isterse “aproximate” seçeneğini seçebilmektedir. SAP2000 programı, “aproximate” periyot yaklaşımı ile arka planda DTS ve BYS sınır şartlarını dikkate almayıp periyot seçimini tasarımcının tercihine bırakmıştır.
- SAP2000 programında yapılan analiz sonuçlarına göre $H_N=6$ ve $H_N=9$ (BYS-8 ve BYS-7) olan binalarda T_{pA} periyot değeri, $H_N=12$, $H_N=15$ (BYS-6) ve $H_N=18$, $H_N=21$, $H_N=24$, $H_N=27$ (BYS-5) olan binalarda ise T_p periyot değeri daha

yüksek gelmiştir. Bu periyot değerlerine bağlı olarak $H_N=6$ ve $H_N=9$ (BYS-8 ve BYS-7) olan binalarda T_{pA} 'dan $H_N=12$, $H_N=15$ (BYS-6) olan binalarda ise T_p 'den elde edilen taban kesme kuvveti daha düşük sonuç vermiştir. Son olarak $H_N=18$, $H_N=21$, $H_N=24$ ve $H_N=27$ (BYS-5) olan binalarda T_p 'den elde edilen taban kesme kuvveti minimum taban kesme kuvvetinden daha düşük olduğundan hesapta minimum taban kesme kuvveti dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda Aksoylu ve Arslan'ın (Aksoylu & Arslan, 2019b) 2019 yılında yaptıkları çalışmaya paralel olarak TBDY-2019'da yer alan ampirik formül önerisinin BYS-7 ve BYS-8 için yeniden değerlendirmesi gerektiği ve BYS-5 ve BYS-6 için ise kabul edilebilir olduğu tespit edilmiştir.

- ZA ve ZC zemin sınıflarına sahip bina modelleri için SAP2000 programında “program calculated” seçiliyken elde edilen taban kesme kuvvetleri incelenmiştir. Elde edilen verilere göre ZA zemin sınıfı olması durumunda 5-9 katlı (15-27m) binalar için ZC zemin sınıfı olması durumunda ise 4-9 katlı (12-27m) binalar için T_p periyot değerleri yüksek çıktığından dolayı hesap edilen taban kesme kuvvetleri azalmaktadır. Azalan taban kesme kuvvetleri SAP2000'de tanımlı olan taban kesme kuvvetinden daha düşük olduğundan hesapta minimum taban kesme kuvveti dikkate alınmaktadır.
- Ele alınan bina modellerinde, ZC zemin sınıfı kullanılması durumunda elde edilen taban kesme kuvveti, ZA zemin sınıfı kullanılması durumunda elde edilen taban kesme kuvvetinden %50-80 daha fazla sonuç vermiştir. Bu durum zemin sınıfının yapıya gelen deprem kuvveti bakımından önemli ölçüde etkili olduğunu göstermektedir.
- Binaların görelî kat ötelemeleri, ZA ve ZC zemin sınıfları için kontrol edilmiştir. Tüm binalarda her iki zemin sınıfı için görelî kat ötelemeleri yeterli seviyede olduğu tespit edilmiştir. Farklı zemin sınıfları bakımından incelendiğinde, ZA zemin sınıfı olması durumunda elde edilen görelî kat ötelemeleri, ZC zemin sınıfı olması durumunda elde edilen görelî kat ötelemelerinden %49,2-92 kadar daha az sonuç vermiştir.

Bu çalışmada farklı yüksekliğe sahip düzenli çerçeve tipi konut yapısı için analizler ZA ve ZC türü zeminler için yapılmıştır. Binalarda perde taşıyıcı eleman kullanılması ve konut dışında yapı kullanım amacının olması durumunda elde edilen sonuçların değişebileceği gibi ileriki çalışmalarda özellikle ZD ve ZE gibi oldukça zayıf zemin sınıfları ve farklı deprem tasarım sınıfları için de analizlerin yapılması faydalı olacaktır.

Kaynaklar

- ABYYHY, (1998). Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- Aksoylu, C., & Sezer, R. (2018). Investigation of precast new diagonal concrete panels in strengthened the infilled reinforced concrete frames. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(1), 236-246.
- Aksoylu, C., & Arslan, M. H. (2019a). Çerçeve türü betonarme binaların periyod hesaplarının farklı ampirik bağıntılara göre irdelenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 569-581.
- Aksoylu, C., & Arslan, M. H. (2019b). Çerçeve+ Perde Türü Betonarme Binaların Periyod Hesaplarının TBDY-2019 Yönetmeliğine Göre Ampirik Olarak Değerlendirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(3), 365-382. doi:10.17482/uumfd.603437
- Aksoylu, C., & Kara, N. (2020). Strengthening of RC frames by using high strength diagonal precast panels. *Journal of Building Engineering*, 31, 101338.
- Aksoylu, C., & Arslan, M. H. (2021). 2007 ve 2019 Deprem Yönetmeliklerinde Betonarme Binalar İçin Yer Alan Farklı Deprem Kuvveti Hesaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması Olarak İrdelenmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 13(2), 359-374. doi:10.29137/umagd.844186
- Aksoylu, C. (2021). Experimental analysis of shear deficient reinforced concrete beams strengthened by glass fiber strip composites and mechanical stitches. *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 40(2), 267-285.
- Aksoylu, C., Özkılıç, Y. O., Yazman, Ş., Gemi, L., & Arslan, M.H, (2021). İnceltilmiş Uçlu Önüretimli Aşık Kirişlerinin Yük Taşıma Kapasitelerinin Deneysel ve Numerik Olarak İrdelenmesi ve Çözüm Önerileri. *Teknik Dergi*, 32(3).
- Aksoylu, C., Mobark, A., Arslan M.H. & Hakkı Erkan, İ. (2020). A comparative study on ASCE 7-16, TBEC-2018 and TEC-2007 for reinforced concrete buildings. *Revista de la Construcción*, 19(2), 282-305.
- Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y. O., Gemi, L., & Arslan, M. H. (2020). Experimental analysis of reinforced concrete shear deficient beams with circular web openings strengthened by CFRP composite. *Composite Structures*, 249, 112561.
- Aninthaneni, P. K., & Dhakal, R. P. (2016). Prediction of fundamental period of regular frame buildings. *Bulletin of the new zealand society for earthquake engineering*, 49(2), 175-189.

- Arslan, M., & Korkmaz, H. H. (2007). What is to be learned from damage and failure of reinforced concrete structures during recent earthquakes in Turkey? *Engineering Failure Analysis*, 14(1), 1-22.
- Arslan, M. H., Yazman, Ş., Hamad, A. A., Aksoylu, C., Özkılıç, Y. O., & Gemi, L. (2022, May). Shear strengthening of reinforced concrete T-beams with anchored and non-anchored CFRP fabrics. In *Structures* (Vol. 39, pp. 527-542). Elsevier.
- ASCE7-16 (2017). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures Seismic Design Requirements for Building Structures Structural Engineering Institute.
- Avcil, F., Işık, E., Bilgin, H., & Özmen, H. B. (2022). Tbdy-2018'de verilen tasarım spektrumlarının anıtsal yığma yapı sismik davranışına etkisi.
- Bilgin, H., Shkodrani, N., Hysenlliu, M., Ozmen, H. B., Isik, E., & Harirchian, E. (2022). Damage and performance evaluation of masonry buildings constructed in 1970s during the 2019 Albania earthquakes. *Engineering Failure Analysis*, 131, 105824.
- Börekcı, M. (2019). Dolgu duvarlı betonarme binaların hakim periyodunun doğrudan formüller ile elde edilmesi. *Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2), 161-178.
- Cansız, S. (2022). Türkiye'de Kullanılan Deprem Yönetmeliklerinin Özellikleri ve Deprem Hesabının Değişimi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 14(1), 58-71. doi:10.29137/umagd.948025
- Chopra, A. K., & Goel, R. K. (2000). Evaluation of NSP to estimate seismic deformation: SDF systems. *Journal of Structural Engineering*, 126(4), 482-490.
- Çolak, H., Türker, H., & Coşkun, H. (2019). Az Katlı Düzenli Çerçeve Yapıların Periyot Hesabı İçin Bir Yaklaşım Önerisi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(1), 117-125.
- Ditommaso, R., Vona, M., Gallipoli, M., & Mucciarelli, M. (2013). Evaluation and considerations about fundamental periods of damaged reinforced concrete buildings. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 13(7), 1903-1912. doi:10.5194/nhess-13-1903-2013
- EC8, (2004). Design of structures for earthquake resistance - Part 1 : General rules, seismic actions and rules for buildings.
- ETABS Version 18.1.1, Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, 2020.
- Hatzigeorgiou, G. D., & Kanapitsas, G. (2013). Evaluation of fundamental period of low-rise and mid-rise reinforced concrete buildings. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 42(11), 1599-1616. doi:10.1002/eqe.2289
- Hsiao, J. K. (2009). Computation of fundamental periods for moment frames using a hand-calculated approach. *Electronic journal of structural engineering*, 9, 16-28.
- Indian-Code, (2002). Criteria for Earthquake Resistant Design of Structures. Design of Structures, Indian.
- Işık, E. (2022). Comparative investigation of seismic and structural parameters of earthquakes ($M \geq 6$) after 1900 in Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(10), 1-21.
- Kaltakçı M.Y., Arslan M.H., Yılmaz U.S., Arslan H.D., A new approach on the strengthening of primary school buildings in Turkey: An application of external shear wall, *Building and Environment*, 43, 6, 2008, 983-990, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.02.009>.
- KBC-2016, (2016). Architectural Institute of Korea. AIK Korean Building Code.
- Leissa, A. W. (2005). The historical bases of the Rayleigh and Ritz methods. *Journal of Sound Vibration*, 287(4-5), 961-978.
- Mirrashid, M., & Naderpour, H. (2022). Computational intelligence-based models for estimating the fundamental period of infilled reinforced concrete frames. *Journal of Building Engineering*, 46, 103456. doi:doi.org/10.1016/j.job.2021.103456
- NTC-2018, (2018). Seismic Reliability of Code-Conforming Italian Buildings.
- Özkat, S. ve Kuruşcu, A.O. (2019) Deprem Bölgelerinde yapılacak Yığma Yapıların Tasarımı Hakkında 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Karşılaştırılması, 4. *Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi*, Yalova. 117-129.
- Özmen, A., & Sayın, E. (2021). Deprem Etkisinde Çok Katlı Betonarme Bir Binanın TDY-2007 ve TBDY-2018 Deprem Yönetmeliklerine Göre Eşdeğer Deprem Yüklerinin Karşılaştırılması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(2), 124-133.

Öztürk, M. (2018). 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Ve Türkiye Deprem Tehlike Haritası İle İlgili İç Anadolu Bölgesi Bazında Bir Değerlendirme. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 17(2), 31-42.

Özkılıç, Y. O., Yazman, Ş., Aksoylu, C., Arslan, M. H., & Gemi, L. (2021). Numerical investigation of the parameters influencing the behavior of dapped end prefabricated concrete purlins with and without CFRP strengthening. *Construction and Building Materials*, 275, 122173.

Salama, M. I. (2015). Estimation of period of vibration for concrete moment-resisting frame buildings. *HBRC Journal*, 11(1), 16-21.

Sangamnerkar, P., & Dubey, S. (2017). Equations to evaluate fundamental period of vibration of buildings in seismic analysis. *Structural Monitoring Maintenance*, 4(4), 351-364.

SAP2000 v23, Integrated Finite Elements Analysis and Design of Structures. Computers and Structures, Inc, Berkeley, CA, 2021.

Shendkar, M. R., Kontoni, D. P. N., Işık, E., Mandal, S., Maiti, P. R., & Harirchian, E. (2022). Influence of Masonry Infill on Seismic Design Factors of Reinforced-Concrete Buildings. *Shock and Vibration*, 2022.

TBDY-2019, (2019). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar. <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2-1.pdf>. (Erişim Tarihi: 09.03.2022). In.

TCVN-9386, (2012). Design of Structures for Earthquake Resistances. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings.

TS-498, (1997). Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TDY-2007, (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. TC Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, Ankara. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/03/20070306-3-1.pdf>. (Erişim Tarihi: 09.03.2022).



Görüntü İşleme İle Çikolata Konumlarının Tespit Edilip Endüstriyel Robot İle Toplanması

Detecting Chocolate Positions By Image Processing And Collecting With Industrial Robot

Ali Osman Biler¹ , Bahar Akbal¹ 

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya

Başvuru/Received: 20/06/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Endüstri 4.0 ile üretimde makineleşmenin önemi arttı. Bunun üzerine bir de pandemi dönemi gelince makineleşme kaçınılmaz bir hale geldi. Konu üretim hattındaki insan gücünü en aza indirmek olunca robotların önemi arttı. İnsan üretimin kontrolünü sağlarken robotlar üretim hattında fiziksel performans gerektiren işleri görev edinmektedir. Bu şekilde olan hatların ilk yatırım maliyeti oldukça yüksek olsa da parça başına üretim maliyeti düşük çıkmaktadır. Parça başına üretim maliyeti düşen bir üretim hattının yatırım maliyeti kısa süre içerisinde kendini amorti etmektedir. Bu çalışmada; paketlenmeye hazır çikolataların bulunduğu konveyörün üzerine konumlandırılan kameradan alınan görüntüye göre konveyör üzerindeki çikolataların konumu tespit edilmiş ve alınan tüm konumlar PLC'ye gönderilmiştir. PLC, HMI panel üzerinden konumları robota göndermiştir. Robot doğrusal regresyon yöntemiyle elde edilen formüle göre konum bilgilerini kendi koordinat sistemine dönüştürüp ürünlerin konumunu tespit etmiştir. Konumu tespit edilen çikolatalar konveyör üzerinden alınıp kalıbın ilgili hücrelerine bırakılmıştır. Kurulan bu sistem ile 24 saat çalışabilecek bir üretim hattı kurulmuş olmaktadır. Dünya genelinde yaşanan covid 19 salgınından dolayı birçok firma insan gücü eksikliğinden dolayı üretimine ara vermek zorunda kalmıştır. Bu dönemde makineleşmiş ve robotlarla donatılmış üretim hatlarının birçok üretimine devam etmiştir. Yatırım maliyeti bu gibi dönemlerde çok daha hızlı bir şekilde tekrar kazanılmış olmaktadır.

Anahtar Kelimeler

“Endüstriyel Robot, Görüntü İşleme, HMI, PLC, Python, RT Toolbox”

Abstract

With Industry 4.0, the importance of mechanization in production has increased. After that, when the pandemic period came, mechanization became inevitable. The importance of robots has increased when it comes to minimizing human power on the production line. Robots take on tasks that require physical performance on the production line, while humans control production. Although the initial investment cost of the lines in this way is quite high, the production cost per piece is low. The investment cost of a production line that reduces the cost of production per piece pays off in a short time. In this study,; according to the image taken from the camera placed on the conveyor where the chocolates are ready to be packed, the location of the chocolates on the conveyor has been determined and all the locations received have been sent to PLC. The PLC sent the locations to the robot via the HMI panel. According to the formula obtained by the robot linear regression method, it converted the location information into its own coordinate system and determined the position of the products. The chocolates, the location of which was determined, were taken from the conveyor and left in the corresponding cell of the mold. With this system, a production line that can work 24 hours a day has been established. Due to the COVID-19 pandemic worldwide, many companies have been forced to Decelerate their production due to lack of manpower. During this period, many of the production lines equipped with mechanized and robots continued to be produced. The cost of investment is recovered much faster during such periods.

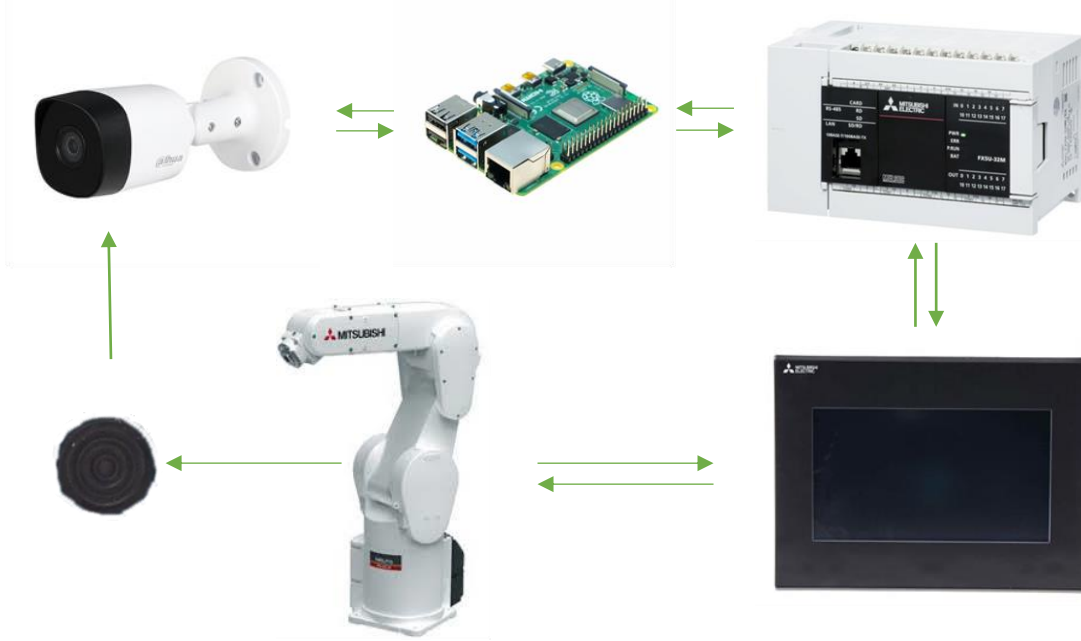
Key Words

“Industrial Robot, Image Processing, HMI, PLC, Python, RT Toolbox”

1. Giriş

Endüstri 4.0 ile robotik sistemlerin hayatımızdaki önemi her geçen daha da artmaktadır. Dolayısıyla üretim hatları üzerindeki insan etkisi de azaltmaya devam etmektedir. Konu insana bağlı üretimi azaltmak olunca robot, kamera ve otomasyon sistemlerinin kullanımı kaçınılmaz bir hal almaktadır. Bu çalışmanın temelinde de insan gücüne dayalı üretimi azaltmak yatmaktadır.

Çikolata üretim hattının son kısmı olan paketleme bölümüne yapılan bu çalışmada konveyör üzerinden farklı konumlardan gelebilen siyah ve beyaz çikolataların kalıba dizilimi vardır. Çikolata fabrikalarında bu kalıplama işlemleri için genelde elemanlar paketlenmeye hazır olan çikolataların bulunduğu konveyör bandın kenarlarında durarak topladıkları çikolataları tek tek kalıplara yerleştirmektedir. Yapılan bu çalışma sayesinde çikolataların toplanıp kalıplanması için insan gücüne olan ihtiyaç azalmıştır. Çalışmanın temelinde; nihai ürünün insan ile temasının en aza indirilmesi, üretim sırasında insan gücü düşürüldüğü için eleman maliyetinin düşürülmesi ve yapılan iş salgın gibi durumlardan etkilenmeden devam etmesi amaçlanmıştır. Şekil 1.1'de geliştirilen sistemin blok diyagramı görülmektedir.



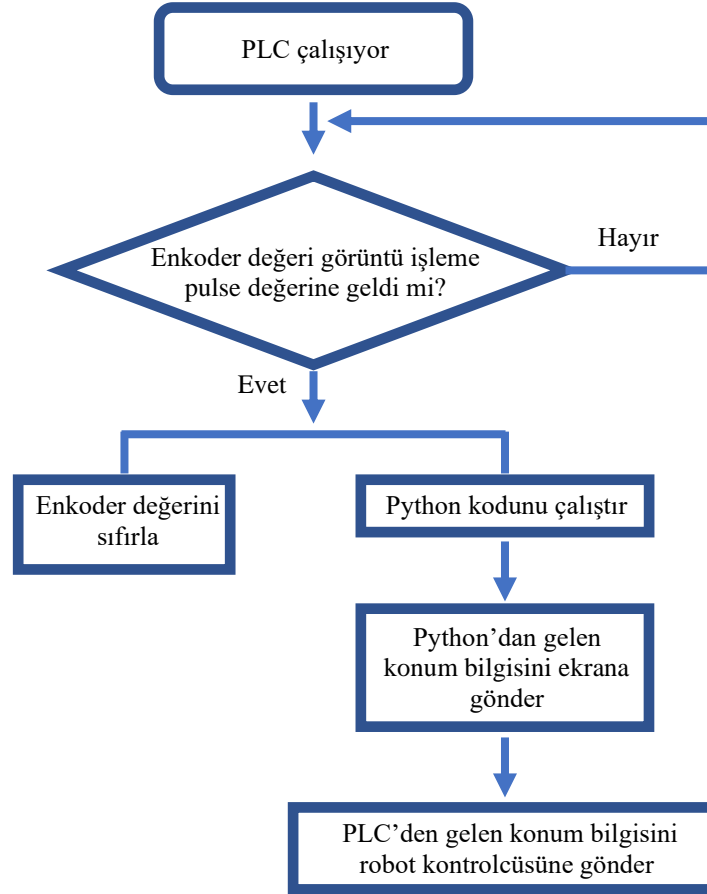
Şekil 1.1. Geliştirilen sistemin blok diyagramı

Literatürde robot kolu ve görüntü işleme ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Arenas ve ark. 2018 yılında yaptıkları çalışmada el hareketleri ile robotik kol kontrolü gerçekleştirmişlerdir. Kameradan alınan görüntüler bir derin öğrenme yapısı ile sınıflandırılarak robota komut gönderilmiştir. Robot gelen komuta göre aşağı, yukarı, sağa veya sola vb. hareketler yapmıştır. Çalışmada derin öğrenme ile komut sınıflandırması %84,5 başarı ile gerçekleştirilmiştir (Arenas, 2018). Garad 2017 yılında yaptığı çalışmada kamera altına bırakılan ve farklı çiziksel formlara sahip nesnelerin görüntülerini kameradan alıp bu görüntüleri MATLAB ile işlemiştir. Görüntü işleme işleminin sonucunda kamera altındaki nesnelere şekline göre ayrılmış olur (Garad, 2017). Zheng ve ark. 2018 yılında yaptıkları çalışmada otomobil parçalarının kaynağı sırasında kaynak başarısını arttırmak için kaynak alanlarını görüntü işleme kullanarak yüksek hassasiyet ile tespit etmişlerdir. Sistemi Çin'de bulunan bir otomobil fabrikasındaki kaynak robotuna entegre etmişlerdir (Zheng, 2018). Yıldız ve ark. 2021 yılında yaptıkları çalışmada bir çikolata üretim hattının çıkışından yani paketlenmiş çikolataların çıktığı hattan ambalajı bozuk ürünleri tespit edip bu ürünleri robot kol ile toplamışlardır. Tespit ettikleri ürünlerin konumlarını Python içerisinde depolamışlardır. Konumları panelin data transfer fonksiyonunu kullanarak robot kontrolcüsüne göndermişlerdir. (Yıldız, 2021). Barstugan ve ark. 2020 yılında Hürsan Pres firmasında yaptıkları çalışmada 5 farklı kaynakçıdan aldıkları 2250 resim ile yapılan kaynakları 3 sınıfta (iyi kaynak, gözenekli kaynak ve süreksizlik) sınıflandırmıştır. Bu sınıflandırmayı 2 aşamada yapmışlar. İlk aşamada kaynak bölgesini tespit etmişler. İkinci aşamada yapay sinir ağı ile kaynak bölgesinin öz niteliklerini sınıflandırmıştır. Sistemi eğitmek için 1500 resim alınmıştır. %94,03 eğitim performansını elde edilirken %94,19 doğrulama performansı elde edilmiştir. Sistemin testi için 750 resim kullanılmıştır. Sistemin test performansını %94,31 olarak elde etmişler (Barstugan, 2020). Savran 2018 yılında yaptığı çalışmada gaz kaçak testi için görüntü tabanlı pozisyonlanmalı ABB IRB 140 robot uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma içerisinde 6 eksenli ABB IRB 140 robot kullanılmış, bakır boru üzerindeki kaynak noktalarının bulunması için görüntü işleme algoritması oluşturulmuş, kamera ile robot arasında koordinat dönüşümü yapılmış ve uygulanmanın başarısının gösterilmesi için gerçek zamanlı uygulamalarda pozisyon sapmaları incelenmiştir. Görüntü işleme tarafında dijital görüntü işleme algoritma yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler ise eşik, morfolojik işlemler ve renk düzlemi çıkarma yöntemleridir. Eşik yönteminde gri tonlamalı görüntüden kaynak görüntüdeki her pikselin iki veya daha fazla sınıfını renkli görüntülerde atama işlemi olan segmentasyon yapılır. Bu yöntem görüntü işleme amaçlanan görüntünün sınırlayarak en az bir renk veya gri skala değeri kullanarak bölmektir. Morfolojik işlemler lineer olmayan komşuluk işlemlerinde etkili bir görüntü işleme yöntemidir. Morfolojik işlemlerde

genişletme, aşındırma, açma ve kapama işlemleri kullanılmaktadır. Genişletme işleminde objelerin boyutu büyütülmektedir, aşındırma işleminde ise objelerin boyutu daraltılmaktadır. Açma işleminde birbirine yakın nesnelere değişim uygulanmadan ayrılır, kapa işleminde ise birbirine yakın nesnelere bağlanmaktadır. Renk düzlemi çıkarma yöntemi ile görüntüdeki renk bilgisi elde edilmektedir. Görüntü işleme yönteminde elde edilen pozisyonlar resim koordinat sisteminde yer almaktadır. Ancak robot olarak kullanılan ABB IRB 140 programında pozisyonlar dünya koordinat sisteminde tanımlanmaktadır. Bu nedenle lineer denklemler ile koordinat dönüşümü yapılmıştır. Sonrasında koordinat dönüşümü için kamera kalibrasyonu grid parçalı düzlemde yapılmıştır ve parametreler bulunmuştur. Bu parametreler algoritmada derinlik değişimine bağlı olarak güncellenmiştir (Savran, 2018). İnan 2013 yılında yaptığı çalışmada ürettiği iki eksenli ve eksen kontrollerini servo motor ile yaptığı robot kol üzerine kamera konumlandırmıştır. Kameradan aldığı görüntüyü işleyerek görüntü içindeki hedefin merkezi kameradan alınan görüntünün merkezine gelecek şekilde robot düzeneğini kontrol etmiştir. Görüntü işleme alanında ise iki boyutlu çapraz korelasyon yöntemi hedef tanıma yöntemi olarak seçilmiş ve görüntü işleme algoritması MATLAB programında yapılmıştır. (İnan, 2013). Andhare ve Rawat 2016 yılında yaptıkları çalışmada nesnenin x, y koordinatını bulma hakkında bir fikir verir. 2D dönüşüm yardımıyla piksel koordinatını gerçek dünya koordinatına dönüştürerek bulunur. Temelde çalışmanın görme sensörünün altına yerleştirilen nesnelere seçilmesi ve yerleştirilmesidir (Andhare, 2016). Koparde ve ark. 2020 yılında yaptıkları çalışmada görüntü işleme işlemini Python'da Open CV kütüphanesini kullanarak yapmışlar. Tüm işlemler Raspberry Pi 4B üzerinden yapılmış konumu tespit edilen nesneye PCA 9685 sürücülerin bağlı olduğu servo motorlar yardımıyla erişilmiştir (Koparde, 2020).

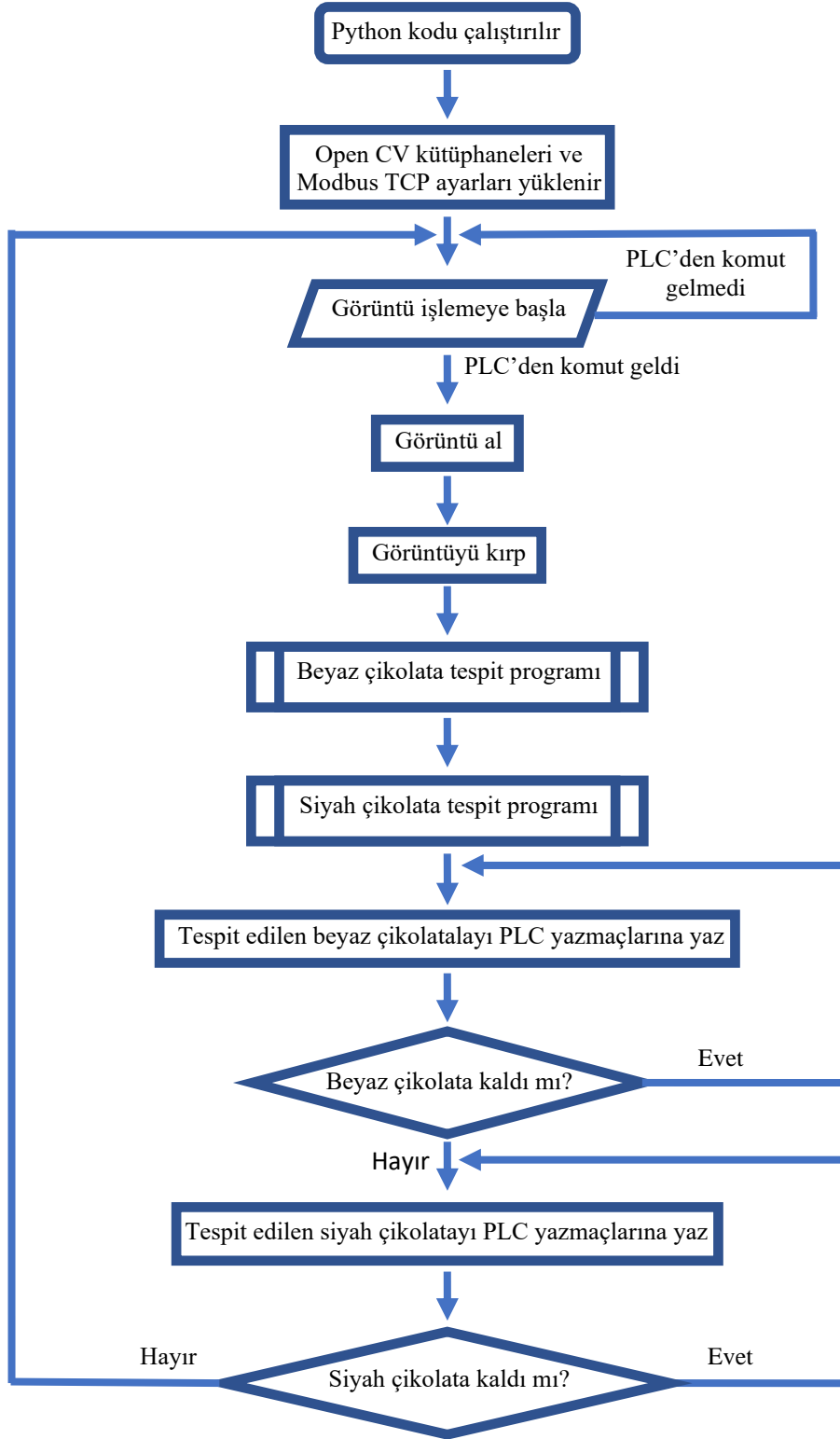
2. Materyal Yöntem

Çikolataların bulunduğu konveyöre montajı yapılan enkoder sayesinde konveyör konumu tespit edilmiş. Bu konveyör, kameradan alınan bir görüntü boyu ilerlediğinde kameradan görüntü alınmıştır. Bu kontrol mekanizması PLC içerisinde kurulmuştur. Python kodu görüntü işleyip konum elde etmesiyle alınan konum bilgileri PLC üzerinden robot kontrolcüsüne gönderilmek üzere HMI panele gönderilmiştir. HMI panel aldığı konum bilgilerini belirli zaman periyotlarında robota göndermiştir. Şekil 2.1'de PLC ve HMI panelin akış diyagramı görülmektedir.



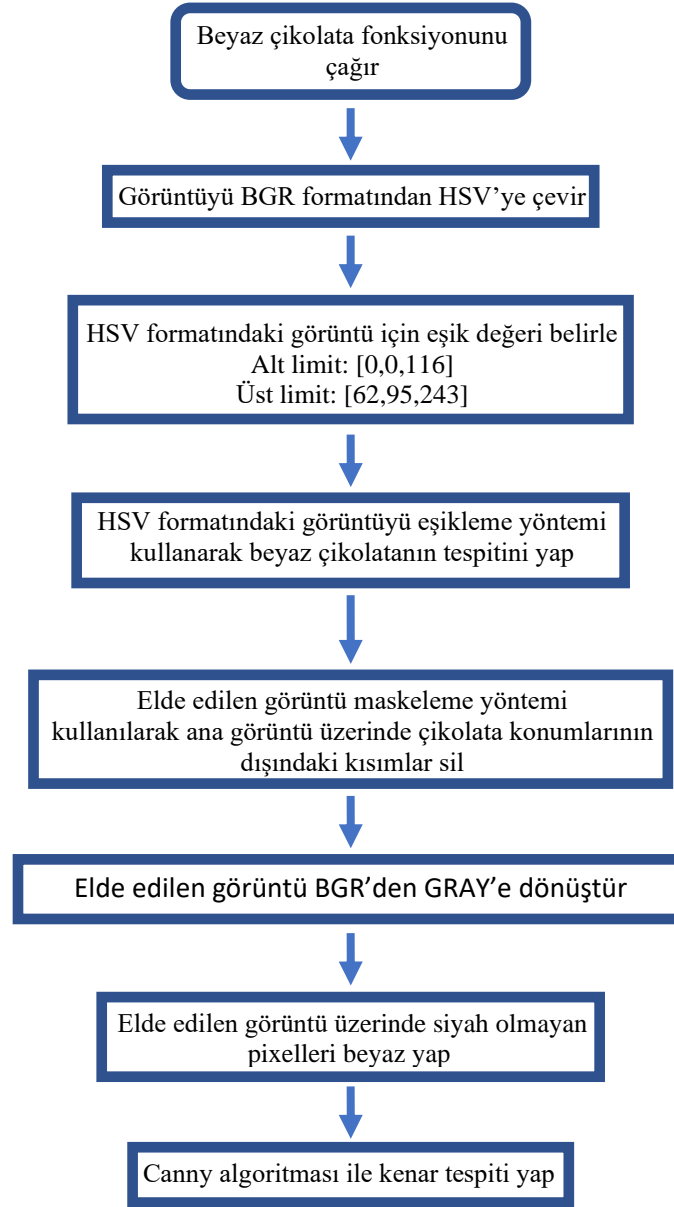
Şekil 2.1. PLC ve HMI panel akış diyagramı

Ürünlerin bulunduğu konveyöre montajı yapılan, bir turunda 1000 pulse veren, enkoder sayesinde ürün konveyörünün ilerleme miktarı tespit edildi. Ürün konveyörü 1 görüntü boyu ilerlediğinde Python koduna görüntü işle komutu verildi. Bu komut verilirken aynı zamanda bir sonraki görüntüyü çekebilmek için enkoder değeri sıfırlanır. Python görüntü işlemeyi tamamlayınca tespit ettiği ürünlerin konumlarını PLC'ye HMI panele göndermesi için gönderir. Konumlar HMI panel üzerinden robota gönderilir. Şekil 2.2'de Python kodunun akış diyagramı görülmektedir.



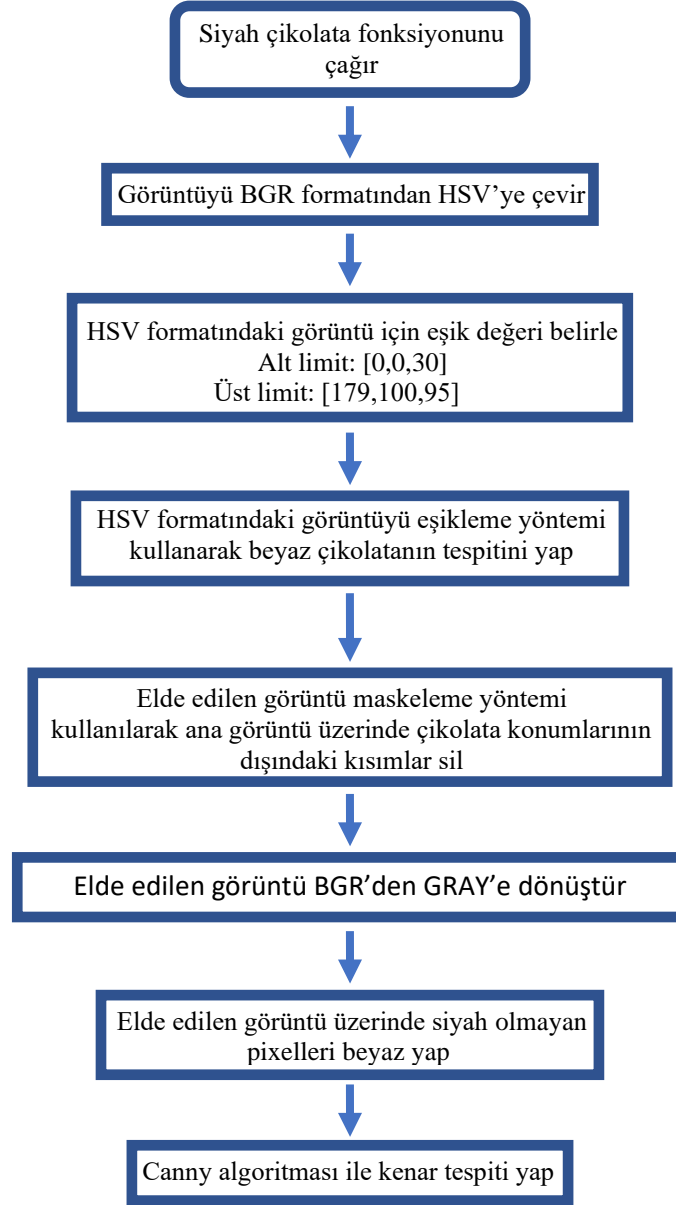
Şekil 2.2. Python programı akış diyagramı

Görüntü işlemeye başla komutu ile birlikte kamerada görüntü alınır. Alınan görüntüden çikolatanın gelmediği kısımlar kesilir. Sadece çikolata bulunabilecek kısımlar bulunan görsel; beyaz çikolata tespit programı ve siyah çikolata tespit programına gönderilir. Bu program parçalarından siyah ve beyaz çikolataların konumları tespit edilir. Tespit edilen çikolataların her birine ID numarası verilerek ID numarasına göre PLC yazmacına yazılır. Şekil 2.2’de görülen Python programı akış diyagramında bulunan “Beyaz çikolata tespit programı” isimli program parçasının akış diyagramı Şekil 2.3’de görülmektedir.



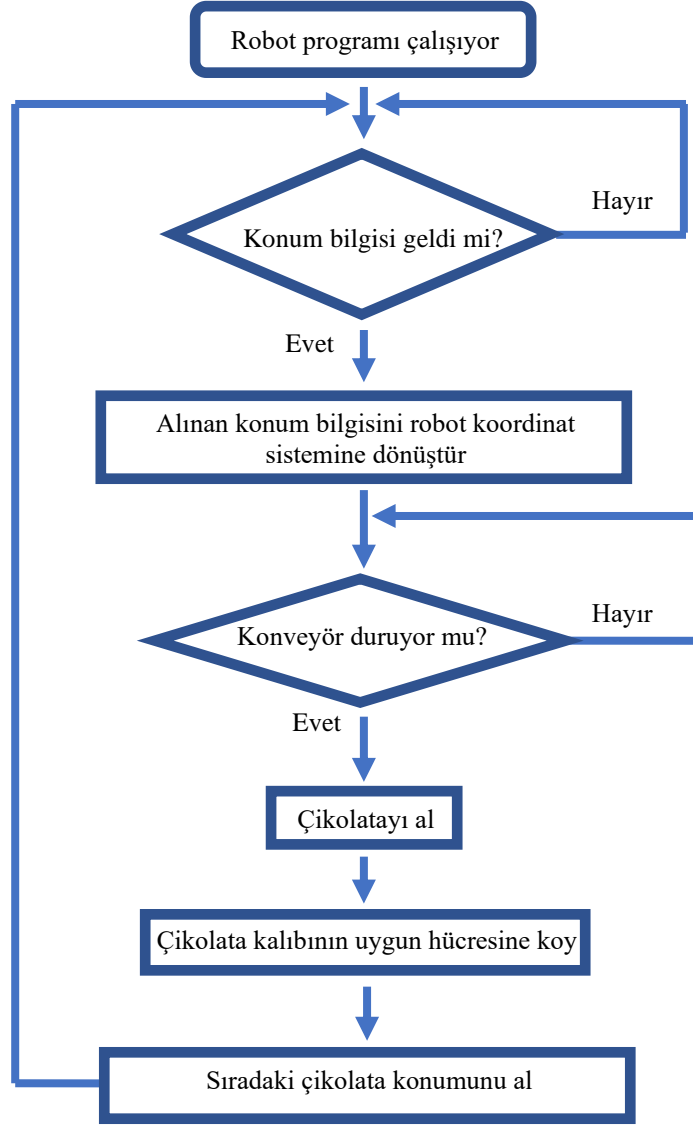
Şekil 2.3. Python programı beyaz çikolata tespit fonksiyonu akış diyagramı

Öncelikle gelen görsel BGR formatından HSV formatına çevrilir. HSV formatındaki görselde eşikleme yöntemi kullanılarak alt limit ve üst limit değerlerine göre beyaz çikolatalar görsel üzerinde tespit edilir. Elde edilen yeni görsel maskeleye yöntemi kullanılarak ana görsel üzerindeki çikolatalar tespit edilir. Elde edilen son görsel BGR’den Gray formata dönüştürülür. Gray formatındaki görselin beyaz çikolata bulunmayan kısımları siyah renktedir. Bu görselin siyah olmayan kısımları beyaza çevrilir. Ardından Canny algoritması kullanılarak kenar tespiti yapıp beyaz çikolatalar tespit edilmiş olur. Şekil 2.2’de görülen Python programı akış diyagramında bulunan “Siyah çikolata tespit programı” isimli program parçasının akış diyagramı Şekil 2.4’de görülmektedir.



Şekil 2.4. Python programı siyah çikolata tespit fonksiyonu blok diyagramı

Öncelikle gelen görsel BGR formatından HSV formatına çevrilir. HSV formatındaki görselde eşikleme yöntemi kullanılarak alt limit ve üst limit değerlerine göre siyah çikolatalar görsel üzerinde tespit edilir. Elde edilen yeni görsel maskeleme yöntemi kullanılarak ana görsel üzerindeki çikolatalar tespit edilir. Elde edilen son görsel BGR'den Gray formata dönüştürülür. Gray formatındaki görselin siyah çikolata bulunmayan kısımları siyah renktedir. Çikolatalar tam siyah olmadığı için renk tonları farklıdır. Bu görselin siyah olmayan kısımları beyaza çevrilir. Ardından Canny algoritması kullanılarak kenar tespiti yapıp siyah çikolatalar tespit edilmiş olur. Python'dan konum bilgilerinin robot kontrolcüsüne gelmesi ile birlikte robot algoritması başlamaktadır. Robot programının akış diyagramı Şekil 2.5'de görülmektedir.



Şekil 2.5. Robot programı akış diyagramı

Robota konum bilgisi gelince yani robot registerlarında 0'dan farklı bir değer bulunduğunda alınan pixel değerleri robotun koordinat sistemine dönüştürülür. Bu işlem doğrusal regresyon yönteminden elde edilen formül sayesinde yapılır. Konumu tespit edilen ürünleri almak için konveyörün durması beklenir. Eğer konveyör duruyorsa çikolata tespit edilen konumdan alınıp kalıbın ilgili hücreesine konulur.

3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu projede kamera ile tespit edilen çikolatalar endüstriyel robot ile alınıp kalıplandı. Kameradan alınan görüntü Raspbery Pi 4'de Python kodunda işlendi. Çikolata konumları elde edildi. Daha önce yapılmış olan uygulamalarda toplanabilecek olan çikolataların konum bilgisi Python üzerinde depo edilip robota sadece toplanabilecek olan 1 adet çikolatanın konumu gönderilmiştir. Konum bilgileri ekran üzerinden gitmektedir. Ekranın data transfer periyodu tanımlanan yazmacın on off periyoduna göre değişiklik göstermektedir. Haberleşmenin data transfer süresinin "t" olduğunu düşünürsek bir verinin gönderilme süresi "t" kadar zaman alır. Bu uygulamada bu kaybın önüne geçmek için konum bilgileri tespit edildikten sonra direkt olarak PLC'ye gönderilmektedir. PLC yazmaçlarından bulunan konum bilgileri ekran üzerinden robota gönderilmektedir. Yani konum bilgileri hem PLC hem de robot yazmaçlarında depolanmaktadır. Robot ürüne hareket etmek istediği an Python'dan konum isterse verinin gitme "t" kadar zaman alacaktır. Her konum ID numarasına göre bir yazmaca yazılarak robotun konuma hareket etmek istediği an kendi yazmaçlarında bulunan konumu okuyacağından dolayı bu veri bekleme süresi en aza indirilmiş olur. Dakikada 60 adet ürün için konum göndermek gerekirse "60t" kadar zaman sadece haberleşme süresine harcanmış olur. Eğer "t" süresinin 100 ms olduğunu varsayarsak dakikada 6000 ms, saatte 360 saniye, günde 8640 saniye haberleşmeden kazanç olduğu anlamına gelir. Bu da yaklaşık %10 bir performans artışı anlamına gelir. Kullanılan bu yöntem ile çikolata konumları daha robot istemeden robot ve PLC yazmaçlarında depo edildiği için robot ilk çikolatayı aldıktan sonra ikinci çikolata için haberleşmeden bilgi beklemek zorunda kalmadan kendi yazmacını okuyarak zamandan tasarruf sağlamıştır.

Konveyörden görüntü almak için kullanılan enkoder sayesinde Python programı sürekli fotoğraf alıp görüntü işlettirilmemiştir. Bu da cihazın boş yere görüntü işlememesini sağlamıştır. Enkoderden alınan pulse bilgisine göre konveyör bir görüntü boyu ilerleyince görüntü işlemesi için Python'a komut verilmiştir.

Konum bilgileri doğrusal regresyon yönteminden elde edilen formülde işlenip robot koordinat sistemindeki ürün konumu tespit edilip ürünler toplanmıştır. Toplanan ürünler 3x3 çikolata kalıbında konulması gereken noktanın konumu hesaplanarak konumlandırılmıştır. Kalıbın sadece 1. satırının ve 1. sütununun konumu tanıtılmıştır. Diğer kalıp hücreleri kalıbın X ve Y eksenindeki hücreler arası uzaklık değerlerinden elde edilmiştir. Bu uygulama sayesinde çikolatalar daha hijyenik bir şekilde toplandı. Buna ek olarak da toplama işlemini robot yaptığı için 24 saat çalışma opsiyonu sunulmuş oldu. Bu da gün sonunda toplanan ürün adetini arttırdı.

Çikolata ve konum tespiti bir endüstriyel kamera yerine, bir kamera ve Raspberry Pi 4 ile yapılarak, endüstriyel bir kamera ile yapılarak maliyet ciddi anlamda düşürülmüştür.

Yapılan tüm çalışma sonuçlarından yola çıkarak aşağıdaki değerlendirmeler ve öneriler yapılabilir:

- Kameranın konumlandırıldığı bölgenin kabin ile kapatılıp ortam ışığından etkilenmesi önlenmelidir.
- Robot gripperi ürün tutma hızını arttırmak amacıyla değiştirilebilir.
- Akan bir konveyör üzerinden ürün toplayabilmek amacıyla konveyörde enkoder takibi yapılabilir.
- Görüntü işleme süresini hızlandırmak amacıyla Raspberry Pi 4 yerine daha güçlü bir donanım kullanılabilir.
- Derinlik ölçen bir kamera kullanılarak ürün yüksekliği tespit edilip ürünlerin sınıflandırılması yapılabilir.

4. Referanslar

Andhare, P. ve Rawat, S. (2016, Ağustos). Bilgisayar görüşlü endüstriyel robot kontrolörünü seçin ve yerleştirin. 2016'da Uluslararası Bilgi İşlem İletişim Kontrolü ve Otomasyonu Konferansı (ICCUBEA) (s. 1-4). IEEE.

Arenas, JOP, Moreno, RJ ve Beleño, RDH (2018). El hareketleriyle robotik bir kolun kontrolü için DAG mimarisine sahip evrişimli sinir ağı. Çağdaş Mühendislik Bilimleri , 11 (12), 547-557.

Barstugan, M., Ceran, YS, Yılmaz, M., & DüNDAR, NA (2020, Temmuz). Tek Boncuk Kaynakta Hataların Makine Öğrenimi Yöntemleriyle Tespiti. IOP Konferans Serisinde: Malzeme Bilimi ve Mühendisliği (Cilt 895, No. 1, s. 012012). GİB Yayıncılık.

Garad, PV (2017). Şekle göre nesne sıralama robotu. Int. J. of Adv. Araş., Fikirler ve Innov. Technol'de , 3 , 129-134.

İnan, T. (2013). Hareketli hedefi takip eden robot kolu sistemi (Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi (Turkey))

Koparde, S., Chavan, O., Joshi, M., & Bodke, S. (2020, Nisan). Rohanish Rover: Robotik Kol ve Görüntü İşleme. 2. Uluslararası İletişim ve Bilgi İşleme Konferansı'nda (ICCIP) .

Savran, A. İ., & Kumbasar, T. (2018, Ekim). Görüş Tabanlı Konumlandırma Gaz Kaçağı Test Otomasyon Sistemi. 2018'de 6. Uluslararası Kontrol Mühendisliği ve Bilişim Teknolojileri Konferansı (CEIT) (s. 1-6). IEEE.

Yıldıza, İ., Kayaa, A., Gedika, MA ve Barstuğana, M. (2021). Arızalı Ürünlerin Üretim Hattından Robotik Kolla Görüntü İşleme Yöntemleri ile Ayrılması. CEUR Çalıştay Bildirilerinde . CEUR-WS.

Zheng, Z., Ma, Y., Zheng, H., Gu, Y., & Lin, M. (2018). 2D monoküler görüşle yönlendirilen robotik bir kol kullanarak endüstriyel parça lokalizasyonu ve kavrama. Endüstriyel Robot: Uluslararası Bir Dergi .



Farklı Katkı Malzemeler Kullanılarak Üretilen Yüksek Performanslı Betonların Elektrik Direnç Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Experimental Investigation of Electrical Resistance Properties of High Performance Concretes Produced With Different Types of Additives

Çağatay Mehmet Belgin^{1*}

¹Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara, Türkiye

Başyuru/Received: 08/03/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Standart beton doğası gereği elektrik iletkenliği olmayan, yalıtkan olarak kabul edilebilecek kadar elektrik direnci yüksek olan bir yapı malzemesidir. Ancak betonun elektrik direncinin düşürülmesi ve elektrik iletken hale getirilmesinin farklı uygulama alanlarında çok büyük olanaklar sağlayacağı ve bu özellik değişiminin beton malzemesinin kullanıldığı farklı uygulama alanlarında önemli avantajlar sağlayabilecek bir değişim olduğu son 30 yılda bu konuda yapılan araştırmalar ile ortaya konulmuştur. Literatür incelendiğinde betonun elektrik direncinin azaltılarak elektriği iletmesinin sağlanmasının uygulama alanları arasında don çözülmesine karşı kullanılacak beton yol kaplamaları, elektromanyetik dalga yayılımını engellemek amacıyla üretilen sağır oda uygulamaları, yapısal sağlık takibi uygulamalarında kullanılacak kendi üzerindeki deformasyon değişimini elektriksel direnç değişimine göre tespit edilebilecek kendiliğinden deformasyon değişimi ifade edilebilen özel betonlar olarak sayılabilir. Bu tür uygulamaların hepsinin gerçekleştirilebilmesi için yapılması gereken temel şey betonun elektrik direnç özelliklerini değiştirerek betonun elektrik iletken bir malzeme haline getirilmesidir. Bu çalışma kapsamında betonun elektriksel direnç özelliklerinin değiştirilmesi için kullanılacak bir karışım kompozisyonunun oluşturulması ile ilgili bir çalışma yapılmıştır. Çalışma kapsamında 3 farklı katkı kullanılarak hazırlanan 250×250×30 mm boyutlarında beton plak deney elemanlarının üretilmesinden sonra elektriksel direnç özellikleri ölçülerek hangi türde karışımın ve lif katkısının betonun elektriksel direnç özelliklerini en iyi şekilde düşürdüğü ve betonun elektrik iletkenliğini artırdığı deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında test edilen üç farklı katkı malzemesi içerisinde elektriksel direnç değerini en fazla azaltan malzemenin grafit olduğu, ancak beton basınç dayanımı ile birlikte değerlendirildiğinde aktif karbon malzemesinin uygulamalarda kullanılmasının daha iyi seçenek olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Yüksek Performanslı Beton, Elektrik İleten Beton, Grafit, Çelik Lif, Aktif Karbon”

Abstract

Standard concrete is a building material that is not electrically conductive by its nature and has a high electrical resistance to be accepted as an insulator. However, in the last 30 years, researches carried out in this subject has revealed that, reducing the electrical resistance of concrete and making it electrically conductive will provide great opportunities in different application areas and that this property change is a change that can provide significant advantages in different application areas where concrete is used. In literature, the application areas of reducing the electrical resistance of the concrete and enabling it to conduct electricity include concrete road pavements used against frost and thaw, field room applications produced to prevent electromagnetic wave propagation, and self-deformation change that can be determined according to the electrical resistance change, which can be used in structural health monitoring applications can be counted as special concretes. The basic idea is to change the electrical resistance properties of the concrete and make the concrete a material that can conduct electricity in order to realize all such applications. Within the scope of this research a mixture composition that can be used to change the electrical resistivity properties of concrete was studied. Within the scope of the study, after the production of 250×250×30 mm concrete slab test elements prepared using 3 different fiber types, electrical resistance properties were measured and which type of mixture and fiber additive reduced the electrical resistance properties of the concrete in the best way and increased the electrical conductivity of the concrete was experimentally investigated. Among the three different additives tested within the scope of the study, it was concluded that the material that reduces the electrical resistance value the most is graphite, but when evaluated together with the concrete compressive strength, the use of activated carbon material in applications may be a better option.

Key Words

“High Performance Concrete, Electric Conducting Concrete, Graphite, Steel Fiber, Activated Carbon”

1. Giriş

Çevremizde gördüğümüz ve her gün kullanılan yapısal sistemler olan binalar, otoyollar, hava ve deniz limanları, altyapı sistemleri, köprüler, su arıtma tesisleri, boru hatları, kanallar, enerji üreten tesisler ve barajlar üzerlerine etki eden statik ve dinamik yüklemeler ve çevresel nedenlerden dolayı sürekli gerilme, şekil değiştirme, yer değiştirme ve hasarlara maruz kalmaktadırlar. Bu yapılarda meydana gelen yer değiştirmelerin miktarlarının veya hasarların mümkün olan en erken zamanda tespit edilmesi güvenlik açısından çok önemlidir. Özellikle kamuya ait yapıların durumunu tespit edebilmek için bir takım yöntemler kullanılmaktadır. Yapıların mevcut haldeki durumlarını tespit etmek amacıyla yapıların muhtelif yerlerine şekil değiştirme ölçen cihazlar, fiber optik, akustik, piezo elektrik, seramik sensörler gibi cihazlar yerleştirilmektedir. Ancak bu yöntemlerin çoğunun en büyük dezavantajı büyük yapılara uygulanabilecek yerleştirilmesi kolay, ucuz, güvenilir, zamanla gelişebilecek çevresel etkilere dayanıklı sensörlerin var olmamasıdır. Ayrıca yapılara yerleştirilen bu sistemler ölçülmesi istenilen verileri düzenli, sürekli ve tutarlı bir şekilde aktarmamaktadır. Bu tür sensörler sadece buldukları kesiten veri aktarmakta, yapının diğer bölgeleri, kesitleri hakkında bilgi verememektedirler. Bu tür cihazların ömürleri yapı ömrüne göre daha kısa olmakta, hassasiyetleri beklenen hassasiyet değerlerini karşılayamamaktadır. Ayrıca, sensörlerin yerleştirildikleri kesitte mekanik kayıplar oluşmaktadır. Bütün yapıdan aynı anda bilgi alınabilecek, ekonomik, yapının ömrü kadar uzun ömürlü, dayanıklı, yapıda zafiyet oluşturmayacak, hassas veri verebilen, güvenilir bir sensör ağına ihtiyaç duyulmaktadır. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda çimento esaslı yapı elemanlarının yapısal olmayan bazı özellikleri de içerebilmesi için araştırmalar yapılmaktadır. Bilgi edinilmek istenilen özelliklerden bazıları hasar görme, sıcaklık, birim boy değişimi, titreşim kontrolü gibi malzemelerin başına gelebilecek değişimleri kendi kendilerine algılayabilmesidir. Kendiliğinden algılama kabiliyeti üretim aşamasında malzemeye katılan bazı ek malzemeler sayesinde verilmiş ve konvansiyonel anlamda istenilen yapısal özelliklere aynı anda sahip olan malzemelere “çok fonksiyonlu malzemeler” denmektedir. Yapının imalatından sonra yapıya monte edilen sensörler gibi bir cihazlar içermediği halde yapısal malzemenin kendisinin algılayıcı amacıyla kullanılmasına “kendiliğinden algılama” denmektedir. Bu sayede yapının içerisine ayrıca bir cihaz yerleştirmeden betonun kendisi yapısal veya malzeme odaklı istediğimiz bilgileri izlememizi sağlanması mümkün olabilmektedir. Bu çalışmanın yapılmasındaki ana hedef, yer değiştirme, gerilme ve hasarları gerçek zamanlı olarak güvenilir ve hassas bir şekilde algılayabilen çimento içerikli kompozitlerin geliştirilebilmesi için yapılması gereken temel dönüşüm olan betonun elektriksel direncinin azaltılarak betonun elektrik iletebilen bir malzeme haline getirilmesi için farklı katkıların etkinliğinin araştırılmasıdır.

Hızlı gelişmekte olan ekonomilere sahip ülkelerde kamusal yapılar, otoyollar, hava ve deniz limanları, altyapı sistemleri, köprüler, su arıtma tesisleri, boru hatları, kanallar, enerji üreten tesisler ve barajlar ticaretin ve ekonominin canlı kalmasını sağlayan yapılardır. Bu yapıların pek çoğu veya en azından bir kısmı beton ve/veya betonarmedir. Bu nedenle beton ve betonarme ekonomik gelişmenin temel taşıdır. Beton dünyada kişi başına en çok tüketilen yapı malzemesidir. Betona ait dayanım, tokluk, darbeye karşı dayanım, çevresel etkilere karşı dayanım, dayanıklılık, süneklik gibi özellikler detaylı olarak birçok araştırmacı tarafından çalışılmış ve halende betonun bu özelliklerini arttırmak amacıyla pek çok araştırmacı çalışma yapmaktadır. Beton yapılar maruz kaldıkları gerilme, şekil değiştirme ve çevresel etkenler gibi nedenlerden dolayı kullanım ömürleri boyunca hasar almaktadırlar. Her türlü yapıda oluşacak hasarların mümkün olan en erken zamanda tespit edilmesi güvenlik açısından önem taşımaktadır. Yapıların mevcut durumlarını tespit edebilmek amacıyla bir takım algılama yöntemleri kullanılmaktadır. Tanım olarak, “yapısal/malzeme sağlık izlemesi”, sürekli veya düzenli olarak yapıların/malzemenin durumunu yerinde (çoğunlukla hasarsız test yöntemleri ile) veya yapılara entegre edilmiş sensörler kullanılarak gerçek zamanlı olarak güvenli bir şekilde izlenmesi ve böylelikle insan hayatlarının kurtarılması, yüksek kaliteli yapılara imkan vermesi ve yapıların onarım ve tamir maliyetlerinin azaltılması anlamında inşaat mühendisliği için çok önemli yararlar sağlamaktadır (Chang vd., 2002). Yapısal/malzeme sağlık izlemeleri sonucunda elde edilen ölçümler (gerilme ve şekil değiştirme büyüklüğü ve artık mekanik dayanımlar gibi) mühendisler tarafından yapıların problemlerinin teşhisinde ve yeni başlamakta olan hasarların değerlendirilmesi için kullanılıp yapılması gereken tamir ve onarım faaliyetlerinin zamanlamasında ve yaşam döngü tahmin modelleri kullanarak yapıların kalan ömürlerinin belirlenmesinde son yıllarda yaygın bir biçimde kullanılmaktadır (Shi ve Chung, 1999; Ehlen, 1999; Hoerner ve Darter, 2000; Ishida ve Maekawa, 2000; Marchand, 2001; Thomas ve Bentz, 2001). Ayrıca bu tür izleme faaliyetleri sonucunda elde edilen kazanımlar ile olası gelecek bakımların minimize edilmesi için ne tür önleyici tedbirlerin alınması gerektiğine de karar verilmektedir. “Malzeme sağlık izleme” yapıların yapımında kullanılan malzemelerin özelliklerini etkileyen parametrelerin değerlendirilmesi anlamında da kullanılmaktadır. Ayrıca “yapısal sağlık izleme” yöntemleri ile inşa edilen yapının tasarımıyla uyumu kontrol edilip bir tür kalite güvence ve kalite kontrol mekanizması sağlanmış olmaktadır (Graveen vd., 2004; Ferragut vd., 2005). Yapıların sağlık durumlarının sürekli olarak izlenmesi ayrıca gelecekte inşa edilecek yeni tasarımlarda daha eğitilmiş yaklaşımlara olanak sağlamaktadır. Özet olarak mekanik yükler, deprem, rüzgâr, okyanus dalgası, canlı yükler ve çevresel yüklerden meydana gelecek hasarlar durumunda olası tehlikeleri azaltmak amacı ile beton yapılarıdaki hasarları sürekli olarak izlemek çok büyük bir önem teşkil etmektedir. Yapısal/malzeme sağlık izleme kapsamında değerlendirilen yapı/malzeme özelliklerine örnek olarak dayanım, elastik modülü, birim şekil değiştirme, geçirimsizlik ve donatı korozyonunun durumu verilebilir (Rajabipour ve Weiss, 2006; Weiss, 2001; Koh vd., 2003).

Beton yapılarda hasarların ve performanslarının izlenmesi için farklı yöntemlerin geliştirilmesine rağmen, yapının/malzemenin sağlık durumunu sürekli ve mevcut kullanılan yöntemlere göre daha ekonomik bir şekilde izleyecek bir yöntem bulunmamaktadır. Mevcut durumda beton yapıların yapısal/malzeme sağlığını izleme amacı ile birim boy değişimini ölçen, fiber-optik algılayıcı, akustik algılayıcı, piezo elektrik seramik algılayıcılar gibi cihazlar yapıların ölçmek istediğimiz kesitlerin iç kısımlarına üretim aşamasında konulmaktadır (Wen ve Chung, 2001; Chong vd., 2003; Chong ve Garboczi, 2003; Auweraer ve Peeters, 2003). Algılayıcı (sensör) ile bir yapıyı takip edebilmek için yapıya kolay yerleştirilebilecek, ucuz, uzun ömürlü, güvenilir algılayıcılar bulunmamaktadır. Aynı zamanda yerleştirilmiş olan algılayıcıları eş zamanlı, sürekli ve sağlıklı bir şekilde takip etmek de çok zordur. Yine bu algılayıcılar sadece yerleştirildikleri noktalarda veri vermekte, dayanıklılık sorunu yüzünden zamanla verim düşmekte, yapının ömrü boyunca hizmet verememektedirler. Ayrıca yerleştirilen algılayıcılar yapının o kesitinde zafiyete neden

olmaktadırlar. Bu ve benzeri nedenlerden dolayı yapının her yerinden bilgi aktarabilecek güvenilir, dayanıklı, yapıya zafiyet vermeyecek ve düşük maliyetli algılayıcı şebekesine ihtiyaç vardır. (Chang, 1999).

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda çimento içerikli elemanların yapısal olmayan özellikleri de içerebilmesi için araştırmalar yapılmaktadır. Yapısal olmayan özelliklerinden bazıları hasar görme, sıcaklık, birim boy değişimi, titreşim kontrolü gibi malzemelerin başına gelebilecek değişimleri kendi kendilerine algılama kabiliyetidir. Kendiliğinden algılama kabiliyeti verilmiş ve istenilen yapısal özelliklere aynı anda sahip olan malzemelere “çok fonksiyonlu malzemeler” denmektedir. Yapısı içinde herhangi bir sensör olmadığı halde kendisi sensör görevi görebilen yapısal malzemelere kendiliğinden algılama yeteneği olan malzemeler denir. Bu uygulama yapının içerisinde sadece belirli bazı noktalara yerleştirilerek ölçüm yapabilen ve aslında çoğu zaman yapının kendisinden daha az dayanıklı dolayısı ile daha az hizmet edebilen sensörlerden tamamen farklıdır. Bu nedenle yapıların içine gömülü halde yapıyla birlikte üretilen veya sonradan monte edilen sensörlerden çok daha ucuz, çok daha uzun ömürlüdürler. Bu malzemelerin kullanılması ile birlikte entegre veya monta sensör kullanımına gerek kalmayacaktır. Bu nedenle de yapının durabilitesi artmakta, tasarımlar kolaylaşmakta ve bun nedeniyle kullanımları çok cazip olmaktadır. Bahsedilen çok fonksiyonlu malzemelerin üretiminde son dönemlerde karbon bazlı tanecikler, bazı filamentler, bazı lifler tercih edilmektedir. Karbon Nano Tüpler (KNT) ve Karbon Nano Lifler (KNL) elektriksel, mekanik, manyetik özellikleri bakımından mükemmel oldukları için polimer, metalik veya seramik matrisli kompozit elemanların üretimi aşamasında nano malzeme olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler kompozitin özelliklerini kayda değer miktarda iyileştirmektedir (Jacobsen vd., 1995; Sobolev ve Gutiérrez, 2005; Li, G, vd., 2005; Gao vd., 2009; Sanchez ve Sobolev, 2010; Raki vd., 2010; Mukhopadhyay, 2011; Han vd., 2011; Hunashyal vd., 2011a; 2011b; Parveen, vd., 2013; Han vd., 2013a). Karbon içeren nano boyutta malzemeler piezo direnç özellikleri sayesinde şekil değiştirme (veya gerilme değişimi) ile birlikte elektriksel iletkenliklerinde değişimlerin olması nedeniyle algılama becerisi olan ölçmelerde kullanılmaktadırlar (Chung, 2002a; 2002b; 2003). Son yıllarda bu tür malzemeler kapsamlı bir şekilde polimer, seramik ve metal matrislerin içerisine dahil edilip yeni nesil kompozitler tasarlanmıştır. Ancak bu tür karbon esaslı nano malzemelerin çimento bağlayıcılı matrislerle birlikte kullanımı polimer, metalik ve seramik matrisli kompozitlere oranla oldukça sınırlı kalmıştır. Daha önceleri yapılan çalışmalar, karbon esaslı nano malzemeler içeren kompozitlerin gerilme ve/veya şekil değiştirmeye maruz bırakıldıkları durumlarda, kompozitin elektriksel özelliklerinin uygulanan gerilme ve/veya şekil değiştirme ile yüklemenin şekline göre lineer ve bazı durumlarda tersinir piezo-dirençli tepki şeklinde değişmekte olduğunu göstermiştir (Chen vd., 1995; Chen vd., 1996; Tomblor vd., 2000; Cao vd., 2003; Dharap vd., 2004; Grow vd., 2005; Dang vd., 2008; Li ve Chou, 2008; Saafi, 2009; Han vd., 2009; Yu ve Kwon, 2009; Park vd., 2011; Howser vd., 2011; Mo ve Roberts, 2013; Han vd., 2013b; Chen vd., 2005; Bontea vd., 2000; Fu vd., 1997; Peled vd., 2001; Chaipanich vd., 2010; Galao vd., 2014; Yu vd., 2007; Yazdanbakhsh, 2009;2011; Mendoza vd., 2013).

Yukarıda özetlenen literatür özetinden de görüldüğü üzere betonun yapısal dayanım özellikleri haricinde çok fonksiyonlu bir malzeme olması ve üzerindeki dformasyon miktarını kendiliğinden belirleyebilecek (Self-Sensing) özelliklerin kazandırılabilmesinin sağlanması için yapılması gereken çalışma betonun elektriksel direncinin azaltılarak elektrik iletken hale getirilmesi olduğu belirlenmiştir. Bu konudaki karbon nano tüpler ve karbon nano lifler gibi çok daha pahalı ve özellikle beton içerisinde homojen olarak dağıtılabilmesi için özel karıştırma işlemleri gerektiren katkı malzemelerinin kullanılmasının yerine betonun elektrik iletkenliğinin artırılması için daha ucuz ve beton içerisinde karıştırılması nano malzemelere göre nispeten daha kolay olan katkı malzemelerinin kullanılmasının mümkün olup olmadığının araştırılması için deneysel bir çalışma planlanmıştır. Bu çalışma kapsamında grafit, çelik lif ve aktif karbon tanecikler katkı malzemesi olarak betona katılarak bu malzemelerin betonun elektriksel direnç özelliğinin nasıl değiştirdiği konusunda ölçümler yapılmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

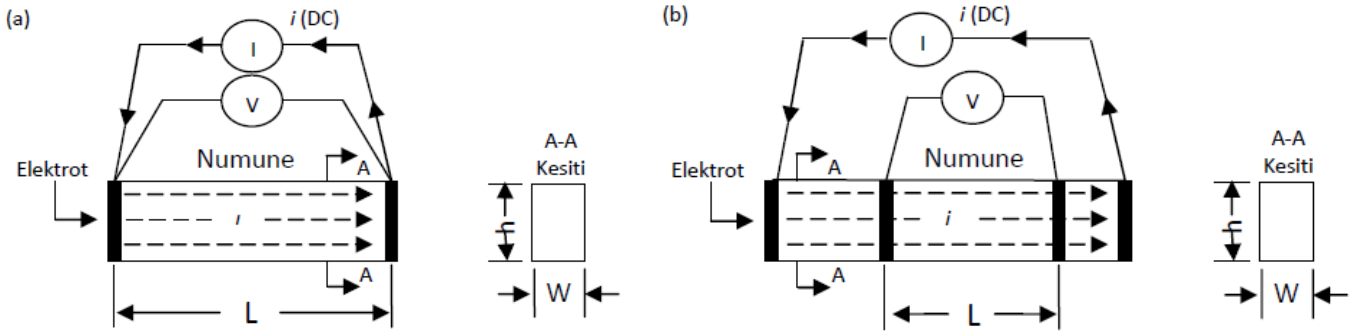
2. Deneysel Çalışma

Çalışma kapsamında elektriksel direnç özelliği çok yüksek olan, yani teorik olarak yalıtkan kabul edilen standart betonun karışım özellikleri üzerinde değişiklik yapılarak elektriksel direnç değerinin düşürülerek, elektrik iletken bir malzemeye dönüştürülmesi amaçlanmıştır. Bu hedefe ulaşabilmek için beton karışımı içerisine katılması düşünülen malzemelerin mümkün oldukça düşük maliyetli ve beton karışım prosesini zorlaştırmayarak karışıma kolay dâhil edilebilecek malzemeler olmasına çalışılmıştır. Çalışma kapsamında seçilen üç farklı katkı malzemesinin betonun elektriksel direnç değerini nasıl değiştirdiği deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla tasarlanan beton karışımlarından 250×250×30 mm boyutlarında plaklar üretilmiştir. Deneysel programda karşılaştırılmak amacıyla referans olarak katkı malzemesiz standart beton karışımı, grafit, çelik lif ve aktif karbon katkılı olmak üzere 3 farklı tür katkı malzemeli beton karışımları ve grafit ile birlikte çelik lifli hibrit malzemeli olmak üzere toplamda 5 farklı beton karışımı oluşturulmuş ve her karışımdan 3 adet olmak üzere toplamda 15 adet plak deney elemanı üretilmiştir. Deneysel programda kullanılan beş farklı beton karışımının basınç dayanımının belirlenmesi için her karışımdan 100×100×100 mm boyutlarında küp numuneler alınarak her karışımının basınç dayanımı belirlenmiştir. Betonun elektriksel direnç özelliğinin değiştirilmesi için düzenlenen karışım detaylarının bu özelliği değiştirirken betonun mekanik basınç dayanımı üzerindeki etkilerinin de belirlenmesi amaçlanmıştır. Her karışım türünden 3 adet alınan beton basınç test örnekleri test edilerek deney elemanlarının basınç dayanımları belirlenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında tasarlanan 5 farklı beton karışımında her karışıma ait 3 adet beton plak deney elemanının üretilmesi için kullanılan malzeme miktarları Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Deneysel Çalışma Kapsamında Tasarlanan 5 Beton Karışımında Kullanılan Malzemeler

Numune	Çimento (kg/m ³)	Silis Dumani (kg/m ³)	Silis Kumu (kg/m ³)	Çelik lif (kg/m ³)	Grafit (kg/m ³)	Aktif Karbon (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Akışkanlaştırıcı (kg/m ³)
Referans	788.5	100	1225	----	----	----	178.5	39
Grafit Karışımı	788.5	100	1225	----	118.3	----	252.7	39
Çelik Lif Karışımı	788.5	100	1225	47	----	----	178.5	39
Grafit+Çelik Lif Karışımı	788.5	100	1225	47	118.3	----	252.7	39
Aktif Karbon Karışımı	788.5	100	1225	----	----	94.6	178.5	39

Deneysel çalışma kapsamında üretilen 5 farklı beton karışımının elektriksel direnç özelliklerinin ölçülebilmesi için deney elemanlarının üretimi esnasında elektriksel direnç ölçümlerinin alınabilmesi için beton plak deney elemanları içerisine bakır plakalar yerleştirilmiştir. Bu bakır plakalar elektriksel direnç ölçümlerinin alınması için deneysel çalışmada kullanılacak olan özel ölçüm sisteminin bağlanabilmesi için bağlantı prob noktası olarak kullanılmıştır. Literatür incelendiğinde iki ve dört problu ölçüm yapmanın çimento ile üretilmiş kompozit malzemelerin elektrik dirençlerinin ölçülmesinden kullanıldığı görülmüştür. Dört problu ölçüm yöntemlerinde numunenin üzerinde 4 farklı elektriksel temas noktası bulunup iki temas noktası elektriksel akımın geçmesi için diğer iki temas noktası ise iki nokta arasındaki voltajı belirlemek için kullanılmaktadır (Şekil 1-b). İki problu yöntemlerde ise sadece iki temas noktası bulunup, bu noktalar arasında çimento bağlayıcılı kompozit boyunca akım geçmekte olup voltaj ölçümü aynı yerlerden yapılmaktadır (Şekil 1-a). Literatürde yapılmış çalışmalarda her iki yöntemin de yaygın olarak kullanıldığı gözlemlenmiştir (Al-Dahawi ve ark., 2016; Al-Dahawi ve ark., 2017; Sarwary ve ark., 2019; Sahmaran, 2017, Siad ve ark., 2018; Yıldırım ve ark., 2018; Yıldırım ve ark., 2020). Dört problu metodun iki problu metoda göre temas direncini kapsamadığından dolayı bazı çalışmalarda daha doğru sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada 2 noktalı prob yönteminin kullanılması tercih edilmiştir. Her iki yöntemde de dalgalı akım (AC) ve doğru akım (DC) test yöntemleri uygulanabilmektedir (Wen ve Chung, 2007). Bu çalışmada dalgalı akım (AC) test yöntemi ile elektriksel direnç ölçümleri yapılmıştır.

**Şekil 1.** İletkenlik ölçümü; (a) 2 problu, (b) 4 problu ölçüm yöntemi (Sahmaran, 2017)

Makale çalışması kapsamında GIATEC Scientific© firması tarafından üretilen RCON marka elektriksel ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu araç alternatif akım uygulayarak karşılığında empedans sonuçları ölçen, 1 Hz - 30 Hz arasında değişen frekans aralığında çalışan, ölçüm süresi 5 saniye veya daha az olan, 0-180° arasında değişen faz açısına ayarlanabilen bir cihazdır. Literatürde yapılan araştırmalar sonucunda alternatif akım kullanılarak yapılan çalışmalarda ölçüm frekansının 1.0 kHz olarak seçilmesinin polarizasyon etkisini ortadan kaldıracağı sonucuna ulaşıldığı için bu çalışmada da ölçüm frekansı değeri 1.0 kHz olarak sabit seçilmiştir (Al-Dahawi ve ark., 2016; Al-Dahawi ve ark., 2017; Sarwary ve ark., 2019; Sahmaran, 2017, Siad ve ark., 2018; Yıldırım ve ark., 2018; Yıldırım ve ark., 2020). Çalışma kapsamında tercih edilen RCON marka elektriksel direnç ölçüm aracı, iki probdan alınan ölçüm sonrasında deney elemanının elektriksel empedans ve faz açısı değerlerini vermektedir. Aşağıda verilen denklem kullanılarak ölçüm sisteminin verdiği elektriksel empedans ve faz açısı değerleri ile deney elemanının elektriksel direnç değerinin hesaplanması mümkündür.

$$\rho = Z \times \cos(\theta) \times \frac{A}{L} \quad (1)$$

Denklem 1'de verilen eşitlik kullanılarak elektriksel direnç değeri ölçüm cihazından alınan elektriksel empedans ve faz açısı değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Eşitlikte ρ elektriksel direnç ($\Omega.m$), Z, elektrik empedansı (Ω), θ , faz açısı ($^\circ$), A deney elemanının kesit alanı (m^2), L sembolü ise deney elemanının ölçüm boyunu (m) ifade etmektedir. Deney elemanlarından ölçüm sistemi kullanılarak alınan elektriksel direnç ölçümleri esnasında alınmış bir fotoğraf Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. RCON Elektriksel Direnç Ölçüm Aletinden Ölçüm Sırasında Bir Görünüş

Deneyel çalışma kapsamında üretilmesi hedeflenen beton karışımları için kullanılan malzemeler Tablo 1’de verilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen beton karışımlarında ÇİMSA® Süper Beyaz CEM I 52.5 beyaz Portland çimentosu kullanılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan literatür taraması sonucunda bu tür özel betonlarda agrega olarak silis kumunun tercih edildiği ve kalın agrega olarak düşük çapta silis kumunun kullanıldığı görülmüştür. Bu nedenle çalışmada ERGEN® TK4966 silis kumu tercih edilmiş olup, karışımlarda en büyük 7 mm çapında ince agrega kullanılmıştır. Beton karışımlarının hepsinde silis dumanı için mikro silika silis dumanı 920u malzemesi tercih edilmiştir. Süper akışkanlaştırıcı olarak POLYCAR® 300 kullanılmıştır. Betonun elektriksel iletkenliği üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla çalışmada beton karışımlarına değişken olarak katılan katkı malzemesi olarak çelik tel, grafit ve aktif karbon malzemeleri seçilmiştir. Çalışmada kullanılmak üzere seçilen aktif karbon malzemesinin boyutunun büyük olması nedeniyle öncelikle öğütülmüş ve daha sonra çapı 0.074 mm olan 200 numaralı elek yardımı ile elendikten sonra beton karışımında kullanılmıştır.

Yukarıda özellikleri verilen malzemeler detayları Tablo 1’de verilen miktarlarda beş farklı beton karışımının oluşturulması için karıştırılmış ve elektriksel direnç farklılıklarının deneysel olarak incelenebilmesi için 250×250×30 mm boyutların plak deney elemanları dökülerek üretilmiştir. Deney elemanlarının beton dökümü öncesinde ve sonrasında alınmış fotoğrafları Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Deney Elemanlarının Beton Döküm Öncesi ve Sonrası Görünüşleri

Deney elemanlarının dökümü esnasında elektriksel direnç ölçümlerinin alınabilmesi için her deney elemanı içerisine ikişer adet bakır levha şeklinde prob yerleştirilmiştir. Bu probalar kullanılarak deney elemanlarından elektriksel direnç ölçümleri alınmıştır. Deney elemanlarından beton basınç dayanımının belirlenmesi için alınan küp numunelerinin aksel basınç testi esnasında alınan bir fotoğraf örnek olarak Şekil 4’de sunulmuştur. Deneyel çalışma kapsamında kullanılan ve detayları makalenin 2. bölümünde

sunulan RCON elektriksel direnç ölçüm test düzeneği ile plak deney elemanlarına yerleştirilen 2 bakır prob üzerinden elektriksel empedans ve faz açısı değerleri ölçülmüştür. Bu değerler kullanılarak Denklem 1'den faydalanılarak elektriksel direnç değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 4. Deneysel Çalışma Kapsamında Üretilen Beton Karışımlarının Eksenel Basınç Dayanımının Belirlenmesi

3. Deneysel Sonuçlar ve Yorumlar

Deneysel çalışma kapsamında toplamda 5 farklı beton karışımının elektriksel direnç değerlerindeki değişimler ve bu özelliği değiştirmek için karışımlara eklenen katkı malzemelerinin beton basınç dayanımları üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Deney elemanlarının 7 günlük eksenel basınç dayanımı değerleri Tablo 2'de, elektriksel direnç ölçüm aletinden alınan ölçüm sonuçları ise Tablo 3'de sunulmuştur.

Tablo 2. Basınç Dayanımı Değerleri (7 Günlük Küp Dayanım)

Deney Elemanı	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Dayanım (MPa)
Referans	75.32	72.7
	70.31	
	72.50	
Grafit	45.55	45.3
	45.27	
	45.00	
Çelik Lif	77.40	72.0
	68.11	
	70.50	
Grafit+Çelik Lif	34.88	36.3
	38.60	
	35.40	
Aktif Karbon	67.31	63.6
	57.98	
	65.50	

Deneysel çalışma kapsamında elde edilen ve Tablo 2'de verilen sonuçlar beton karışımlarının elektriksel direnç özelliklerinin değiştirilmesi için karışımlara katılan katkı malzemelerinin betonun eksenel basınç dayanımı üzerindeki etkileri açısından değerlendirildiğinde en başarılı sonucu çelik lif katkılı betonun gösterdiği, en başarısız sonucu ise grafit katkı malzemesinin eklendiği beton karışımının gösterdiği görülmüştür. Elektriksel direnç özelliğinin değiştirilmesi için katkı malzemesinin eklenmediği standart beton referans karışımının basınç dayanımına göre kıyaslandığında sırasıyla grafit, çelik lif, grafit ile çelik lifin birlikte kullanıldığı ve aktif karbon katkılı karışımların beton basınç dayanımlarının sırasıyla ortalama %38, %1, %50 ve %13 oranlarında daha düşük dayanım değerleri sergilediği hesaplanmıştır. Basınç dayanımında elektriksel direnç değerinin düşürülmesi için beton karışımına eklenen grafit malzemesi %38 oranında, çelik lif ile birlikte grafit malzemesinin kullanıldığı beton karışımında ise %50 oranında bir azalma meydana gelmesi bu katkı malzemelerinin basınç dayanımını yüksek oranlarda olumsuz

olarak etkilediğini göstermiştir. Aktif karbon katkılı beton ve çelik lif katkılı beton karışımlarında basınç dayanımındaki azalım oranları %13 ve %1 oranlarında kalarak oldukça sınırlı düzeyde kalmıştır. Grafit malzemesinin basınç dayanımı üzerindeki olumsuz etkisi su/çimento oranının artırılmasına neden olması ve betonun hidratasyonu sırasında gerekli olan suyun büyük bir bölümünü kendi bünyesine çekerek hidratasyon işlemini olumsuz etkilemesinden kaynakladığı düşünülmektedir. Tablo 1’de verilen beton karışımına katılan malzemeler incelendiğinde 1 m³ beton için %41.6 oranında daha fazla su betona eklenmesi gerekli olmuş ancak buna rağmen hidratasyon işlemi sırasında grafit malzemesi bünyesine çektiği su nedeniyle betonun hidratasyon işlemi sırasında gerek duyduğu su miktarını kullanmasına engel olmuştur. Aynı durum aktif karbon malzemesinde de görülmesine rağmen grafit katkı malzemesine göre çok daha düşük oranda bir su çekme özelliğine sahip olması nedeniyle beton basınç dayanım üzerindeki olumsuz etkisi grafit malzemesine göre çok daha az oranda meydana gelmiştir.

Tablo 3. Elektriksel Direnç Ölçüm Sonuçları

Deney Elemanı	Z (Ωm)	θ (derece)	A (m ²)	L (m)	ρ (Ω)	Ortlama ρ (Ω)
Referans	830000	11	0.0075	0.25	24442.52	24829.56
	844000	9	0.0075	0.25	25008.27	
	845000	9	0.0075	0.25	25037.90	
Grafit	5740	12	0.0075	0.25	168.44	177.00
	6150	8	0.0075	0.25	182.70	
	6070	9	0.0075	0.25	179.86	
Çelik Lif	451000	11	0.0075	0.25	13281.42	13014.66
	467000	10	0.0075	0.25	13797.16	
	405000	10	0.0075	0.25	11965.41	
Grafit+Çelik Lif	16900	7	0.0075	0.25	503.22	503.82
	17100	8	0.0075	0.25	508.01	
	16800	7	0.0075	0.25	500.24	
Aktif Karbon	13300	15	0.0075	0.25	385.40	391.01
	13200	14	0.0075	0.25	384.24	
	13800	13	0.0075	0.25	403.39	

Bu makale çalışması kapsamında incelenen temel araştırma konusu olan betonun elektriksel direnç özelliğinin azaltılarak elektrik iletkenliğinin artırılması açısından elde edilen ve Tablo 3’de sunulan sonuçlar incelendiğinde en başarılı sonucu grafit katkılı beton karışımının verdiği, en başarısız sonucu ise çelik lif katkılı betonun gösterdiği gözlemlenmiştir. Deney elemanlarından ölçülen tüm değerler ve hesaplanan elektriksel direnç değerleri Tablo 3’de verilmiştir. Elektriksel direnç değerinin yüksek olması söz konusu beton karışımının kullanıldığı plak deney elemanının elektrik iletkenliğinin düşük olduğu ve elektriği iletmediğini göstermektedir. Özetle hesaplanan elektriksel direnç değerleri ne kadar düşükse söz konusu beton karışımı elektriği o kadar rahat ve başarılı bir şekilde iletebilmektedir. Bu bakış açısı ile deneysel sonuçlar yorumlandığında hiçbir katkı malzemesi katılmayan standart referans beton karışımının ortalama elektriksel direnç değeri grafit katkılı, çelik lifli, grafit ile çelik lifli ve aktif karbon katkılı beton karışımlarının ortalama elektriksel direnç değerinden sırasıyla 140, 2, 49 ve 64 kat daha büyük olduğu hesaplanmıştır. Standart referans beton karışımının elektriksel direnç değerini 140 kat azaltarak çok büyük oranda azalım sağlayan ve dolayısı ile elektriksel iletkenliği artıran en başarılı katkı malzemesi grafit olmuştur. Aktif karbon katkı malzemesi ise katkısız standart referans betonun elektriksel direnç değerini 64 kat azaltarak elektrik iletkenliğini artırmada ikinci sırayı alarak oldukça iyi bir performans sergilemiştir. Elektriksel direnci azaltmada ve elektriksel iletkenliği artırmada en başarısız katkı malzemesi ise standart betona göre elektriksel direnç değerini sadece 2 kat azaltabilen çelik lif katkı malzemesi olmuştur.

4. Sonuçlar

Bu makale çalışması kapsamında elektriksel direnci çok yüksek, yani teorik olarak elektrik iletkenliği olmayan standart bir betonun elektriksel direnç değerinin azaltılarak elektriği iletebilen bir malzeme haline dönüştürülmesi için 4 farklı katkı malzemesi kullanılarak beton karışımları oluşturulmuş ve deneysel olarak elektriksel direnç ve mekanik eksenel basınç dayanımı değerlerinin nasıl değişim gösterdiği incelenmiştir. Betonun elektriksel direnç özelliğinin azaltılarak elektriği iletebilen bir beton geliştirilmesi bu türdeki özel bir betonun farklı uygulamalarda kullanılabilmesi düşünüldüğü için araştırılmıştır. Bu türde elektriği iletebilen özel betonlar elektriksel direnç özelliklerindeki değişimin izlenmesi ile kendi üzerlerindeki deformasyon hakkında bilgi verebilen yapısal sağlık takibi uygulamalarında kullanılacak özel bir malzemeye dönüşebilmektedir. Bu çalışma kapsamında maliyet olarak düşük ve beton karışımına kolayca eklenebilen katkı malzemeleri ile betonun elektriksel direnç değerinin azaltılarak elektriği iletebilen bir malzemeye dönüştürülmesi için 4 farklı katkı malzemesi deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda elektriksel direnç değerini azaltarak betonu elektrik iletebilen bir malzemeye dönüştürmede en başarılı olan katkı malzemesinin grafit olduğu belirlenmiştir. Ancak mekanik basınç dayanımı açısından da değerlendirildiğinde grafit katkı malzemesinin betonun basınç dayanımı olumsuz etkilediği ve oldukça büyük oranda düşürdüğü de görülmüştür. Mekanik basınç dayanımı büyük oranda düşürmeden ve elektriksel direnç değerini azaltarak elektrik iletkenliğini artırmada en optimum başarılı sonucu ise çalışma kapsamında test edilen aktif karbon katkı malzemesi sergilemiştir. Aktif karbon katkı malzemesi betonun basınç dayanımında sadece %13 oranında bir azalım yapmasına rağmen, elektriksel direnç değerini 64 kat azaltarak elektrik iletkenliğini çok büyük oranda artırmıştır. Betonun basınç dayanımının önemli olduğu uygulamalarda aktif karbon katkı malzemesinin kullanılmasının, basınç dayanımının önemli olmadığı uygulamalarda ise grafit katkı malzemesinin kullanılmasının daha uygun olabileceği bu çalışmadan elde edilen önemli bir sonuçtur.

Referanslar

- Al-Dahawi A., Sarwary, M., Öztürk, O., Yıldırım, G., Akın, A., Şahmaran, M., Lachemi, M. (2016). Electrical Percolation Threshold of Cementitious Composites Possessing Self-Sensing Functionality Incorporating Different Carbon-Based Materials, *Smart Materials and Structures*, 25(10).
- Al-Dahawi A., Yıldırım, G., Öztürk, O., Şahmaran, M. (2017). Assessment of Self-sensing Capability of Engineered Cementitious Composites within the Elastic and Plastic Ranges of Cyclic Flexural Loading, *Construction and Building Materials*, 145, 1-10. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.236
- Auwaer, H. V. D., Peeters, B. (2003). Sensors and Systems for Structural Health Monitoring, *Journal of Structural Control*, 10, 117-125. doi: 10.1002/stc.21
- Bontea, D.M., Chung, D.D.L., Lee, G.C. (2000). Damage in carbon fiber reinforced concrete, monitored by electrical resistance measurement, *Cement and Concrete Research*, 30(4), 651–659. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.08.004
- Cao, J., Wang, Q., Dai, H. (2003). Electromechanical properties of metallic, quasimetallic, and semiconducting carbon nanotubes under stretching, *Physical Review Letters*, 90, 157601-157604. doi: 10.1103/PhysRevLett.90.157601
- Chaipanich, A., Nochaiya, T., Wongkeo, W., Torkittikul, P. (2010). Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes-fly ash cement composites, *Materials Science and Engineering A*, 527(4-5) 1063-1067. doi: 10.1016/j.msea.2009.09.039
- Chang, F. K. (1999). Structural Health Monitoring: A Summary Report, *Proceedings of the Second International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford University, Stanford, California, 19-29.
- Chang, F-K., Prosser, W. H., Schulz, M. J. (2002). Letter of Introduction from the Editorsof Structural Health Monitoring, *Structural Health Monitoring*, 1 (1), 1-2. doi: 10.1177/147592170200100101
- Chen, B., Liu, J., Wu, K. (2005). Electrical responses of carbon fiber reinforced cementitious composites to monotonic and cyclic loading, *Cement and Concrete Research*, 35(11), 2183–2191. doi: 10.1016/j.cemconres.2005.02.004
- Chen, P.W., Chung, D.D.L., (1995). Improving the electrical conductivity of composites comprised of short conducting fibers in a non-conducting matrix: the addition of a non-conducting particulate filler, *MRS Proceedings*. 390, 141. doi:10.1557/PROC-390-141
- Chen, P.W., Chung, D.D.L. (1996). Concrete as a new strain/stress sensor, *Composites Part B:Engineering*, 27, 11–23. doi: 10.1016/1359-8368(95)00002-X
- Chong, K. P., Garboczi, E. J.,(2003). Smart and designer structural materials systems, *Computational Materials Science*, 4(4), 417-430. doi:10.1002/pse.134
- Chong, K. P., Garboczi, E. J., Washer, G. (2003). Health monitoring of civil infrastructures, *Smart Materials and Structures*, 12 (3), 483-493.
- Chung, D.D.L., (2002). Piezoresistive cement-based materials for strain sensing, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 13(9), 599–609. doi:10.1106%2F104538902031861
- Chung, D.D.L., (2002). Electrical conduction behavior of cement–matrix composites, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 11(2), 194–204. doi: 10.1361/105994902770344268
- Chung, D.D.L. (2003). Damage in cement-based materials, studied by electrical resistance measurement, *Materials Science Engineering Review*, 42(1), 1–40. doi: 10.1023/A:1017901929264
- Dang, Z. M., Jian, M. J., Xie, D., Yao, S. H., Zhang, L. Q., Bai, J. B. (2008). Supersensitive linear piezoresistive property in carbon nanotubes/silicone rubber nanocomposites, *Journal of Applied Physics*, 104, 24114. doi: 10.1063/1.2956605
- Dharap, P., Li, Z., Nagarajaiah, S., Barrera, E. V. (2004). Nanotube film based on single-wall carbon nanotubes for strain sensing, *Nanotechnology*, 15, 379-382.
- Ehlen, M. A., (1999). *BridgeLCC 1.0 Users Manual: Life-cycle Costing Software for Preliminary Bridge Design*, Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology.
- Ferragut, T. R., Rasmussen, R., Darter, M. I., Harrington, D., Anderson-Wilk, M. (2005). Long-term Plan for Concrete Pavement Research and Technology – The Concrete Pavement Roadmap; Volume II: Tracks. Washington, DC: Federal Highway Administration Publication No. HRT-05-053.
- Fu, X, Ma, E, Chung, D.D.L., Anderson, W.A. (1997). Self-monitoring in carbon fiber reinforced mortar by reactance measurement, *Cement Concrete Research*, 27(6), 845–852. doi: 10.1016/S0008-8846(97)83277-2
- Galao O., Baeza, F.J., Zornoza, E., Garcés, P. (2014). Strain and damage sensing properties on multifunctional cement composites with CNF admixture, *Cement and Concrete Composites*, 46, 90-98. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.11.009
- Gao, W., Alemany, Lijie, Ci, Ajayan, P.M. (2009). New insights into the structure and reduction of graphite oxide, *Nature Chemistry* 1(5), 403–408. doi:10.1038/nchem.281

- Graveen, C., Weiss, W.J., Olek, J., Nantung, T., Gallivan, V.L. (2004). The Implementation of a Performance Related Specification (PRS) for a Concrete Pavement in Indiana, Technical Report, Transportation Research Board (TRB) Annual Conference, Washington, DC.
- Grow, R. J., Wang, Q., Cao, J., Wang, D., Dai, H. (2005). Piezoresistance of carbon nanotubes on deformable thin-film membranes, *Applied Physics Letters*, 86, 93104- 93107. doi: 10.1063/1.1872221
- Han, B., Yu, X., Kwon, E. (2011). A self-sensing carbon nanotube/cement for traffic monitoring, *Nanotechnology* 20, 5.
- Han, B., Yu, X., Ou, J. (2011). Multifunctional and smart carbon nanotube reinforced cement-based materials, *Nanotechnology in Civil Infrastructure*, Springer, Berlin, Heidelberg, 1-47. doi: 10.1007/978-3-642-16657-0_1
- Han, B., Yang, Z., Shi, X., Yu, X. (2013). Transport properties of carbon-nanotube/cement composites. *Journal of Materials Engineering and Performance* 22, 184-189. doi: 10.1007/s11665-012-0228-x
- Han, B., Zhang, K., Burnham, T., Kwon, E., Yu, X. (2013). Integration and road tests of a self-sensing CNT concrete pavement system for traffic detection, *Smart Materials and Structures* 22(1), 015020. doi: 10.1088/0964-1726/22/1/015020
- Hoerner, T. E., Darter, M. I. (2000). Improved Prediction Models for PCC Pavement Performance-related Specifications Volume II: *PaveSpec 3.0 User's Guide*. Washington, DC: Federal Highway Administration Publication No. FHWA-RD-00-131.
- Howser, R.N., Dhonde, H.B., Mo, Y.L. (2011). Self-sensing of carbon nanofiber concrete columns subjected to reversed cyclic loading, *Smart Materials Structures* 20, 085031.
- Hunashyal, A.M., Lohitha, S.J., Quadri, S.S., Banapurmath, N.R. (2011). Experimental investigation of the effect of carbon nanotubes and carbon fibres on the behaviour of plain cement composite beams, *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 4(1), 29-36. doi: 10.1080/19373260.2011.548160
- Hunashyal, A. M., Tippa, S.V., Quadri, S.S., Banapurmath, N.R. (2011). Experimental Investigation on Effect of Carbon Nanotubes and Carbon Fibres on the Behavior of Plain Cement Mortar Composite Round Bars under Direct Tension, *International Scholarly Research Network*. doi: 10.5402/2011/856849
- Ishida, T., Maekawa, K. (2000). An Integrated Computational System for Mass/Energy Generation, Transport, and Mechanics of Materials and Structures, *Concrete Library of Japan Society of Civil Engineers*, 36, 129-144. doi: 10.2208/jscej.1999.627_13
- Jacobsen, R. L., Tritt, T. M., Guth, J. R., Ehrlich, A. C., Gillespie, D.J. (1995). Mechanical properties of vapor-grown carbon fiber, *Carbon*, 33, 1217-1221. doi: 10.1016/0008-6223(95)00057-K
- Koh, H. M., Choo, J. F., Kim, S. K., Kim, C. Y. (2003). Recent application and development of structural health monitoring systems and intelligent structures in Korea, *Proceedings of the 1st international conference on structural health monitoring and intelligent infrastructure*, Nov., Tokyo, Japan, 99-112. doi: 10.1007/1-4020-3661-2_4
- Li, C., Chou, T. (2008). Modeling of damage sensing in fiber composites using carbon nanotube networks, *Composites Science and Technology*, 68 (15-16), 3373-3379. doi: 10.1016/j.compscitech.2008.09.025
- Li, G.Y., Wang, P.M., Zhao, X. (2005). Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes, *Carbon*, 43(6), 1239-1245. doi:10.1016/j.carbon.2004.12.017
- Marchand, J. (2001). Modeling the behavior of unsaturated cement systems Exposed to aggressive chemical environments, *Materials and Structures*, 34 (238), 195-200.
- Mendoza, O., Sierra, G., Tobon, J.I. (2013). Influence of superplasticizer and Ca(OH)₂ on the stability of functionalized multi-walled carbon nanotubes dispersions for cement composites applications, *Construction and Building Materials*, 47, 771-778. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.100
- Mo, Y.L., Roberts, R.H. (2013). Carbon nano fibre concrete for damage detection of Infrastructure, *Advances in Nano Fibers*, Chapter 5, 125-14. doi: 10.5772/57096
- Mukhopadhyay, S. C. (2011). *New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring*, Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer.
- Park, K., Paulino, G.H. (2011). Cohesive Zone Models: A Critical Review of Traction-Separation Relationships Across Fracture Surfaces, *Applied Mechanics Reviews*, 64(6), 060802-060822. doi: 10.1115/1.4023110
- Parveen, S., Rana S., Fanguero, R. (2013). A review on nanomaterial dispersion, microstructure, and mechanical properties of carbon nanotube and nanofiber reinforced cementitious composites, *Journal of Nanomaterials*, 80. doi: 10.1155/2013/710175
- Peled, A., Torrents, J. M., Mason, T.O., Shah, S.P., Garboczi, E.J. (2001). Electrical impedance spectra to monitor damage during tensile loading of cement composites, *ACI Materials Journal*, 98(4), 313-322.
- Rajabipour, F., Weiss, W. J. (2006). Linking Health Monitoring in Concrete Structures with Durability Performance Simulations, *Proceedings of the ASCE Structures Congress*, St. Louis, Missouri. doi: 10.1061/40889(201)97

- Raki, L., Beaudoin, J.J., Alizadeh, R., Makar, J.M, Sato, T. (2010). Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology, *Materials*, 3(2), 918-942. doi: 10.3390/ma3020918
- Saafi, M. (2009). Wireless and embedded carbon nanotube networks for damage detection in concrete structures, *Nanotechnology*, 20, 395502-395509.
- Sanchez, F., Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete – A review, *Construction and Building Materials*, 24(11), 2060-2071. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014
- Sarwary, M.H., Yıldırım, G., Al-Dahawi, A., Anıl, Ö., Khiavi, K.A., Toklu, K., Şahmaran, M. (2019). Self-Sensing of Flexural Damage in Large-Scale Steel-Reinforced Mortar Beams, *ACI Materials Journal*, 116(4), 209-221.
- Şahmaran, M. (2017). Multifunctional Cementitious Composites for Real-time Structural/Materials Health Monitoring Application, The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK), 114R043.
- Shi, Z.Q., Chung, D.D.L. (1999). Carbon fiber reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion, *Cement Concrete Research*, 29(3), 435–439. doi: 10.1016/S0008-8846(98)00204-X
- Siad, H., Lachemi, M., Şahmaran, M., Mesbah, H A., Hossain, K. M. A. (2018). Advanced engineered cementitious composites with combined self-sensing and self-healing functionalities, *Construction and Building Materials*, 176, 313-322. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.026
- Sobolev, K., Gutierrez, M.F.i (2005). How nanotechnology Can Change the Concrete World, *American Ceramic Society Bulletin*, 84(10), 14-17. doi:10.1002/9780470588260.ch16
- Thomas, M. D. A., Bentz, E. C. (2001). LIFE-365 Service Life Prediction Model; Users Manual. Lovettsville, Virginia: Silica Fume Association.
- Tombler, T. W., Zhou, C., Alexseyev, L., Kong, J., Dai, H., Liu, L., Jayanthi, C. S., Tang, M., Wu., S. Y. (2000). Reversible electromechanical characteristics of carbon nanotubes under local probe manipulation, *Nature*, 405, 769-772.
- Weiss, W. J. (2001). Linking Insitu Monitoring with Damage Modeling for Life-Cycle Performance Simulations of the Concrete Infrastructure, NSF Career Development Plan, National Science Foundation.
- Wen, S. H., Chung, D. D. L. (2001). Electric polarization in carbon fiber reinforced cement, *Cement and Concrete Research*, 31(1), 141-147. doi: 10.1016/S0008-8846(00)00382-3
- Wen, S. H., Chung, D. D. L. (2007). Electrical-resistance-based damage selfsensing in carbon fiber reinforced cement, *Carbon* 45(4), 710-716. doi:10.1016/j.carbon.2006.11.029
- Yazdanbakhsh, A., Grasley, Z., Tyson, B., Abu Al-Rub, R. (2009). Carbon nanofibers and nanotubes in cementitious materials: Some issues on dispersion and interfacial bond, *ACI Special Publication*, 267, 21-34.
- Yazdanbakhsh, A., Grasley, Z., Tyson, B., Abu Al-Rub, R.K. (2011). Dispersion quantification of inclusions in composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(1), 75-83. doi:10.1016/j.compositesa.2010.10.005
- Yıldırım G., Sarwary, M.H., Al-Dahawi, A., Öztürk, O., Anıl, Ö., Şahmaran, M. (2018). Piezoresistive behavior of CF- and CNT-based reinforced concrete beams subjected to static flexural loading: Shear failure investigation, *Construction and Building Materials*, 168, 266-279. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.124
- Yıldırım G., Öztürk, O., Al-Dahawi, A., Ulu, A.A., Şahmaran, M. (2020). Self-Sensing Capability of Engineered Cementitious Composites: Effects of Aging and Loading Condition, *Construction and Building Materials*, 231, 1-16. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117132
- Yu, J., Grossiord, N., Koning, C.E., Loos, J. (2007). Controlling the dispersion of multi-wall carbon nanotubes in aqueous surfactant solution, *Carbon* 45, 618-623. doi:10.1016/j.carbon.2006.10.010
- Yu, X., Kwon, E. (2009). A carbon nanotube/cement composite with piezoresistive properties, *Smart Materilas and Structures*, 18(5), 055010-055015.



Kablosuz Endüktif ve Kapasitif Güç Transferi Sistemleri Üzerine Nümerik Araştırma

Numerical Research on Wireless Inductive and Capacitive Power Transfer Systems

Mehmet Zahid Erel ¹

¹Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, 06010 Ankara, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 29/04/2022 **Kabul / Accepted:** 18/07/2022 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz
Kablosuz güç transferi teknolojisi son yıllarda ilgi çeken bir konu olmuştur. Kablolü şarj teknolojisine göre basit tasarım, düşük maliyet, esneklik, güvenli ve uzun ömürlü işletim gibi birçok avantaj sunmaktadır. Bu makalenin asıl amacı diğer kablosuz şarj teknolojileri arasında öne çıkan endüktif ve kapasitif güç transferi sistemleri üzerine Scopus veri tabanı kullanılarak nümerik araştırma sunmaktır. Bu kapsamda, literatürdeki belge sayılarının yıllara, yazarlara ve ülkelere göre değişimi verilmiştir. Aynı zamanda ilgili konu alanları ve belge tipleri yüzdelik olarak sunulmuştur. Araştırmanın sonucunda, endüktif güç transferi üzerine çalışmaların kapasitif güç transferine göre daha çok yer aldığı görülmüştür. Her iki kablosuz şarj teknolojisi için belge sayısı 2019 yılında zirve yapmıştır. Buna ilaveten, ülkeler arasında kıyaslama yapıldığında Amerika ve Çin diğerlerine göre dokümantasyon bakımından üstün durumdadır. Endüktif teknolojinin kullanıldığı çalışmalarda Çin, Amerika'ya göre üstün durumda iken kapasitif çalışmalarda Amerika, Çin'e göre üstün durumdadır. Her iki kablosuz şarj teknolojisi için mühendislik ve konferans bildirileri değişkenleri diğer değişkenlere göre literatürde daha çok yer almıştır. Bu çalışmanın endüktif ve kapasitif kablosuz şarj teknolojisi ile ilgilenen araştırmacılar için önemli bir referans olması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler

"Kablosuz güç transferi, kablosuz şarj teknolojisi, endüktif güç transferi, kapasitif güç transferi, nümerik araştırma"

Abstract

Wireless power transfer technology has been a topic of interest in recent years. Compared to wired charging technology, it offers many advantages such as simple design, low cost, flexibility, safe and long-lasting operation. The main purpose of the paper is to present numerical research using Scopus database on inductive and capacitive power transfer systems that prominent among other wireless charging technologies. In this context, the number of documents in the literature is given according to the years, authors, and countries. Meantime, the relevant subject areas and document types are presented as a percentage. As a result of the research, it has been observed that the studies on inductive power transfer are more available than the capacitive power transfer. The number of documents for both wireless charging technologies peaked in 2019. Moreover, America and China are superior to the others when compared in terms of documentation. While China is superior to America in inductive charging technology, America surpasses China in capacitive charging technology. The variations of engineering and conference papers are more figured in both wireless charging technologies than others. This paper is expected to serve as a significant reference for researchers who are interested in wireless charging technology.

Key Words

"Wireless power transfer, wireless charging technology, inductive power transfer, capacitive power transfer, numerical research"

1. Giriş

Artan fosil yakıt kullanımı sonucunda ortaya çıkan karbon emisyonu ve çevresel kirlilik meseleleri son yıllarda çözülmesi gereken önemli konu başlıkları arasında olmuştur. Bu problemlerin çözümü için birçok araştırma başlığı ortaya konulmuş ve bunlardan bir tanesi de kablosuz güç transfer teknolojisi olarak karşımıza çıkmıştır. Kablosuz güç transfer teknolojisi, herhangi bir kablo bağlantısı olmadan gücün iletilmesi olarak ifade edilebilir. Nikola Tesla, kablosuz güç transferi teknolojisinin öncüsü olarak bilinir ve bu teknolojinin gelişip günümüzdeki halini almasında önemli bir rol oynamıştır. Yüksek frekanslı ve yüksek gerilim trafosu olarak da bilinen Tesla bobininin icadı bu durumun göstergesi olarak verilebilir (Marincic, 1982). Tesla bu çalışmasında bobinleri kullanarak elektrik enerjisinin kablosuz olarak iletimini amaçlamıştır. Kablosuz güç transferi teknolojisi, kablolu şarj teknolojisi ile karşılaştırıldığında birçok avantaj sunmaktadır; bunlar basit tasarım, düşük maliyet, yağmur ve kar gibi kötü hava şartlarında güvenli işletim, korozyon ve ark durumlarının önlenmesi ve artan işletim ömrü olarak verilebilir Zhang vd., (2018). Kablosuz güç transferi üzerine çalışmalar transfer mesafesi dikkate alınarak iki ana başlık altında kategorize edilmiş olup bunlar yakın alan ve uzak alan güç transferi teknolojileridir. Uzak alan güç transferi teknolojisi yüksek frekansta elektromanyetik dalgaların yayımına bağlı iken, yakın alan teknolojisi elektromanyetik dalgaların yayımına bağlı değildir. Yakın alan güç transferi teknolojisi, uzak alan güç transferi teknolojisine göre maliyet, güvenlik ve verimlilik açısından nispeten daha iyi performans göstermektedir Garnica vd., (2013). Bu durumdan dolayı yakın alan güç transferi teknolojileri uzak alan güç transferi teknolojilerine göre daha çok tercih edilmektedir. Uzak alan güç transferi teknolojileri, optik (laser) güç transferi Lim vd., (2019) ve mikrodalga (radyo) güç transferi Hu vd., (2021) teknolojileri olarak sınıflandırılmaktadır. Yakın alan güç transferi teknolojileri denildiğinde ise endüktif güç transferi Nguyen vd., (2021) ve kapasitif güç transferi Erel vd., (2022) öne çıkmaktadır.

Kablosuz güç iletiminde endüktif şarj teknolojisi alternatif manyetik alan kullanırken, kapasitif şarj teknolojisi alternatif elektrik alan kullanmaktadır. Endüktif ve kapasitif güç transferi teknolojileri birçok uygulamada tercih edilmektedir; bunlar taşınabilir cihaz, entegre devre, led sürücü ve biomedikal kablosuz şarj uygulamaları gibi düşük güçlü uygulamalar olarak karşımıza çıkarken, elektrikli araç uygulamaları ise yüksek güçlü kablosuz şarj uygulamaları kategorisinde karşımıza çıkmaktadır. Elektrikli araç kablosuz şarj uygulamaları statik ve dinamik uygulamalar olarak ele alınmıştır. Statik uygulamalar, elektrik aracın durağan halde kontak kapalı iken şarj olması prensibine dayalı iken, dinamik şarj hareketli halde kablosuz olarak şarj edilme prensibine dayalıdır. Endüktif güç transferi, kapasitif güç transferine göre yüksek verimlilik ve yüksek güç transfer yeteneği ile üstünlük sağlarken, kapasitif güç transferi düşük maliyet, sistemin hafifliği, metal malzemeler etrafında yüksek güvenilirlik ve düşük kayıp özellikleri ile üstünlük sağlamaktadır Sinha vd., (2021).

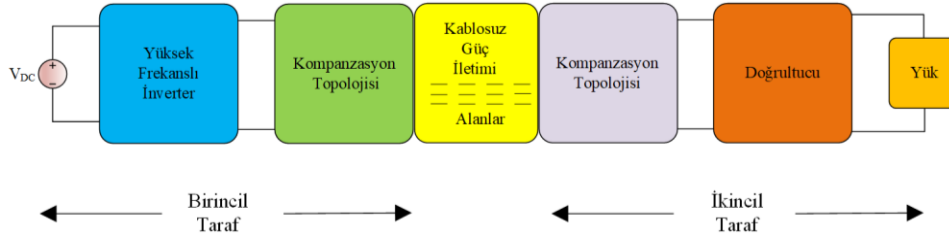
Bu çalışmada, endüktif ve kapasitif güç transferi teknolojileri üzerine yeni bir araştırma ortaya konulmuştur. Son zamanlarda öne çıkan bu iki kablosuz güç transferi teknolojisi nümerik olarak incelenmiştir. Bu kapsamda Scopus veri tabanı kullanılarak kapasitif ve endüktif güç transferi teknolojileri için 2002 ila 2022 tarihleri arasındaki çalışmalar yıllara, yazarlara, ülkelere, çalışmaların tipine ve konu alanlarına göre incelenmiştir. Her iki kablosuz güç transferi teknolojisi bu inceleme kapsamında karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar detaylı olarak sunulmuştur.

2. Kablosuz Güç Transferi Teknolojisinin Temel Çalışma Prensipleri

Kablosuz güç transferi teknolojisinin genel bir yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir Lu vd., (2017). Bu yapı, genel olarak birincil ve ikincil güç transferi taraflarından oluşmaktadır. Birincil taraf, doğru akım gerilim kaynağı ile beslenen yüksek frekanslı kıyıcı ve kompanzasyon topolojisinden oluşmaktadır. İkincil taraf ise kompanzasyon topolojisi, yüksek frekanslı doğrultucu ve yükten oluşmaktadır. Kablosuz güç transferi sisteminde yük olarak direnç yükü ya da batarya kullanılmaktadır. Sistemin güç transferi yapısı, endüktif güç transferinde bobinler ile oluşturulurken, kapasitif güç transferinde metal levhalarla oluşturulmaktadır. Metal levhalar olarak alüminyum ya da bakır levhalar kullanılmıştır. Bobinler ya da metal levhalardan oluşan güç transferi yapısı kompanzasyon topolojileri ile rezonans devreyi oluştururlar. Bobinlerin ya da metal levhaların farklı tasarımları sistemin performansında önemli değişikliklere sebebiyet vermekte olup bundan dolayı tasarım çalışmaları son zamanlarda önem arz etmektedir.

Kablosuz güç transferi sisteminin çalışması; yüksek frekanslı bir kıyıcı kullanılarak rezonans devrelerin alternatif gerilim ile beslenmesi ile başlar. Birincil kompanzasyon topolojisi ile alternatif gerilimin yükselttilip, alternatif akımın düşürülmesi sağlanmaktadır. Güç transferi yapısı sayesinde birincil taraftan ikincil tarafa aktarılan alternatif gerilim, ikincil kompanzasyon devresi ile düşürülerek akımın artması sağlanmıştır. Son olarak doğrultucu ile alternatif gerilim doğru gerilime dönüştürülerek bataryanın ya da direnç yükünün beslenmesi sağlanmıştır. Kompanzasyon devreleri endüktif güç transferinde genel olarak seri-seri, seri-paralel, paralel-seri ve paralel-paralel bağlantılar olarak karşımıza çıkarken (Machura&Li, 2019), kapasitif güç transferinde ise genel olarak L, LC-LC, LCL-LCL, LCLC-LCLC ve CLLC-CLLC bağlantı yapıları olarak kullanılmıştır Hu vd., (2020). Endüktif güç transferinde seri-seri bağlantı yapısı ve kapasitif güç transferindeki eşleşimi LC-LC kompanzasyon topolojisi çalışmalarda basit kullanım yapısı ve kolay analiz imkânı ile daha çok tercih edilmektedir.

Kıyıcı ve doğrultucu topolojileri için tam köprü tipi dönüştürücü yüksek güçlü uygulamalarda tercih edilirken, orta ve düşük güçlü uygulamalar için yarı köprü ve class E tipi dönüştürücüler tercih edilmiştir. Class E tipi dönüştürücü hem kıyıcı hemde doğrultucu tarafında daha çok MHz mertebelerinde yüksek anahtarlama frekansı gerektiren uygulamalarda tercih edilmiştir.



Şekil 1. Kablosuz güç transferinin genel bir yapısı.

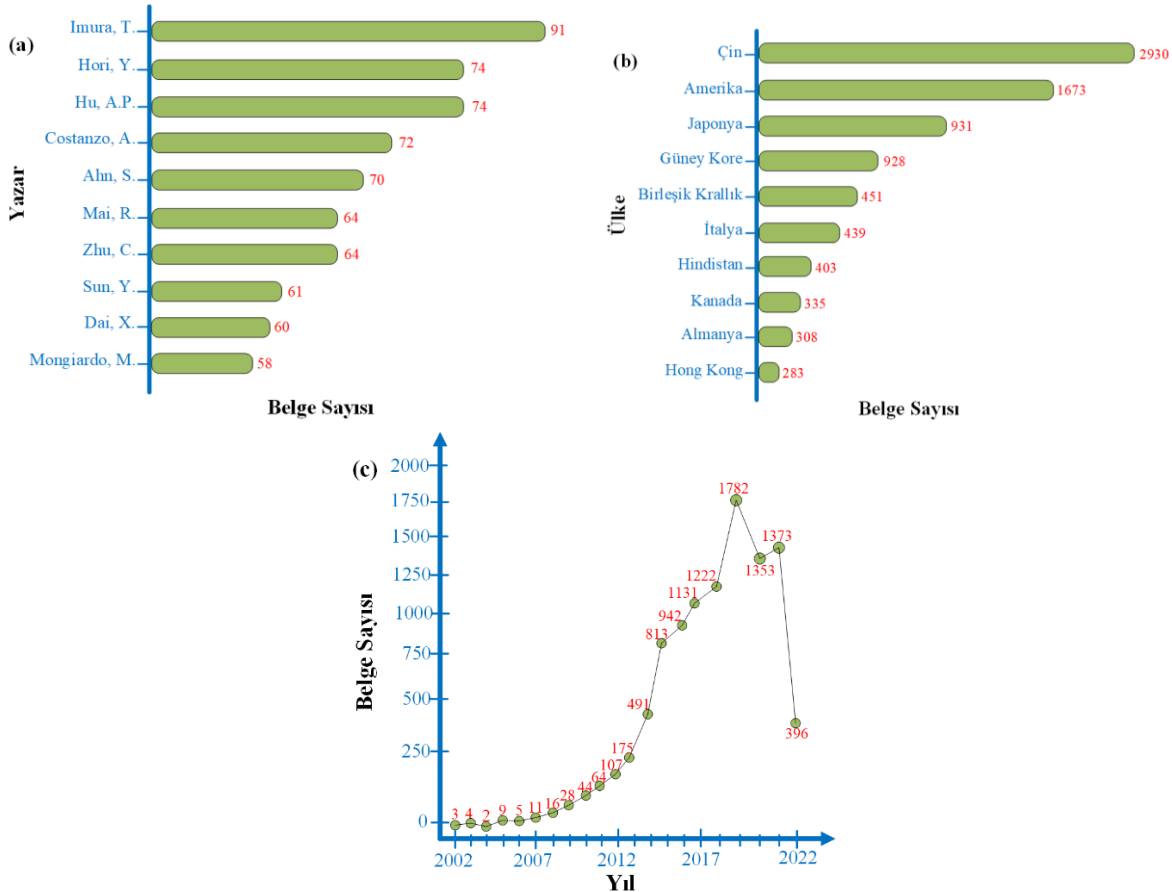
3. Endüktif ve Kapasitif Güç Transferi Sistemleri için Nümerik Araştırma

Yakın alan kablosuz güç transferi teknolojileri içinde öne çıkan endüktif ve kapasitif güç transferi sistemleri bu bölümde nümerik olarak incelenmiştir. İnceleme kriterleri olarak belgelerin yıllara, ülkelere ve yazarlara göre dağılımı sunulmuştur. Aynı zamanda, belge tipleri ve ilgili konu alanları yüzde karşılık olarak sunulmuştur. Endüktif ve kapasitif güç transferi teknolojileri ayrı ayrı incelenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırma bölümünde belirtilmiştir.

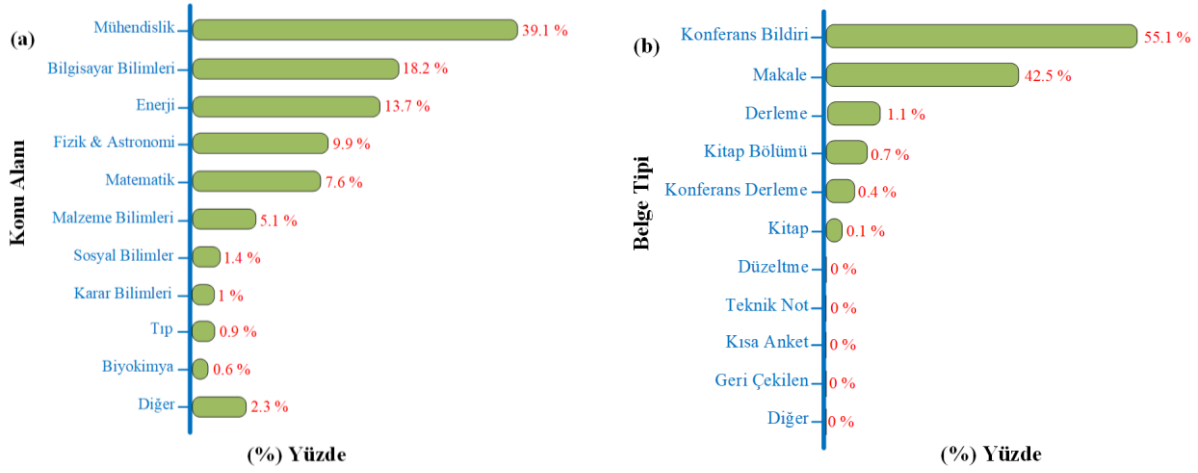
3.1. Endüktif Güç Transferi Sistemlerinde Nümerik Araştırma

Endüktif güç transferi sistemi 2002 ila 2022 yılları arasında Scopus veri tabanı kullanılarak incelenmiştir. Şekil 2’de literatür de var olan belge sayısı değişken parametre olarak kullanılmış ve böylece Şekil 2(a)’ da bu alanda en çok çalışmaya sahip olan yazarlar verilmiştir. Şekil 2(b)’ de ise endüktif güç transferi sistemi ile ilgili en çok çalışma yapılan ülkeler verilmiştir. Bu alanda Çin diğer ülkelere göre daha çok çalışmaya sahiptir. Şekil 2(c)’de endüktif güç transferi ile ilgili yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı sunulmuştur. Buna göre 2019 yılı diğer yıllara göre bu alanda daha çok çalışma yapıldığını göstermektedir.

Şekil 3’te yüzdelik pay değişken parametre olarak kullanılarak endüktif güç transferi uygulamalarında ilgili konu alanları ve belge tipleri verilmiştir. Şekil 3(a)’ da mühendislik alanı diğer alanlara göre daha fazla yer bulmuştur. Şekil 3(b)’ de ise belge tipleri arasında konferans çalışmaları daha fazla yer edinmiştir.



Şekil 2. (a) Belge sayısına göre yazarlar; (b) Belge sayısına göre ülkeler; (c) Belge sayısına göre yıllar.

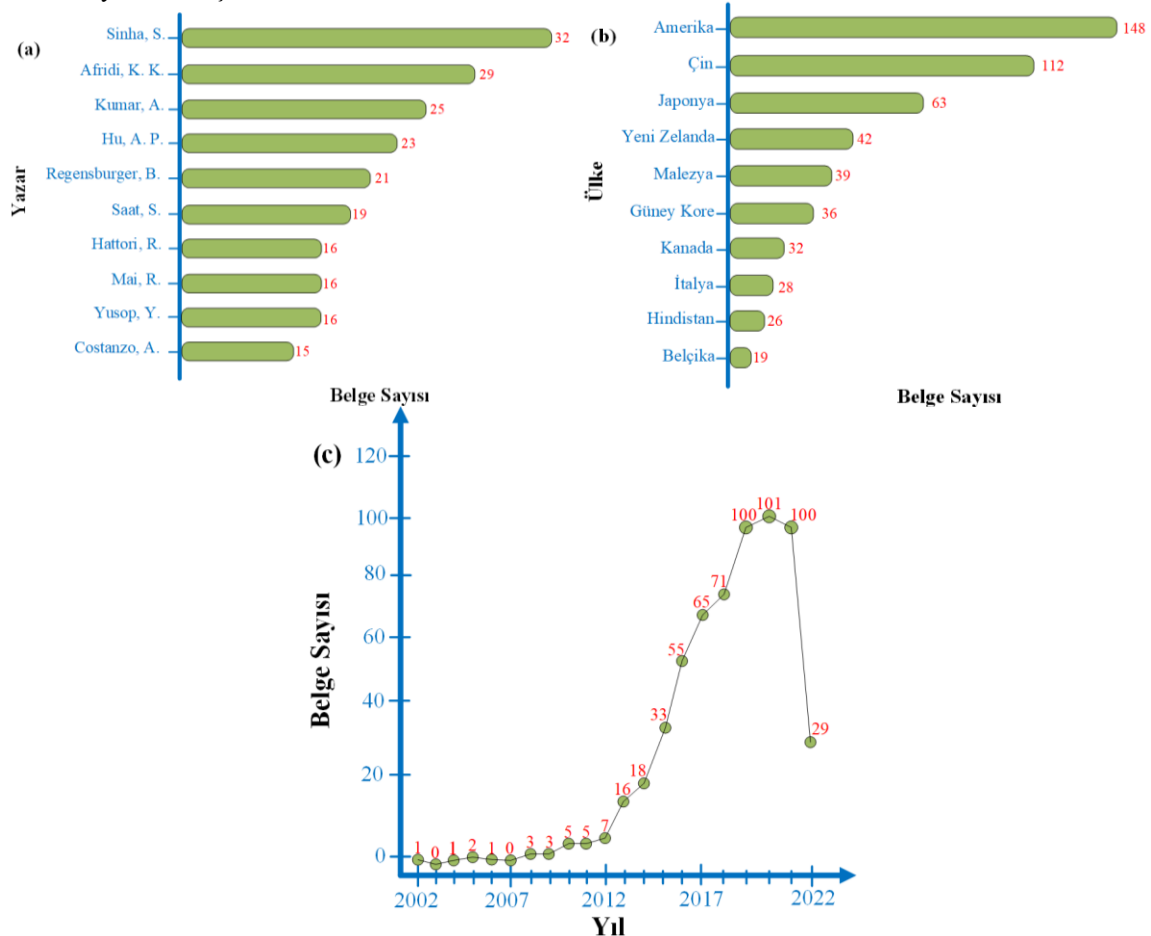


Şekil 3. (a) Konu alanı yüzdeler; (b) Belge tipi yüzdeler.

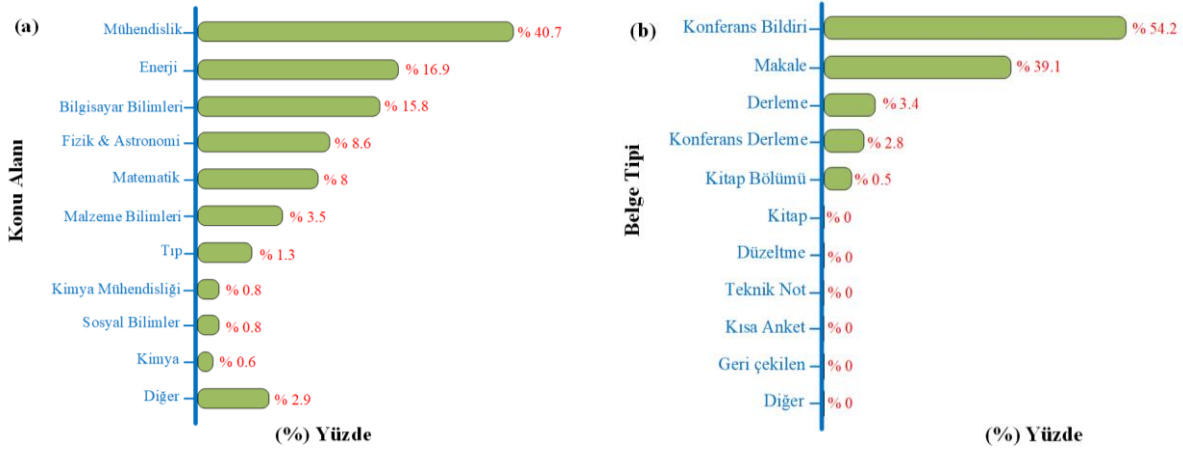
3.2. Kapasitif Güç Transferi Sistemlerinde Nümerik Araştırma

Kapasitif güç transferi sistemi 2002 ila 2022 yılları arasında Scopus veri tabanı kullanılarak incelenmiştir. Şekil 4' te literatür de var olan belge sayısı değişken parametre olarak kullanılmış ve böylece Şekil 4(a)' da bu alanda en çok çalışmaya sahip olan yazarlar verilmiştir. Şekil 4(b)' de kapasitif güç transferi sisteminde en çok çalışma yapılan ülkeler verilmiştir. Bu alanda Amerika diğer ülkelere göre daha çok çalışmaya sahiptir. Şekil 4(c)' de ise kapasitif güç transferi ile ilgili yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı sunulmuştur. Buna göre 2019 yılı diğer yıllara göre bu alanda daha çok çalışma yapıldığını göstermektedir.

Şekil 5'te yüzdeler pay değişken parametre olarak kullanılarak kapasitif güç transferi ile ilgili konu alanları ve belge tipleri verilmiştir. Şekil 5(a)' da mühendislik alanı diğer alanlara göre daha fazla yer bulmuştur. Şekil 5(b)' de ise belge tipleri arasında konferans çalışmaları daha fazla yer edinmiştir.



Şekil 4. (a) Belge sayısına göre yazarlar; (b) Belge sayısına göre ülkeler; (c) Belge sayısına göre yıllar.



Şekil 5. (a) Konu alanı yüzdeler dağılımı; (b) Belge tipi yüzdeler dağılımı.

3.3. Endüktif ve Kapasitif Güç Transferi Sistemlerinin Nümerik Olarak Karşılaştırılması

Bu bölümde nümerik olan incelenen endüktif ve kapasitif güç transferi sistemlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Yapılan incelemeler sonucunda endüktif güç transferi çalışmalarının kapasitif güç transferine göre daha çok yer aldığı görülmektedir. 2019 yılı her iki kablosuz güç transferi teknolojisi içinde zirve yılı olmuştur. Bu yılda, endüktif güç transferi ile ilgili 1782 çalışma yapılırken, kapasitif güç transferi ile ilgili 101 çalışma ortaya konulmuştur.

Belge sayılarının ülkeler bakımında kıyaslanması yapıldığında, endüktif güç transferi sistemi için Çin diğer ülkelere göre özellikle en yakın rakibi Amerika'ya göre bariz üstünlük sağlamıştır. Kapasitif güç transferi sistemi için Amerika, Çin'e göre üstünlük sağlamakta olup aradaki fark endüktif güç transferinde olduğu kadar bariz değildir.

Endüktif güç transferi sistemi ilgili konu alanları bakımından incelendiğinde, mühendislik alanı diğer alanlara göre üstünlük sağlamıştır. Mühendislikten sonra gelen alan bilgisayar bilimleri olmuştur. Kapasitif güç transferi sistemi incelendiğinde mühendislik alanı yine üstünlüğü diğer alanlara göre korurken, ikinci sırada endüktif uygulamalardan farklı olarak enerji alanı yer almaktadır.

Belge tipleri bakımından her iki kablosuz güç transferi sistemi incelendiğinde sonuçlar benzerlik göstermektedir. Araştırma sonucunda konferans bildirileri diğer belge tiplerine göre daha çok yüzdeler dilimi kapsamaktadır.

4. Sonuçlar

Kablosuz güç transferi üzerine çalışmalar son yıllarda gittikçe popüler hale gelmektedir. Bu makale, kablosuz güç transferi teknolojileri arasında önemi bir yer tutan endüktif ve kapasitif güç transferi sistemlerini nümerik olarak araştırmayı hedeflemiştir. Bu inceleme Scopus veri tabanı yardımı ile 2002 ila 2022 yıllarını kapsayacak şekilde yapılmıştır. Yapılan nümerik araştırma, belge sayılarının yazar, ülke ve yıllara göre değişimini ele almakla birlikte konu alanlarını ve belge tiplerini de yüzdeler dağılımı olarak sunmaktadır. Araştırmaya göre endüktif güç transferi sistemi üzerine yapılan çalışmaların kapasitif güç transferi sistemine göre çok daha yaygın olduğu sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak, endüktif ve kapasitif güç transferi teknolojileri üzerine nümerik bir araştırma sunularak literatüre önemli bir katkıda bulunulmuştur. Bu araştırma ayrıca endüktif ve kapasitif güç transfer sistemleri üzerine yapılan çalışmaların genel olarak yıllara göre artış göstermekte olduğunu kanıtlamıştır. Bu durum ise gelecekte her iki sistemin kablosuz şarj teknolojilerinde önemli bir rol oynayacağını göstermektedir.

Referanslar

Erel, M. Z., Bayindir, K. C., Aydemir, M. T., Chaudhary, S. K., & Guerrero, J. M. (2022). A Comprehensive Review on Wireless Capacitive Power Transfer Technology: Fundamentals and Applications. *IEEE Access*, 10, 3116-3143. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3139761>

Garnica, J., Chinga, R. A., & Lin, J. (2013). Wireless power transmission: From far field to near field. *Proceedings of the IEEE*, 101(6), 1321-1331.

Hu, B., Li, H., Li, T., Wang, H., Zhou, Y., Zhao, X., ... & Ghannouchi, F. (2021). A long-distance high-power microwave wireless power transmission system based on asymmetrical resonant magnetron and cyclotron-wave rectifier. *Energy Reports*, 7, 1154-1161.

- Hu, Z., Goodall, M., Zhao, L., Zhu, Q., & Hu, A. P. (2020, November). A comparative study of different compensation topologies for capacitive power transfer. In 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW) (pp. 389-394). IEEE.
- Lim, J., Khwaja, T. S., & Ha, J. (2019). Wireless optical power transfer system by spatial wavelength division and distributed laser cavity resonance. *Optics express*, 27(12), A924-A935.
- Lu, F., Zhang, H., & Mi, C. (2017). A review on the recent development of capacitive wireless power transfer technology. *Energies*, 10(11), 1752.
- Machura, P., & Li, Q. (2019). A critical review on wireless charging for electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 209-234.
- Marincic, A. S. (1982). Nikola tesla and the wireless transmission of energy. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (10), 4064-4068.
- Nguyen, H. T., Alsawalhi, J. Y., Al Hosani, K., Al-Sumaiti, A. S., Al Jaafari, K. A., Byon, Y. J., & El Moursi, M. S. (2021). Review Map of Comparative Designs for Wireless High-Power Transfer Systems in EV Applications: Maximum Efficiency, ZPA, and CC/CV Modes at Fixed Resonance Frequency Independent From Coupling Coefficient. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(4), 4857-4876.
- Sinha, S., Maji, S., & Afridi, K. K. (2021, June). Comparison of Large Air-Gap Inductive and Capacitive Wireless Power Transfer Systems. In 2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) (pp. 1604-1609). IEEE.
- Zhang, Z., Pang, H., Georgiadis, A., & Cecati, C. (2018). Wireless power transfer—An overview. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(2), 1044-1058.



e-issn: 1308-5514