

Kırıkkale University International Journal of Engineering Research and Development

International Peer Reviewed Journal
e-ISSN: 1308-5514



Volume: 14
Issue: 1

JANUARY 2022

Kırıkkale Üniversitesi
Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
Uluslararası Hakemli Dergi

Cilt: 14 Sayı:1 Ocak 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

Aralık 2021 / December 2021

Özel Sayı / Special Issue

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

- 21NiCrMo2 Çeliğinin Korozyon Hızına Borlama İşleminin Etkileri**
Effects of Boronizing on Corrosion Rate of 21NiCrMo2 Steel
1 *Salih Uğur Bayça, Hamza Efe* 1-9
DOI: 10.29137/umagd.1036043
- Design, Manufacturing and Testing of a Stirling Engine with Slider-Crank Mechanism**
2 *Hayri Yaman, Derviş Erol* 10-23
DOI: 10.29137/umagd.895498
- Kasis profilinin Pasif Süspansiyon Sistemli Çeyrek Araba Modeli Kullanılarak Sürüş Konforuna Etkisi**
3 *The Effect of Bump Profile on Driving Comfort Using a Quarter Car Model with Passive Suspension System* 24-30
Cihan Berke Cülcüloğlu, M. Taylan Daş
DOI: 10.29137/umagd.904771
- Beton ve Mermer Atıkları Kullanılarak Üretilen Bitümlü Sıcak Karışımların Optimum Bitüm Miktarının Bulanık Mantık Yöntemi ile Tahmin Edilmesi**
4 *Estimating the Optimum Bitumen Amount of Hot Bituminous Mixtures Produced Using Concrete and Marble Wastes by Fuzzy Logic Method* 31-44
Erdiñç Halis Alakara, Melih Naci Ağaoğlu
DOI: 10.29137/umagd.926303
- High-Risky Sectors in Terms of Work Accidents in Turkey**
5 *Hüseyin Ceylan, Ahmet Kaplan, Murat Bekar* 45-57
DOI: 10.29137/umagd.937910
- Türkiye’de Kullanılan Deprem Yönetmeliklerinin Özellikleri ve Eşdeğer Yatay Deprem Yüğü Hesabının Değişimi**
6 *Characteristics of Earthquake Codes Used in Turkey and Change of Equivalent Horizontal Force Calculation* 58-71
Sinan Cansız
DOI: 10.29137/umagd.948025
- İnsansız Sualtı Araçlarında (İSA) Hidrodinamik Sürüklenme ve Kaldırma Kuvvetlerinin Derinlik ve Hıza Bağlı Değişiminin HAD İle Analizi**
7 *Analysis of Depth and Speed-Dependent Variation of Hydrodynamic Drift and Lift Forces in Unmanned Underwater Vehicles (UUV) with CFD* 72-83
Gülten Yılmaz, Serhat Yılmaz
DOI: 10.29137/umagd.948797
- Correlation Between Surface, Thermal, Mechanical and Morphological Properties of Polylactic Acid/Polypropylene and Polylactic Acid/Polyamide 6 Blends**
8 84-94
Sibel Tuna, Meral Akkoyun
DOI: 10.29137/umagd.950070
- Cam Lifi Uzunluğu ve Oranının Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi**
9 *Effect of Glass Fiber Length and Ratio on Mechanical Properties of Cement Mortars* 95-102
Kenan Toklu, Yunus Emre Avşar, Mehmet Timur Cihan, Engin Bıçakçı
DOI: 10.29137/umagd.955365

- Atık Mermerlerin Parke Taşlarında İnce Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi**
10 *Investigation of Usability of Waste Marble as Fine Aggregate in Paving Stones* 103-114
Melih Naci Ağaoğlu, Ezgi Çeviren, Erdiç Halis Alakara
DOI: 10.29137/umagd.956063
- Hareketli Bir Plakadan Olan Isı Transferinin farklı Nanoakışkanlar ve Çarpan Jetle İncelenmesi**
11 *Heat Transfer Analysis of a Moving Plate with different Nanofluids and Impinging Jet* 115-127
Mustafa Kilic, Mine Efeoğlu
DOI: 10.29137/umagd.958557
- Ham Deri Yükleme Ekipmanlarının İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından AHP ve MAUT Yöntemleri ile Belirlenmesi**
12 *Determination of Raw Leather Loading Equipment in terms of Occupational Health and Safety by AHP and MAUT Methods* 128-140
Güfte Caner Akın, Tufan Öztürk
DOI: 10.29137/umagd.971517
- Ergonomik Personel Görev Çizelgeleme Problemi: Çok Amaçlı Bir Kısıt Programlama Modeli ve Vaka Çalışması**
13 *Ergonomic Personnel Task Scheduling Problem: A Multi-objective Constraint Programming Model and A Case Study* 141-154
Mehmet Pınarbaşı
DOI: 10.29137/umagd.973271
- A Substantially Improved New Algorithm for Flowshop Scheduling Problem with Uncertain Processing Times**
14 155--163
Muberra Allahverdi
DOI: 10.29137/umagd.978415
- Kriyojenik Hidrojen Yakıtlı 100 kN İtki Kapasiteli Bir Roketin RPA Programı ile Kavramsal Tasarım ve Analizi**
15 *Conceptual Design and Analysis of a Cryogenic Hydrogen Fueled 100 kN Thrust Capacity Rocket with RPA Program* 164-175
Safa Korkmaz, Hayri Yaman
DOI: 10.29137/umagd.982713
- Fuzzy Measurement System Analysis Approach: A Case Study**
16 176-185
Eda Beylihan, Sermin Elevli
DOI: 10.29137/umagd.986483
- Tek ve Çift Doz Aşı Uygulamalarının COVID-19 Vaka Sayıları Üzerinden Benzetim Yöntemiyle Karşılaştırılması**
17 *Comparison Between One and Two Dose Vaccine Applications Based on COVID-19 Cases with Simulation Method* 186-194
Mustafa Demirbilek
DOI: 10.29137/umagd.999729
- Çok Yüksek Hacimde Uçucu Kül İçeren Sentetik ve 5D Çelik Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mühendislik Özellikleri**
18 *Engineering Properties of Very High Volume Fly-ash Cementitious Composites Reinforced with Synthetic and 5D Steel Fibers* 195-207
Oğuzhan Öztürk
DOI: 10.29137/umagd.999940

- Yenilenebilir Hibrit Enerji Santrali Uygulamasında Tesis Yer Seçimi**
19 *Facility Location Selection in Renewable Hybrid Power Plant Implementation* 208-227
Mert Kara, Yiğitcan Ercan, Rabia Yumuşak, Ahmet Cürebal, Tamer Eren
DOI: 10.29137/umagd.1011212
- Investigating the Microstructural Properties and Phase Distributions of TIG Welded**
20 **AISI/SAE 304L Stainless Steel Runners in TNT Filled Ammunitions** 228-236
Oğuz Akgül, Aziz Barış Başyığıt
DOI: 10.29137/umagd.1015109
- A Linear Programming Model for Latency Minimization and Fault Tolerance in**
21 **Software Defined Network Controller Placement** 237-245
Yasin İnağ, Mehmet Demirci
DOI: 10.29137/umagd.1029913
- Yağış Zaman Serilerinin Süreklilik Analizi: Kırşehir Örneği**
22 *Persistence of Precipitation Time Series: Kırşehir Case Study* 246-255
Sertac Oruc
DOI: 10.29137/umagd.868317
- Farklı Kalıp ve Fırın Sıcaklıkları Kullanılarak Yarı Katı Kalıplama Yöntemi ile**
23 **Şekillendirilen A356 Alaşımının Sertlik ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi** 256-261
The Investigation of Hardness and Microstructural Properties of A356 Alloy Shaped by Semi-Solid Molding Method Using Different Mold and Furnace Temperatures
Doğan Şimşek, İjlal Şimşek, Dursun Özyürek
DOI: 10.29137/umagd.1038327
- Alümina Porselen Bünyelerde Spodumen İlavesinin Teknik Özelliklere Etkisinin**
24 **Araştırılması** 262-270
Investigation of the Effect of Spodumene Addition on Technical Properties in Alumina Porcelain Bodies
Baran Tarhan, Müge Tarhan
DOI: 10.29137/umagd.1036965
- Aramid Elyaf Takviyeli Polimer Matris Kompozitlerin Mekanik Deney Sonuçlarının**
25 **Yapay Sinir Ağlarıyla Tahminleri ve İstatistiksel Analizleri** 271-281
Predictions and Statistical Analysis of Mechanical Experiment Results of Aramid Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites with Artificial Neural Networks
Fatih Buyrul, Volkan Ateş, Altan Tunçel, Azmah Hanim Mohamed Ariff, Recep Çalın
DOI: 10.29137/umagd.1041175
- Lazer Ablasyonu ile Sentezlenmiş Levan Kaplı Altın Nanoparçacıkların siRNA**
26 **Transfeksiyon Ajanı Olma Potansiyeli Üstüne Çalışma** 282-298
A Study on The siRNA Transfection Reagent Potential of Levan-Capped Gold Nanoparticles Synthesized by Laser Ablation
Ömer Aktürk, Beste Çağdaş Tunalı
DOI: 10.29137/umagd.943584
- Tüketici Fiyat Endeksi (TÜFE) Hesaplamasında Yapay Zekâ Kullanan**
27 **Çalışmalarının İncelenmesi** 299-315
Investigation of Studies Using Artificial Intelligence in Calculating Consumer Price Index (CPI)
Abdulcebar On, Necaattin Barışçı
DOI: 10.29137/umagd.1022087

- Toz Metalurjisi ile Üretilen Cu-Al-Ni Alaşımlarında Yaşlandırma Süresinin Aşınma Davranışlarına Etkisi**
28 *The Effect of Aging Time on Wear Behavior of Cu-Al-Ni Alloys Produced by Powder Metallurgy* 316-321
Doğan Şimşek
DOI: 10.29137/umagd.1038160
- Developing A New Scheduling Algorithm for Wi-Fi 6 Technology Based on Machine Learning**
29 322-337
İbrahim Masri, Erdal Erdal
DOI: 10.29137/umagd.1075903
- PLC Kontrollü Glove Box Tasarımı ve Atmosferindeki Oksijen Seviyesinin Kontrolü**
30 *PLC-Controlled Glove Box Design and Control of the Oxygen Level in the Glove Box Atmosphere* 338-346
Mustafa Doğan
DOI: 10.29137/umagd.1004275
- Negatif Poisson Oranına Sahip Sandviç Kompozitlerin Statik Davranışının Belirlenmesi**
31 *Determination of Static Behavior of Sandwich Composites with Negative Poisson Ratio* 347-359
Munise Didem Demirbaş, Onur Demir
DOI: 10.29137/umagd.1032060
- Yaşanan İş Kazalarının Kaza Saatlerine ve Cinsiyete Göre İstatistiki Olarak Değerlendirilmesi ve Yorumlanması**
32 *Statistical Evaluation And Interpretation of Occupational Accidents According to The Hours of The Accident and Gender* 360-368
Uğur Çavdar, Murat Manyaslı, Erim Akkaya, Demirali Sevener, Ziya Tüfekçi
DOI: 10.29137/umagd.880158



21NiCrMo2 Çeliğinin Korozyon Hızına Borlama İşleminin Etkileri

Effects of Boronizing on Corrosion Rate of 21NiCrMo2 Steel

Salih Uğur Bayça¹ , Hamza Efe¹ 

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 71450 Yahşihan, Kırıkkale, TÜRKİYE.

Başvuru/Received: 13/12/2021

Kabul / Accepted: 25/12/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Borlama, bir metal yüzeyini seramik tabaka ile kaplama işlemidir. Borlama işlemi sonucunda, metalin bütün yüzeyi ince bir seramik metal-borür tabakası ile kaplanmaktadır. Bu çalışmanın amacı, katı borlama yöntemi ile 21NiCrMo2 çeliğinin korozyon dayanımı artırmaktır. Bu çalışmada, 21NiCrMo2 çeliği 700°C sıcaklık ve 4, 8, 12 ve 16 saat sürelerde borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama ajanı olarak yerli borlama ajanı olan Baybora-1 kullanılmıştır. Numunelerin metal-borür tabakası ve geçiş tabakasının morfolojisi SEM cihazı ile belirlenmiştir. Borlanmış numunelerin yüzeyinde oluşan metal-borür tabakasının faz analizleri XRD cihazı ile yapılmıştır. Borlanmış ve borlanmamış çelik numunelerin korozyon deneyi ASTM G31-72 standardına göre sıcak sülfürik asit çözeltisinde yapılmıştır. Numunelerin korozyon dayanımı ağırlık kaybı yöntemi ile belirlenmiştir. Borlanmış numunelerin korozyon dayanımı 323 mm/yıl iken borlanmamış numunenin 491 mm/yıl olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Borlama, Seramik metal-borür tabaka, korozyon, 21NiCrMo2 çelik”

Abstract

Boriding is the process of coating the metal surface with a ceramic layer. As a result of the boronizing process, the entire surface of the metal is coated with a thin ceramic metal-boride layer. The aim of this study is to increase the corrosion resistance of 21NiCrMo2 steel by solid boriding method. In this study, 21NiCrMo2 steel was borided at 700°C and for 4, 8, 12 and 16 hours. Baybora-1, a domestic boronizing agent, was used as the boronizing agent. The morphology of the metal-boride layer and the transition layer of the samples were determined by SEM device. The phase analyzes of the metal-boride layer formed on the surface of the boronized samples were made with the XRD device. Corrosion test of boronized and non boronized steel samples was carried out in hot sulfuric acid solution according to ASTM G31-72 standard. The corrosion resistance of the samples was determined by the weight loss method. While the corrosion resistance of boronized samples was 323 mm/year, it was determined that the non-boronized sample was 491 mm/year.

Key Words

“Boronizing, Ceramic metal-boride layer, corrosion, 21NiCrMo2 steel”

1. Giriş

Borlama, metallerin aşınmasını önlemek için metal yüzeyini seramik metal-borür tabakası ile kaplama işlemidir. Bor elementinin yüksek sıcaklıkta metal yüzeyine difüzyonu ile metal yüzeyinde çok sert bir metal-borür tabakası oluşur. Borlama işlemi ile metal yüzeyinde 5–300 µm kalınlığında seramik bir tabaka oluşur. Bu seramik tabaka, çeliklerde, demir-borür (Fe₂B) tabakası oluşur. Seramik metal-borür tabakası, testere dişi yapıda olduğu için metal-borür tabakasının alt tabakaya yapışması çok kuvvetlidir. Borlama işleminde, katı, sıvı ve gaz borlama gibi yöntemler bulunmaktadır. Katı borlama yöntemi, sıkı kapatılmış paslanmaz çelik kutularda yapılmaktadır. Borlama ajanı kapalı kutuya konular ve iş parçası bu borlama ajanı içerisinde bekletilir. Borlama sıcaklığı 700 – 1100°C arasında değişebilmektedir. Borlama süresi 1 – 20 saat arasında yapılmaktadır. Çeliklerin borlanması sonucu çelik yüzeyinde demir-borür tabakası oluşur. Demir borürler termal ve elektrik iletkenliği gibi özelliklerine ek olarak yüksek sertlik gibi tipik seramik özellikleri de gösteren bileşiklerdir. Tane sınırları, dislokasyonlar, atom boşlukları gibi mikro hatalar ile yüzey pürüzlülükleri ve çizikler gibi yüzeyin daha reaktif olduğu yerler borür tabakası oluşumunun başlangıç noktalarıdır. Bu noktalarda metal-borür çekirdekleri oluşur ve büyür (Matuschka, 1980; Fichtl, 1981; Xu vd, 2000; Bayça vd., 2004). Akbayır v.d. (2005) AISI 1030 çeliğini, 900, 950, 1000, 1050 °C sıcaklıklarda 6 saat Ekabor-2 tozu ile borlama yapmışlardır. AISI 1030 çeliğinin metal-borür tabaka kalınlıkları sırası ile 178, 208, 266 ve 341 µm olarak ölçmüşlerdir. Borlama sıcaklığının artması ile metal-borür tabaka kalınlığı artmıştır. Kayali v.d. (2012) AISI 52100 çeliğini, 850, 900, 950 °C sıcaklıklarda 4 saat Ekabor-2 tozu ile borlama yapmışlardır. AISI 52100 çeliğini borlama sonucunda 30 – 187 µm arasında metal-borür tabaka kalınlığı ölçmüşlerdir. Borlama sıcaklığının artması ile metal-borür tabaka kalınlığı artmıştır. Kayali v.d. (2012) AISI 440C çeliğini, 850, 900, 950 °C sıcaklıklarda 4 saat Ekabor-2 tozu ile borlama yapmışlardır. AISI 440C çeliğini borlama sonucunda 6 – 58 µm arasında metal-borür tabaka kalınlığı ölçmüşlerdir. Borlama sıcaklığının artması ile metal borür tabaka kalınlığı artmıştır. Genel v.d. (2006) AISI H13 çeliğini, 900 °C sıcaklıklarda 5 saat Ekabor-1 tozu ile borlama yapmışlardır. AISI H13 çeliğinin metal-borür tabaka kalınlığını 30 µm olarak ölçmüşlerdir. Uslu v.d. (2007) AISI 1040 çeliğini, 950 °C sıcaklıklarda 8 saat Ekabor-3 tozu ile borlama yapmışlardır. Metal-borür tabaka kalınlığını 190 µm olarak ölçmüşlerdir. Calik v.d. (2009) AISI 8620 çeliğini Ekabor-II borlama ajanı kullanarak katı yöntem ile 1210 K sıcaklıkta ve 4 saat süreyle borlamışlardır. Numunenin sertliği 395 HV iken borlama sonucu 1610 HV değerine yükseldiğini belirtmişlerdir. Testere dişi morfolojiye sahip bir metal borür tabakasının oluştuğunu rapor etmişlerdir. Oluşan metal borür tabakasının 55-65 µm kalınlıkta olduğunu ifade etmişlerdir. An v.d. (2012) AISI 8620 çeliğini 20 mm çap ve 10 mm uzunlukta 860 °C sıcaklıkta 5 saat süre ile katı borlama yöntemi borlamışlardır. Borür tabakasında FeB ve Fe₂B fazları gözlemlenmiştir. Borür tabaka kalınlığını 65 µm ölçmüşlerdir. Testere dişi morfolojiye sahip bir borür tabakası elde etmişlerdir. Borlanmış ve borlanmamış çeliklerin korozyon testi H₂S doymuş petrol sahası suyu ortamında yapmışlardır. Borlanmış AISI 8620 çeliğinin borlanmamış numuneye göre korozyon dayanımının mükemmel olduğunu beyan etmişlerdir. Gunes vd. (2013) AISI 8620 çeliğini sıvı borlama yöntemi ile borlamışlardır. 750 °C sıcaklıkta 5 saat borlama sonucunda 91 µm kalınlığında ve 1598-1976 HV sertliğinde ve FeB ve Fe₂B fazlarından oluşan bir borür tabakası elde etmişlerdir. Borlama işleminin aktivasyon enerjisini 99,773 kJ/mol olarak hesaplamışlardır. Gunes vd (2011) AISI 8620 çeliğini 800 °C sıcaklıkta 5 saat borlama süresinde 35 µm borür tabaka kalınlığı elde etmişlerdir. Borür tabaka kalınlığı borlama sıcaklığı ve borlama süresinin artması ile arttığını rapor etmişlerdir. Borür tabakasında FeB ve Fe₂B fazlarını gözlemlenmiştir. An v.d. (2012) AISI 8620 çeliğini 800 °C sıcaklıkta 5 saat süre ile borlamışlardır. Numunenin sertliği 340 HV iken katı borlama sonucunda 1200–1340 HV sertliğine yükseldiğini ifade etmişlerdir. Borlanmış çelik, hidrojen sülfür ile doymuş petrol sahası suyu korozyona maruz bırakıldığı zaman borlanmamış çeliğe göre daha yüksek korozyon direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Krelling ve ark. (2017), AISI 1020 çeliğini 1000 °C'de 4 saat katı borlama yöntemi ile borlama işlemi sonucunda çelik yüzeyinin metal-borür tabakası ile kaplandığını rapor etmişlerdir. Kaplama yapısının sertliği ve aşınma direnci incelenmiştir. XRD analizi tek fazlı bir Fe₂B yapısının varlığını göstermiştir. Elde edilen demir-borür yapı 177 µm kalınlığa ve 2100 HV_{0.01} sertliğe sahiptir. Yerli borlama ajanı Baybora-1 kullanılarak yapılan borlama çalışmalarından bazıları aşağıda verilmiştir. Bican v.d. (2020) AISI 5140 çeliğini yerli borlama ajanı (Baybora-1) ile borlamışlar ve 950 °C sıcaklıkta 4 saat borlama sonucunda 90 µm metal-borür tabaka kalınlığına ulaşmışlardır. Bayça v.d. (2020) AISI 4140 çeliğini yerli borlama ajanı (Baybora-1) ile borlamışlardır. Borlanmamış çeliğin korozyon hızı 0,01 mm/yıl iken 950°C sıcaklıkta 4 ve 6 saat borlanmış çeliğin korozyon hızı 0,007 mm/yıl değerine düşmüştür. Ocak-Araz vd (2021) 304L çeliği yerli borlama ajanı (Baybora-1) ile borlamışlardır. 950 °C sıcaklıkta 2 saat borlama sonucunda 20 µm iken 8 saat borlama sonucunda 51 µm seramik metal-borür tabakası elde edilmiştir. Nükleer uygulamalar için radyasyon koruyucu malzeme olarak borlanmış çelik içeren kompozit malzemeler, mikron boyutunda bor kullanılan kompozit malzemelerden daha uygundur. Bican vd. (2021) 304L çeliğini yerli borlama ajanı (Baybora-1) ile borlamışlardır. Borlanmış ve borlanmamış çelikler oldukça farklı erozyon dirençlerine ve aşındırıcı parçacıkların çarpma açısına bağlıdır. Küçük çarpma açılarında, borlanmış çelik yüksek bir erozyon direncine sahiptir, ancak büyük çarpma açılarında erozyon özellikleri, borlanmamış çeliğe göre daha düşüktür. Borlama çeliğin yüzeyini kırılğan hale getirdiğinden, aşındırıcı parçacıkların çarpma açısının büyümesi, sünek bir malzeme için tipik olandan kırılğan bir malzeme için tipik olan erozyon davranışını değiştirir.

Borlama işlemleri ile çeliklerin yüzeyinde 5–300 µm kalınlığında seramik metal-borür tabakası oluşmaktadır. Düşük sıcaklıklarda (750 °C) ince seramik metal-borür tabakası oluşur iken yüksek sıcaklıklarda (1050 °C) kalın seramik metal-borür tabakası oluşmaktadır. Kısa borlama süresinde (1h) ve sabit sıcaklıklarda ince seramik metal-borür tabakası oluşur iken uzun borlama süresinde (8 h) ve sabit sıcaklıklarda kalın seramik metal-borür tabakası oluşmaktadır. Literatürde, genel olarak ticari ve ithal Ekabor markası ile satılan katı borlama ajanı kullanılmıştır. Ekabor markasının birden fazla borlama ajanı bulunmaktadır. Bunlar, Ekabor-1, Ekabor-2 ve Ekabor HM gibi adlarla piyasada satılmaktadır. Borlama işlemleri ile çeliklerin korozyon direncinin arttığı literatürde rapor edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, 21NiCrMo2 çeliğinin korozyon dayanımına borlama işleminin etkilerini araştırmaktır. Borlama işleminde, Baybora-1yerli borlama ajanı kullanılmıştır. Borlanmamış ve borlanmış numunelerin SEM analizleri, kimyasal analizleri, XRD

analizleri yapılmıştır. Çeliğin korozyon hızını belirlemek için ASTM G31-72 standardında belirtilen ağırlık kaybı yöntemi kullanılarak korozyon testi yapılmıştır. Çelik numuneler, 56°C sıcaklıktaki, % 10 sülfürik asit ve % 90 saf su içeren bir çözeltiye daldırılmış ve ağırlıkları ölçülmüştür.

2. Malzeme ve yöntem

2.1. Malzeme

Borlama yöntemi ile seramik metal-borür kaplama işleminde altlık malzeme olarak 21NiCrMo2 çelik seçilmiştir. 21NiCrMo2 çelik çubuk torna ile 15 mm çapında ve 20 mm uzunluğunda silindirik numuneler hazırlanmıştır.

2.2. Borlama İşlemi

Bu çalışmada yeni bir borlama ajanı olan ve Patenti Salih Uğur BAYÇA tarafından alınan yerli borlama ajanı (Bayça, 2021) kullanılmıştır. Bu borlama ajanı Baybora-1 markası ile tanımlanmıştır. Katı borlama, 304L paslanmaz çelik potada gerçekleştirilmiştir. Çelik pota elektrikli kamara tip fırında ısıtılmıştır.

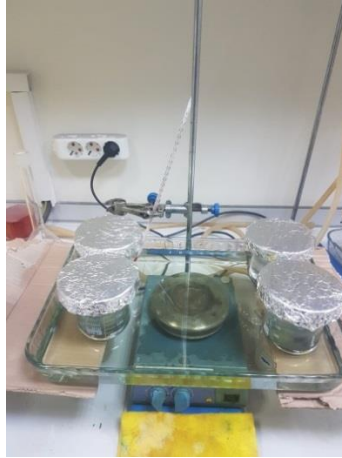
Tipik bir borlama deneyinde, toz borlama ajanı potanın hacimce yarısına kadar doldurulmuştur. Çelik numuneler bu toz borlama ajanı içine gömülmüştür. Potanın geri kalan hacmine deoksidan malzeme doldurulmuştur. Pota kapağından hava sızdırmayı önlemek için vidalı kapak sıkıca kapatılmış ve fırına yerleştirilmiş ve fırında belirli sıcaklık ve sürede ısıtılmıştır. Bu sürenin sonunda, pota fırında soğumaya bırakılmıştır.

2.3. Numune Hazırlama

Borlanmış ve borlanmamış silindirik numuneler kesme cihazı ile yaklaşık 2 mm kesilmiştir. Kesilmiş numune yüzeyleri sırasıyla 800 ve 1200 gritlik zımpara kağıtları ile zımparalanmıştır. Parlatma işlemi 6µ elmas solüsyonlar ile keçe kullanılarak yapılmıştır. Mikro yapının incelenmesi için gerekli olan dağlayıcı olarak %4 nital çözeltisinde numuneler sırasıyla 5 saniye sürede bekletilip suyla temizlenmiştir. Temizlenen numunelerin üzerine etil alkol damlatılarak ve kurutulmuştur.

2.4. Korozyon Testi

21NiCrMo2 çeliğinin korozyona direncini belirlemek için ağırlık kaybı yöntemi kullanılmıştır. ASTM G31-72 standardında belirtilen ağırlık kaybı yöntemi kullanılarak korozyon testi yapılmıştır (ASTM, 2004). Ağırlık kaybı ölçümleri, 200 mL test çözeltileri içeren 250 mL'lik bir beherde yapılmıştır. Çelik numuneler zımpara kağıdı ile temizlenmiş ve 0.1 mg hassasiyetteki bir terazide tartılmıştır. Korozyon deney düzeneği Şekil 1 de verilmiştir.



Şekil 1. Korozyon test düzeneği

Korozyon deneyinde, ısıtıcı manyetik karıştırıcı üzerinde bulunan cam kap üzerine beherler yerleştirilmiştir. Cam kap içine su konularak manyetik karıştırıcı ile ısıtılmıştır. Çelik numuneler, 56°C sıcaklıktaki, % 10 sülfürik asit ve % 90 saf su içeren bir çözeltiye daldırılmış ve 1, 10 ve 24 saat boyunca bekletilmiştir. Korozyon çözeltisinden çıkan çelik numuneler saf su ile yıkanmış ve kurutulmuştur. Kuru numuneler terazide tartılmıştır. Korozyon hızı (CR), aşağıda verilen denklem ile hesaplanmıştır.

$$CR = \frac{W}{d A t}$$

Burada CR, cm/saat cinsinden korozyon hızı, W numunenin g cinsinden ağırlık kaybıdır, A numunenin cm² cinsinden yüzey alanıdır, d numunenin g/cm³ cinsinden yoğunluğu ve t numunenin çözeltide bekletilme süresidir.

2.5. Karakterizasyon

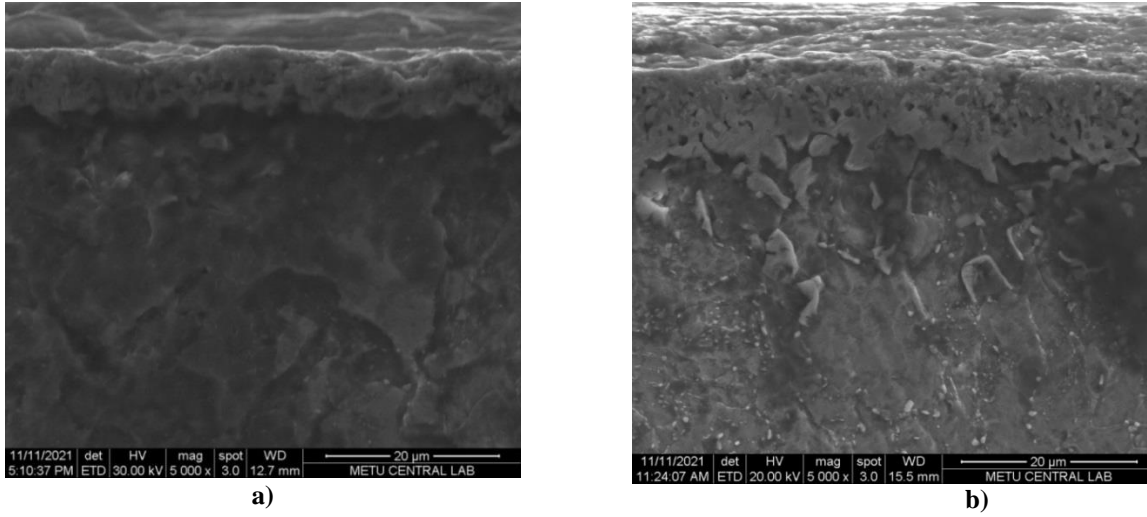
Metal-borür fazlar bir Rigaku Ultima IV marka X-ışını difraktometresi kullanılarak belirlenmiştir. Tarama hızı 2 derece/dak, tarama eksenini 2 teta/teta, tarama modu sürekli ve örnekleme genişliği 0,200 derece idi. Tartımlar Sartorius marka terazi ile yapılmıştır. SEM analizi FEI Quanta-400F cihazı ile yapılmıştır. Çeliğin kimyasal analizi Metek Spectromaxx spektrometre cihazı ile yapılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Mikroyapı

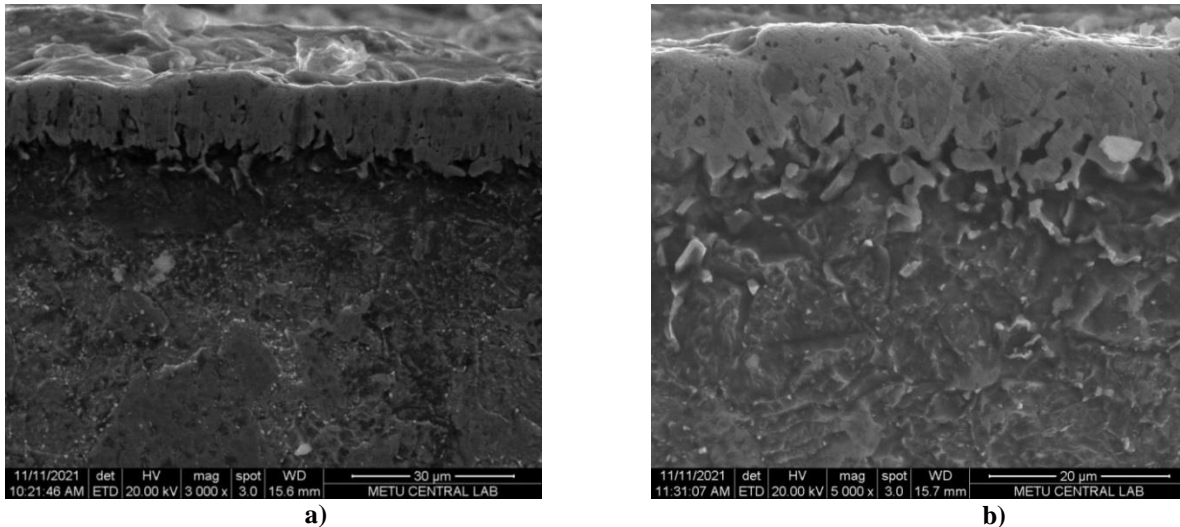
Metal-borürler kovalent bağlı bileşikler olduğu için metal-borürler oksit olmayan seramik grubundadır. Bir metal borlama işlemine tabi tutulduğu zaman metal yüzeyinde mikrometre kalınlığında metal-borür tabakası ile kaplanmaktadır. Bu yüzden, borlama işlemi metal yüzeyini seramik bir tabaka ile kaplama olarak da adlandırılabilir.

Bu çalışmada, çelik silindirik numuneler 1-2 mm kesilerek zımparalanmış, dağlanmış ve parlatılmıştır. Çelik numunenin parlatılmış üst yüzeyini görüntülemek için SEM analizi yapılmıştır. 21NiCrMo2 çeliği 700°C sıcaklıkta ve 4 saat süre ile borlanmış numunelerin SEM analizi Şekil 2a da verilmiştir. Çelik numunenin borlanması sonucu yüzeyde testere dişi bir morfolojiye sahip olduğu görülmüştür. 21NiCrMo2 çeliği 700°C sıcaklıkta ve 4 saat süre ile borlanmış yüzeyinde 7,70 µm kalınlığında metal-borür tabakası elde edilmiştir. 700°C sıcaklık ve 8 saat süre ile borlanmış numunelerin yüzeyinde 10,20 µm kalınlığında metal-borür tabakası ölçülmüştür (Şekil 2b).



Şekil 2. a) 700 °C sıcaklıkta 4 saat borlanmış numune SEM analizi, b) 700 °C sıcaklıkta 8 saat borlanmış numunenin SEM analizi

21NiCrMo2 çeliği 700°C sıcaklıkta ve 12 saat süre ile borlanmış ve çelik yüzeyinde 12,25 µm kalınlığında metal-borür tabakası gözlenmiştir (Şekil 3a). Bu çelik numune 700°C sıcaklıkta ve 16 saat süre ile borlanmış ve çelik numune yüzeyinde 15,23 µm kalınlığında metal-borür tabakası oluşmuştur (Şekil 3b). Bu metal-borür tabakası testere dişi bir morfolojide olduğu görülmektedir.



Şekil 3. a) 700°C sıcaklıkta 12 saat borlanmış numune SEM analizi, b) 700°C sıcaklıkta 16 saat borlanmış numunenin SEM analizi

SEM analizinde 700°C sıcaklıkta borlanmış numunelerin borlama süresinin artması sonucu seramik metal-borür tabaka kalınlığı artmıştır. Seramik metal-borür tabaka kalınlığının artması beklenen bir durumdur. Borlama sıcaklığı sabit iken borlama süresinin artması ile metal-borür tabakasının kalınlığı artmıştır. Bu artış, borlama işlem süresinin artmasıyla altlık metale bor difüzyonunun devam etmesinden kaynaklanmış olabilir.

3.2. Faz Analiz Sonuçları

Bu çalışmada kullanılan çeliğin kimyasal analizi spektrometre cihazı ile yapılmıştır. Tablo 1 de borlanmamış 21NiCrMo2 çeliğinin kimyasal bileşimi verilmiştir.

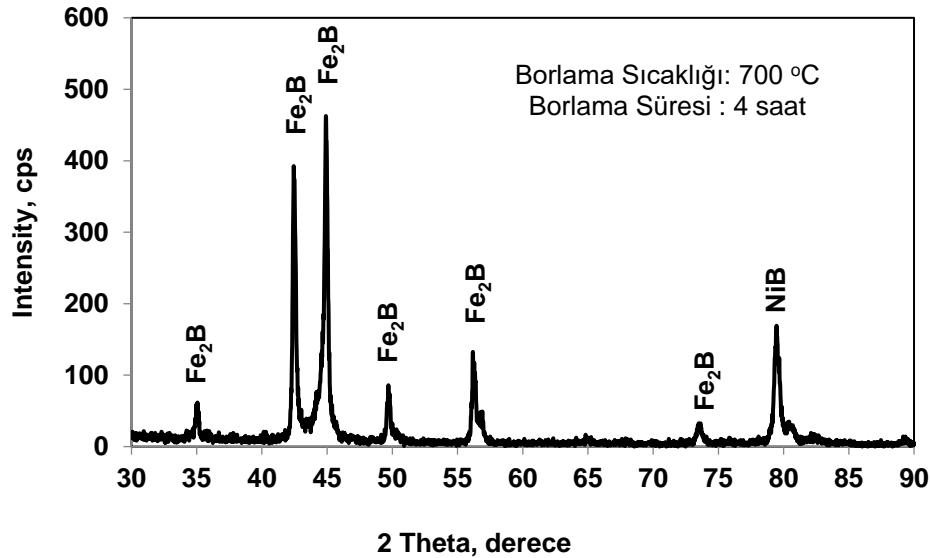
Tablo 1. Borlanmamış 21NiCrMo2 çeliğinin kimyasal bileşimi

Element	%
C	0,1920
Mn	0,8370
Ni	0,5710
Cr	0,5200
Si	0,2700
Mo	0,2340
P	0,0134
S	0,0134
Co	0,0123
Al	0,0423
Fe	97,200

Çeliğin kimyasal analizinde ana element demir iken minör elementler olarak mangan, nikel, krom, silisyum, molibden ve karbon içerdiği belirlenmiştir. 21NiCrMo220 çeliğinin düşük alaşımlı çelik grubunda olduğu Tablo 1 de kimyasal bileşimden anlaşılmaktadır.

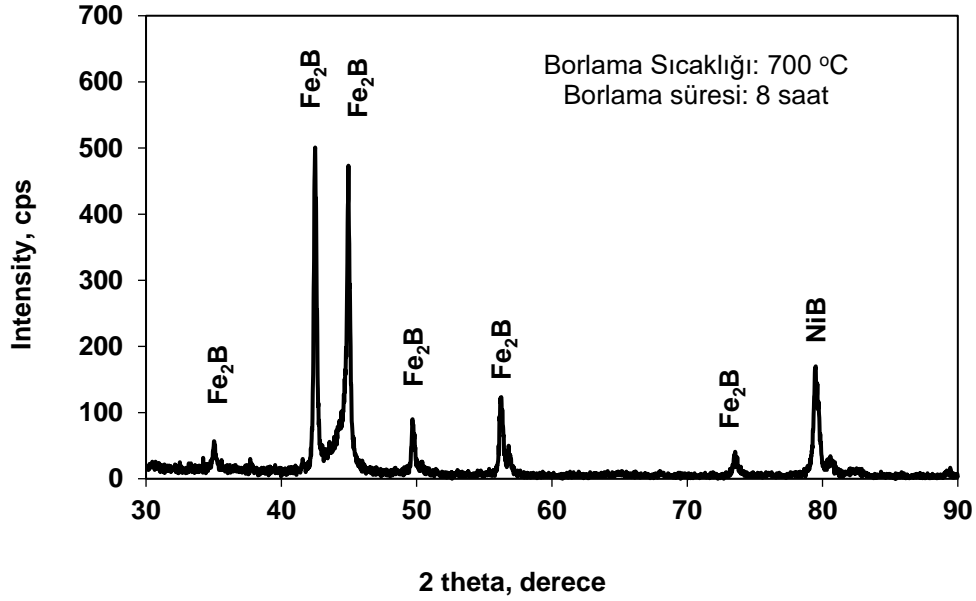
Borlama işlemi sonucu çelik yüzeyi metal-borür tabakası ile kaplanmaktadır. Bu metal-borür tabakası çelik numunesinin kimyasal içeriğine göre bor ile metalin yaptığı bileşiklerden oluşmaktadır. Bor elementi dışardan difüzyon ile çelik yüzeyinden içeri doğru difüze olmaktadır. Çelik numune bileşiminde demir olduğu için bor ile demir reaksiyonu sonucu Fe-B bileşikleri oluşmaktadır. Çelik numune bileşiminde nikel olduğu zaman Ni-B bileşikleri oluşmaktadır.

700 °C sıcaklıkta 4 saat borlanmış numunenin XRD analizi Şekil 4 de verilmiştir. Çelik numunesinin 700 °C sıcaklıkta ve 4 saat borlanması ile elde edilen numunenin XRD sonuçlarında majör faz Fe₂B olduğu gözlenmiştir. Bu numunede FeB fazı gözlenmemiştir. Minör fazlar olarak Fe₂B ve NiB fazı da gözlenmiştir. Ki bu çelik içerisinde bulunan nikelin varlığından kaynaklanabilir.



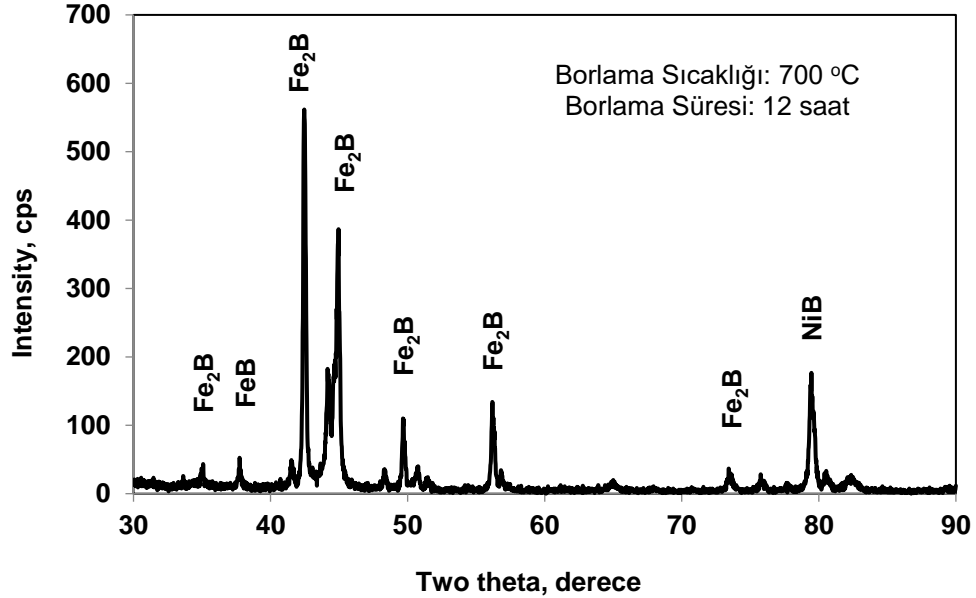
Şekil 4. 700 °C sıcaklıkta 4 saat borlanmış numune XRD analizi

700 °C sıcaklıkta 8 saat borlanmış numunenin XRD analizi Şekil 5 de verilmiştir. 21NiCrMo220 çelik numunesinin 700°C de 8 saat borlanması sonucu Fe_2B major faz olarak belirlenmiştir. Minor fazlar olarak Fe_2B ve NiB fazları gözlenmesine rağmen FeB fazı gözlenmemiştir.



Şekil 5. 700°C sıcaklıkta 8 saat borlanmış numune XRD analizi

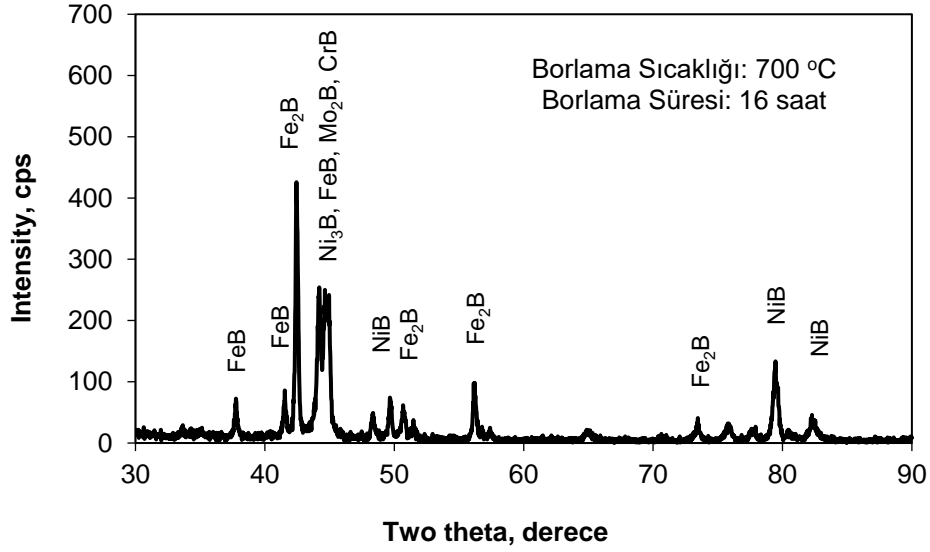
700°C sıcaklıkta 12 saat borlanmış numunenin XRD analizi Şekil 6 da verilmiştir. Çelik numunenin 700°C sıcaklıkta ve 12 saat borlanması sonucu majör olarak Fe_2B fazları gözlenmiştir. Minör fazlar olarak FeB, Fe_2B ve NiB fazları gözlenmiştir.



Şekil 6. 700°C sıcaklıkta 12 saat borlanmış numune XRD analizi

Şekil 6 da daha önce görülmeyen FeB fazı görülmüştür. Bu FeB fazı yüzeye tutunma açısından zayıf bir faz olduğu için genel olarak istenmeyen bir fazdır.

700 °C sıcaklıkta ve 16 saat borlanmış numunenin XRD analizi Şekil 7 de verilmiştir. 21NiCrMo2 çeliğinin 700 °C sıcaklıkta ve 16 saat borlanması ile majör fazlar olarak Fe_2B , Ni_3B , Mo_2B ve CrB fazları oluşmuştur. Minör fazlar olarak FeB, Fe_2B , NiB fazları oluştuğu gözlenmiştir.

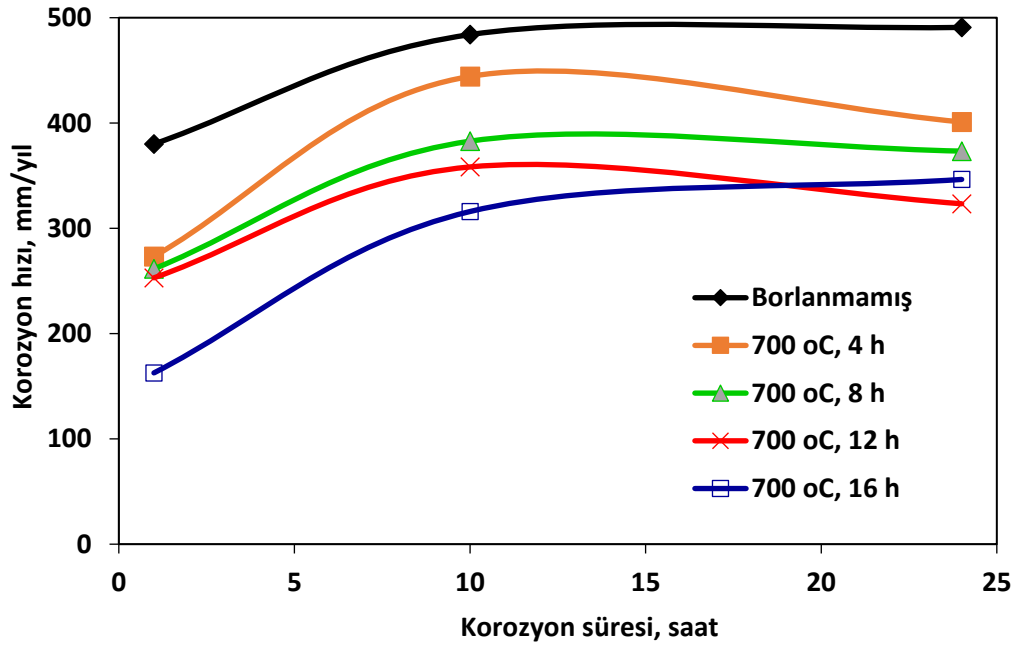


Şekil 7. 700 °C sıcaklıkta 16 saat borlanmış numune XRD analizi

700 °C sabit sıcaklıkta borlama işlemine tabi tutulan çeliğin XRD analizlerinde borlama süresi 4-12 saat arasında olduğu zaman majör faz olarak sadece Fe_2B fazı gözlenmiştir. Borlama süresi 16 saat olduğu zaman çelik yüzeyinde Fe_2B , FeB , Ni_3B , Mo_2B ve CrB fazları oluşmuştur. Bu fazlar içerisinde Fe_2B fazının alt tabaka çeliğe yapışması çok kuvvetlidir. Ancak FeB fazının alt tabakaya yapışması kuvvetli olmadığı için bu FeB tabakası kolayca uzaklaşmaktadır. Bu nedenle, sürtünmeli çalışan makinelerde bu FeB tabakası çok kısa sürede aşınmaktadır. 21NiCrMo2 çeliğinin 700 °C sabit sıcaklıkta, borlama süresi 12 saat den az olmalıdır. Bu süreye ulaşıldığı zaman çelik yüzeyinde FeB fazı da gözlenmektedir.

3.3. Korozyon Hızı

21NiCrMo2 çeliği 700 °C sıcaklıkta 4, 8, 12 ve 16 saat sürelerde borlanmıştır. Borlanmamış ve borlanmış çelik numuneler ASTM G31-72 standardında korozyon testine tabi tutulmuştur.



Şekil 8. 700 °C sıcaklıkta borlanmış numunelerin korozyon hızı

Borlanmamış ve borlanmış çelik numunelerin korozyon hızı mm/yıl olarak Şekil 8 de verilmiştir. Borlanmamış numunenin 24 saat korozyon süresi için korozyon hızı 491 mm/yıl olarak bulunmuştur. Çelik numune 700 °C sabit sıcaklıkta 4 saat borlanmış ve bunu takiben yapılan 24 saat korozyon için korozyon hızı 401 mm/yıl olduğu belirlenmiştir. Çelik numune 700 °C sabit sıcaklıkta 8 saat borlanmış ve 24 saat korozyon süresi için korozyon hızı 373 mm/yıl olarak bulunmuştur. 700 °C sabit sıcaklıkta 12 saat borlanmış

numunenin 24 saat korozyon süresi için korozyon hızı 323 mm/yıldır. 700 °C sabit sıcaklıkta 16 saat borlanmış numunenin 24 saat korozyon süresi için korozyon hızı 346 mm/yıl olarak belirlenmiştir. Korozyon süresinin artması ile korozyon hızı artmıştır. Borlanmamış numunenin korozyon hızı borlanmış numunelerin korozyon hızından daha yüksektir. En düşük korozyon hızı 700 °C sabit sıcaklıkta 12 saat borlama yapılmış numunede gözlenmiştir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, 21NiCrMo2 çeliği yerli borlama ajanı (Baybora-1) kullanılarak 700 °C sıcaklıkta ve farklı sürelerde borlanmıştır.

Borlama sıcaklığı sabit iken borlama süresinin artması ile seramik metal-borür tabakasının kalınlığı artmıştır. Bu artış, borlama işlem süresinin artmasıyla altlık metale bor difüzyonunun devam etmesinden kaynaklanmış olabilir.

Sonuçlar göstermiştir ki 21NiCrMo2 çeliğinin 700 °C sabit sıcaklıkta, borlama süresi 12 saat olduğu zaman çelik yüzeyinde FeB fazı oluşmaya başlamıştır. Borlama süresi 16 saat iken FeB fazında artış olmuştur.

Borlanmış ve borlanmamış çelik numunelerin korozyon deneyi ASTM G31-72 standardına göre sıcak (56 °C) sülfirik asit çözeltisinde yapılmıştır. Korozyon süresinin artması ile korozyon hızı artmıştır. Borlanmamış numunenin korozyon hızı borlanmış numunelerin korozyon hızından daha yüksektir. En düşük korozyon hızı 700 °C sabit sıcaklıkta 12 saat borlama yapılan numunede gözlenmiştir.

Referanslar

- Akbayır, O. (2005). The effect of treatment parameters on surface and wear properties of boronized AISI 1030 steel by pack method, Thesis, Osmangazi University.
- An, J., Su, Z. G., Gao, X. X., Yang, Y. L., & Sun, S. J. (2012). Corrosion Characteristics of Boronized AISI 8620 Steel in Oil Field Water Containing H₂S, Physicochemical problems on materials protection 48, 487 – 494.
- An., J., Li., C., Wen, Z., Yang, Y.L., & Sun, S.J. (2012). A Study of boronizing of steel AISI 8620 for sucker rod Metal Science and Heat Treatment 53, 598 – 602.
- ASTM G31-72 (2004). Standard practice for laboratory immersion corrosion testing of metals, USA.
- Bayca, S.U., & Sahin, S. (2004). Boriding, Machinery and Engineer, TMMOB, Chamber of Mechanical Engineers, Ankara, 532, 51 – 59.
- Bayca, S.U. (2021). Bir katı borlama ajanı, Patent no: TR2021/007143.
- Bayca, S.U., Bican, O., Yamanel, B., Hekimoğlu A.P., & Çalış, M. (2020). The Effect of Solid Boriding Time on the Structure, Hardness and Corrosion Properties of AISI 5140 Steel, Protection of metals and Physical Chemistry of Surfaces, 56, (3) 591–597.
- Bican, O., Bayca, S.U., Ocak-Araz, S., Yamanel, B., & Tanis, N.A. (2020). Effects of the boriding process and of quenching and tempering after boriding on the microstructure, hardness and wear of AISI 5140 steel, Surface Review and Letters, 27, (6) 1950157–1–9.
- Bican, O., Bayca, S.U., Kuleyin, H., & Gümrük, R., (2021). Effect of boronizing operating stability of steel AISI 304L under erosion impact of hard particles, Metal Science and Heat Treatment, 63, (3-4) 156 - 162.
- Calik A., Duzgun, A., Ekinci, A.E., Karakas, S., & Ucar, N., (2009). Comparison of Hardness and Wear behaviour of Boronized and Carburized AISI 8620 Steels, Acta Physica Polonica A 116, 1029-1032.
- Fichtl, W. (1981). Boronizing and its practical applications, Materials in engineering 2, 276 – 286.
- Genel, K. (2006). Boriding kinetics of H13 steel, Vacuum 80, 451–457.
- Gunes, I., Ulker, S., & Taktak, S. (2011). Plasma paste boronizing of AISI 8620, 52100 and 440C steels, Materials design 32, 2980-2986.
- Gunes, I., Ulker, S., & Taktak, S. (2013). Kinetics of Plasma Paste Boronized AISI 8620 Steel in Borax Paste Mixtures, Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 49, 567–573.
- Kayali, Y., Gunes, I., & Ulu, S. (2012). Diffusion kinetics of borided AISI 52100 and AISI 440C steels. Vacuum 86, 1428 – 1434.

Matuschka, A.G. (1980). *Boronizing*, Carl Hanser Verlag, München, Germany.

Ocak-Araz, S., Gumus, H., Bayca, S.U., & Aydin, A. (2021). Investigation of gamma-ray attenuation coefficients for solid boronized 304L tainless steel, *Applied Radiation and Isotopes*, 170, 109605.

Uslu, I., Comert, H., Ipek, M., Celebi, F.G., Ozdemir, O., & Bindal, C. (2007). A comparison of borides formed on AISI 1040 and AISI P20 steels, *Materials and Design* 28, 1819–1826.

Xu, C.H., Gao, W., & Yang, Y.L. (2000). Superplastic Boronizing of a Low Alloy Steel- Microstructural Aspects, *Journal of Materials Processing Technology*, 108, 349-355.



Design, Manufacturing and Testing of a Stirling Engine with Slider-Crank Mechanism

Hayri Yaman¹ , Derviş Erol¹ 

Department of Automotive Technology, Kırıkkale Vocational School, Kırıkkale University, Kırıkkale, 71450, Turkey

Başvuru/Received: 12/03/2021

Kabul / Accepted: 05/10/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Abstract

In this study, a beta type Stirling engine with slider-crank mechanism having swept volume of 365 cm³ was designed, manufactured and performances tested. The design phase was first started by determining the operating parameters of the engine. The necessary mathematical calculations were performed by considering the operating conditions of the Stirling engine with a slider-crank mechanism to be manufactured. After determining the engine parameters, the dimensional design phase was started within the tolerance limits of the engine parts. The parts were designed by the computer-aided SolidWorks program in solid modeling and by the AutoCAD program in two-dimensional design and projecting. Each part used in the manufacturing of the Stirling engine was assembled delicately in the assembly process. A prony-type dynamometer, liquefied petroleum gas (LPG) fuel, and electronically controlled electric heater systems were developed to perform the performance tests and analyses of the manufactured engine. Experimental studies were conducted at hot end temperatures of 627 °C, 727 °C, and 827 °C and at a cold end temperature of 27 °C by utilizing an electrical heater as a heat source and air as a working fluid. According to the results obtained in experimental studies for different heater temperatures and different charge pressures, it was revealed that engine power values increased depending on the heater temperature and charge pressure increase. The maximum power values at all heater temperatures were acquired at a charge pressure of 4 bar. In this study, the maximum engine power was obtained as 69.5 W at a hot end temperature of 827 °C, at a charge pressure of 4 bar, and at an engine speed of 200 rpm when a stainless-steel displacement piston and air as a working fluid were utilized, and the maximum engine torque value was obtained as 4.21 Nm at a charge pressure of 4 bar and an engine speed of 135 rpm. The lowest engine power among the maximum engine power values obtained in all experimental studies was found as 17.09 W at a hot end temperature of 627 °C, at a pressure of 1 bar, and at an engine speed of 185 rpm. The maximum power values of the engine developed within the scope of this study at hot end temperatures of 627 °C, 727 °C, and 827 °C were determined to be 31.2 W, 48.3 W, and 69.5 W, respectively. Upon examining the results obtained from experimental studies, it is observed that the heater temperature and charge pressure have significant impacts on the performance values of Stirling engines. Within the scope of this study, a new power generation system that could use renewable energy sources was put into operation.

Key Words

“Stirling engines, Slider-crank mechanism, Engine design and manufacturing, Stirling engine testing”

Nomenclature

Dd	displacer cylinder bore (mm)
Dp	power cylinder bore (mm)
Dr	displacer rod bore (mm)
hd	displacer piston length (mm)
hp	power piston length (mm)
Ht	cylinder length (mm)
J	joule
ldr	displacer rod length (mm)
lr	connecting rod length of rhombic (mm)
m	mass of working fluid
n	engine speed (rpm)
Nm	newton meter
P	pressure (bar)
Q_{in}	heat transfer inlet
Q_{out}	heat transfer outlet
Q_{Rin}	heat transfer regenerator inlet
Q_{Rout}	heat transfer regenerator outlet
R	gas constant (kJ/kgK)
T	temperature (K)
T_H	heater temperature (K)
T_L	cooler temperature (K)
rpm	revolutions per minute
V	volume
W	watt

Abbreviations

AISI	American Iron and Steel Institute
CNC	Computer Numerical Control
DIN	Deutsches Institut für Normung
LPG	Liquid Petroleum Gas
SAE	Society of Automotive Engineers
MSC Adams	Microsoft Software Corporation Automatic Dynamic Analysis of Mechanical System

1. Introduction

Along with the increase in population in the world, the difficulties in meeting the energy demand are increasing every day. Power generation processes reveal many harmful emissions to the ecosystem (Hansen et al. 2019). When fossil-based fuels are used, large amounts of greenhouse gases, especially carbon dioxide, carbon monoxide and hydrocarbon are emitted into the atmosphere (Guelpa et al. 2019; Lin and Zhu, 2019; Nathaniel and Iheonu, 2019). Renewable energy sources, such as solar, wind, wave, tide, geothermal and biomass, are used to reduce greenhouse gas emissions. Nowadays, the importance of using energy effectively and efficiently is increasing every day (Gielen et al. 2019; Krakowski et al. 2016; Ozcan et al. 2018). Considering these adverse reasons, the ability of Stirling engines to run with all types of fuel provides an advantage in comparison with other energy generating systems. From another point of view, the fact that Stirling engines can convert waste heat energies released into the environment from factory chimneys or systems producing with high heat into mechanical energy is considered to be a significant gain in the efficient use of energy (Çınar et al. 2012; Erol et al. 2021).

Robert Stirling designed and manufactured a beta type Stirling engine running on the principle of external heat dissipation in 1816. This engine was officially registered with patent No. 4081 (Stirling, 1816). The output power of 2 hp was obtained from the beta type engine in having a swept volume of 0.103 m³ using flue gases at 255 °C under atmospheric conditions (Finkelstein and Organ, 2004; Organ, 2014). In 1818, this type of Stirling engines, which run more efficiently than steam engines, was used in water pumps in the mining sector. Air was used as the working fluid in the first Stirling engines, and these engines were named “Air engine” (Çınar et al. 2012; Urieli and Berchowitz, 1984). In the 1860s, Wilhelm Lehmann conducted many studies on single-cylinder beta type Stirling engines. In the 1930s, studies on developing Stirling engines were initiated again in Philips Research Laboratories to produce a little, silent, economic, and practice electric generator for the purpose of meeting the electrical needs of radios. It is observed that until the 1950s, single-cylinder Stirling engines with a slider-crank mechanism were designed and manufactured in Philips laboratories to be used as cooling machines (Rinia and Pre, 1946; Brey et al. 1947; Weenen, 1947; Meijer, 1965). Due to these reasons, very extensive research and studies are conducted to develop machines that can use renewable energy sources that may replace fossil fuels and are not dependent on the fuel type. Nowadays, the development process of Stirling engines is continued by companies and universities operating in many different countries (Erol et al. 2017).

There are few studies in the literature examining the engine performance characteristics of the slider crank drive mechanism used in Stirling engines. It is possible to summarize these studies in the following way.

Çınar, C. et al. conducted the design, manufacture, and performance tests of a beta-type Stirling engine with a slider crank drive mechanism. It was indicated that experimental studies were carried out at heater temperatures of 800 °C, 900 °C, and 1000 °C using ambient air as a working fluid at atmospheric pressure in this manufactured engine. It was explained that the Stirling engine started running at a hot end temperature of 650 °C. According to the results obtained in experimental studies, it was reported that the maximum engine power was acquired as 5.98 W at 208 rpm when the heater temperature was 1000 °C (Çınar et al. 2005). Cheng, C. H. et al. investigated the thermal efficiency of a beta-type Stirling engine with a slider crank drive mechanism by employing a numerical model and carried out the design study by conducting the theoretical analysis of the engine (Cheng and Yu, 2011). Gheith, R. et al. conducted the design, manufacture, and performance tests of a beta-type Stirling engine with a slider crank drive mechanism. Torque, speed, and power values were examined under different conditions by utilizing air as the working fluid for experimental studies in this engine. The theoretical results obtained in the study were compared with the findings of the experimental studies. Furthermore, it was declared that the performance results of the manufactured engine as a cooling machine were examined (Gheith et al. 2011). Reséndiz-Antonio, M., and Santillán, M. developed a detailed mathematical model that simply addressed all the thermodynamic and mechanical details of a Stirling engine with a slider crank drive mechanism and formed the basis for studying engine performance and conducted its theoretical analysis (Reséndiz-Antonio and Santillán, 2014). Araoz, J. A. et al. developed a numerical simulation covering all thermodynamic, thermal, and mechanical interactions of a two-cylinder Stirling engine with a slider crank drive mechanism. Within the scope of this study, possible adverse effects limiting the engine performance characteristics were attempted to be determined. The findings obtained from the theoretical study were compared with the experimental results of the engine. According to the results obtained from the theoretical study, it was reported that the design changes made in the engine caused an improvement of approximately 26% in the performance (Araoz et al., 2015). Barreto, G. and Canhoto, P. carried out a study aiming to determine the energy generation and efficiency of a beta-type Stirling engine with a slider crank drive mechanism running on solar energy using a parabolic dish. In this study, they theoretically investigated the modeling and simulation of the system, including the thermodynamic and energy transfer processes in the Stirling engine, all the main processes occurring in the compression, expansion and regenerator spaces and investigated their effects on the engine’s performance. It was explained that the optimization model suggested in the research could be easily adjusted to the dimensions and operating conditions of a Stirling engine with higher power outputs. Furthermore, it was reported that it was possible to obtain higher performance characteristics by improving some negative aspects of the thermal receiver and Stirling engine (Barreto and Canhoto, 2017). Erol, D., and Çalışkan, S. performed the kinematic and thermodynamic analyses of bell crank, slider crank, rhombic drive, and scotch yoke drive mechanisms for a beta-type Stirling engine with a swept volume of 365 cm³ under the same conditions. It was reported that the kinematic analyses of each mechanism were examined using the MSC Adams program, and the pressure-volume changes depending on the crankshaft angle were calculated by employing the isothermal analysis method. Moreover, the study explained that the effects of the working fluid mass, charge pressure, and heater temperatures on the net work amount obtained for each mechanism during a cycle were examined in detail by conducting thermodynamic analyses. The theoretical results of the performance characteristics of these different drive mechanisms were compared graphically (Erol and Çalışkan, 2019).

In this study; a beta type Stirling engine with a slider-crank mechanism having a swept volume of 365 cm^3 was designed, manufactured and performances tested. Basic calculations and computer-aided 3-dimensional (3D) modeling of the engine with the determined design dimensions were realized. Material selection was made depending on the operating conditions of the parts before manufacturing. The values showing which parts will be heat-treated and which of them will run between precision machining machines and tolerance values were determined, and manufacturing processes were initiated. Many parts of the engine were machined directly on the CNC machine. Casting molds were prepared for some engine parts, and the preparation of semi-finished products was ensured, and then they were machined on the CNC machine. The assembly of each part manufactured within the manufacturing dimensional tolerance limits was performed starting from the main body of the engine. Furthermore, the engine performance characteristics of a beta-type Stirling engine with a slider crank drive mechanism were determined by utilizing air as the working fluid and an electrical heater as a heat source under laboratory conditions.

2. Material and Methods

Within the scope of this study, the design and manufacturing drawings of a beta type Stirling engine with a slider-crank mechanism, for which a prototype would be manufactured, were performed using the SolidWorks program, which is a computer-aided design program. The drawings of the designed Stirling engine with a slider-crank mechanism in SolidWorks environment from different angles are presented in Fig. 1. The cycle in beta type Stirling engines is realized by the displacer piston and concentric power piston running in the same cylinder, as is shown in Fig. 1. The cylinder volume in this type of engines is divided into two as compression and expansion volumes by means of displacer piston. Technical specifications of the manufactured Stirling engine with a slider-crank mechanism are presented in Table 1.

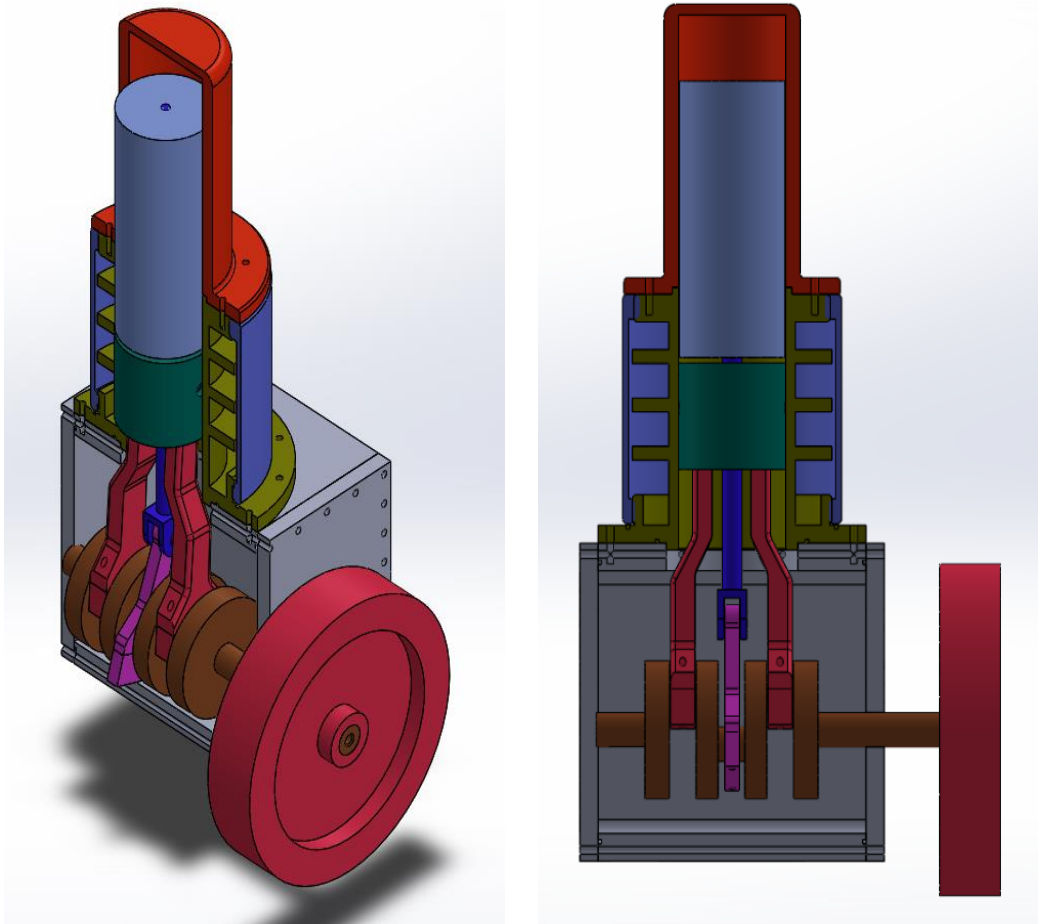


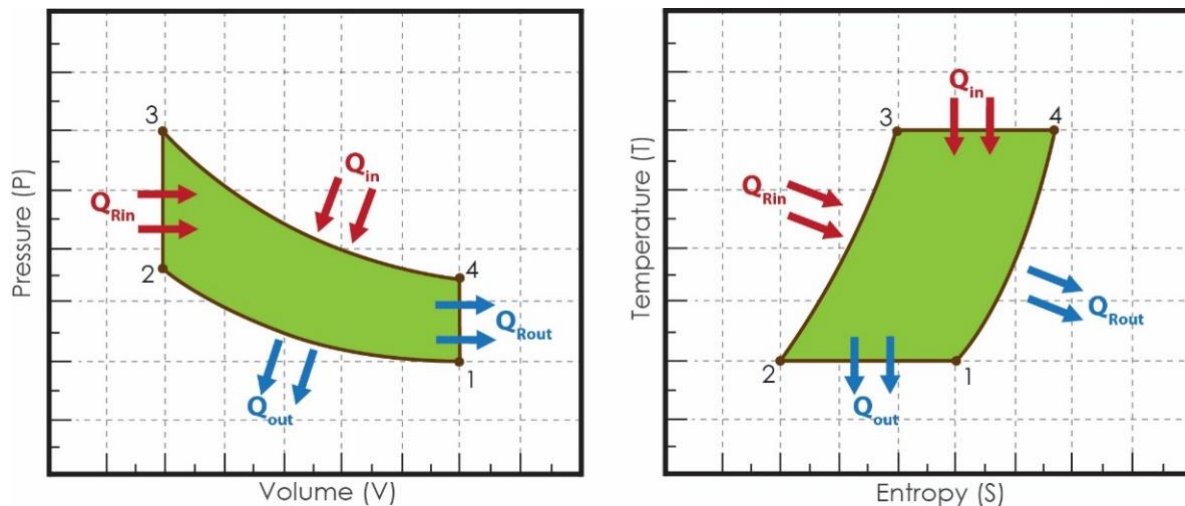
Figure 1. Schematic view of beta type Stirling engine with a slider-crank mechanism

Table 1. Technical specifications of Stirling engine

Parameters	Specification
Engine type	Beta
Drive mechanism	Slider-crank
Swept volume (cm ³)	365
Displacer cylinder bore, Dd (mm)	88
Displacer piston bore (mm)	87
Displacer piston length, hd (mm)	200
Displacer piston stroke (mm)	60
Power cylinder bore, Dp (mm)	88
Power piston bore (mm)	88
Power piston length, hp (mm)	32.5
Power piston stroke (mm)	60
Cylinder length, Ht (mm)	514
Displacer rod length, ldr (mm)	189
Displacer rod bore, Dr (mm)	16
Displacer connecting rod length, ld (mm)	95
Power piston connecting rod length, lp (mm)	205
Displacer crank radius, Rd (mm)	30
Power piston crank radius, Rp (mm)	30

2.1. Working principle and basic cycle of the Stirling engine

Stirling engines run as closed cycles on the basis of generating power during the repetition of the heating and cooling processes of the working fluid isolated from external environment. Working fluid exhibits behaviors defined by gas laws (related to pressure, temperature, and volume). When the gas is heated, pressure increases, and it generates power by affecting the power piston since it is in an isolated area. When the gas is cooled, pressure decreases, and as a result of this, the piston uses a part of the work formed to recompress the gas on the return stroke. The resulting net work creates the useful output power on the spindle. The working fluid is transferred periodically between hot and cold heat exchangers. The working fluid was insulated within the engine cylinders. Therefore, there is no exhaust gas in this type of engines. Unlike other piston engines, there is also no need for valves.

**Figure 2.** P-V and T-S diagram of Stirling cycle with regenerator (Erol et al. 2017).

The Stirling engine cycle pressure-volume (P-V) and temperature-entropy (T-S) working relationships are observed in Fig. 2. Volume and pressure changes are taken into account in the work calculations. In the calculation of transferred heat, specific heat, temperature, and volume changes in a constant volume are used.

Process 1-2: Compression at constant temperature and heat transfer from system to external environment

Process 2-3: Heat is supplied to system from an external source in a constant volume

Process 3-4: Expansion at constant temperature and continuation of the heat supply to the system

Process 4-1: Heat transfer from system to external environment in a constant volume

2.2. Design and manufacturing of a beta type Stirling engine

The explanations and schematic drawings of the material properties of the engine block and side covers, crankshaft, power cylinder, power piston, displacement cylinder and piston, displacement piston power take-off, connecting rods, and flywheel, which form the basic parts of the engine, are presented below. The assembly of manufactured beta type Stirling engine is shown in Fig. 3.

Engine block was determined as the casting material, and mold design was made. The engine block was cast into the prepared mold. The semi-finished engine block that emerged from the casting was manufactured in a CNC machine as a single piece at the desired dimensions and tolerances, resistant to a 10-bar pressure working fluid. The design and manufacturing drawings of the manufactured engine block are presented in Fig. 4 and Fig. 5. The two sides of the engine block were closed by two covers bearing the crankshaft.

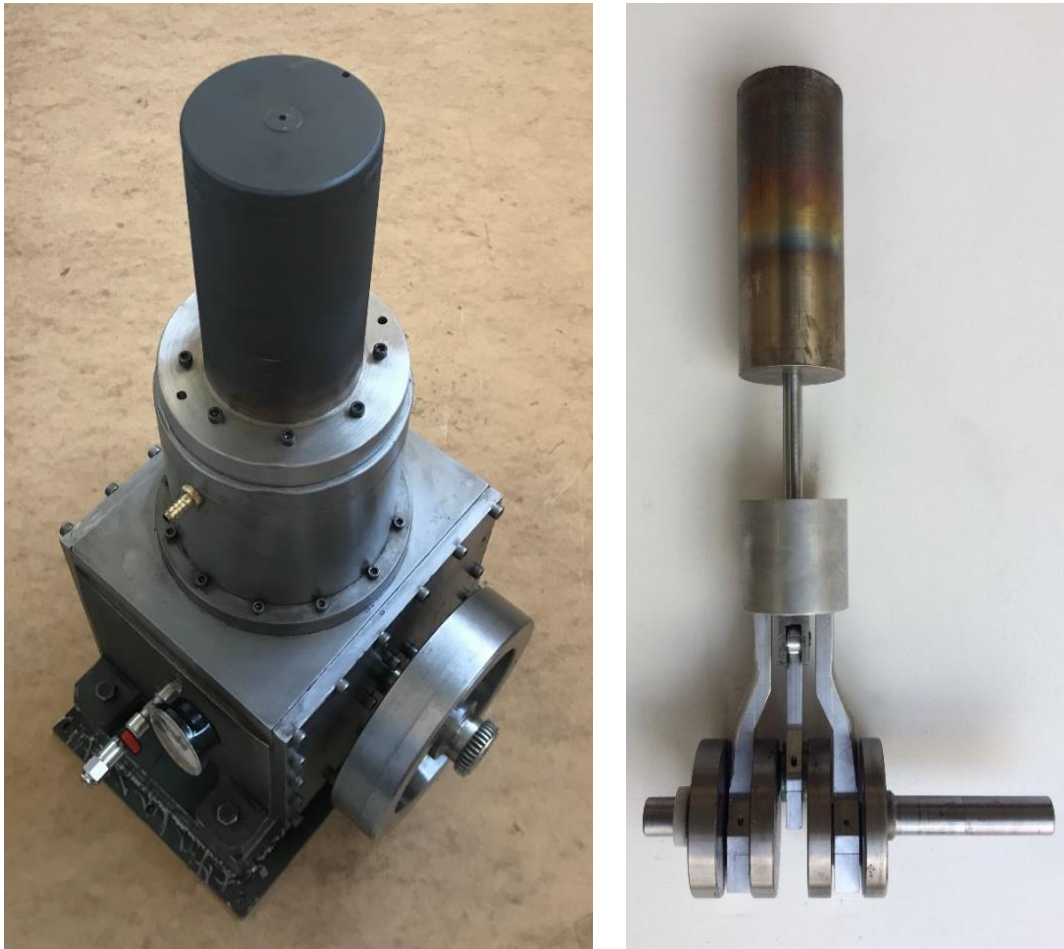


Figure 3. Assembly views of the prototype Stirling engine with a slider-crank mechanism

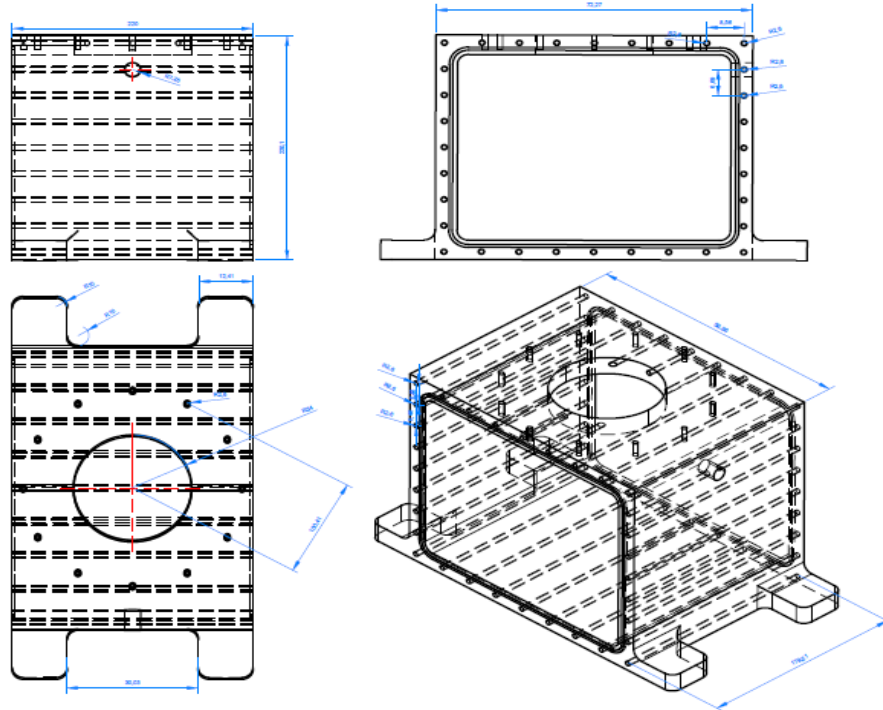


Figure 4. Schematic drawing of the designed engine block

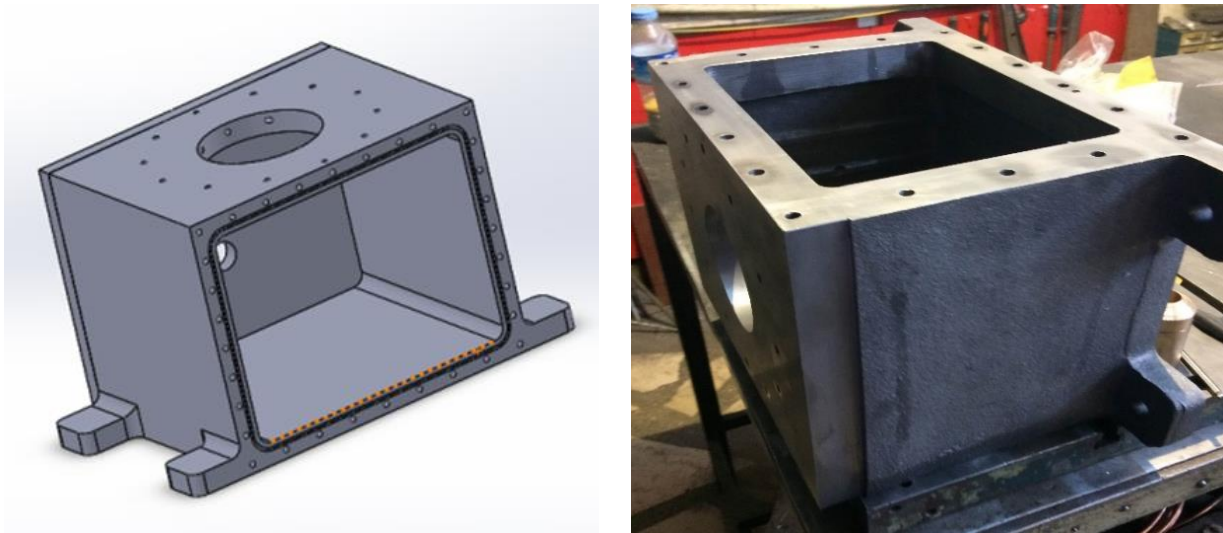


Figure 5. Three dimensional solid model and actual views of the engine block

The crankshaft was manufactured in one piece of the AISI/SAE 4140 material, and its journal surfaces were precisely ground. While the dynamic balance of the crankshaft was connected to the horizontal balancing device, the part was made by being unloaded over the balance weights. After the crankshaft journals subjected to balancing were ground, the surface quality was improved by polishing. The outer rings of the tapered bearings on the main journals of the crankshaft were placed on the centering bearings found on the covers of the block. The covers fix the crankshaft through the tapered bearings on both sides. The design and manufacturing drawings of the crankshaft are presented in Fig. 6. The flywheel was manufactured of the AISI/SAE 1040 (DIN C40 tempered steel) material.

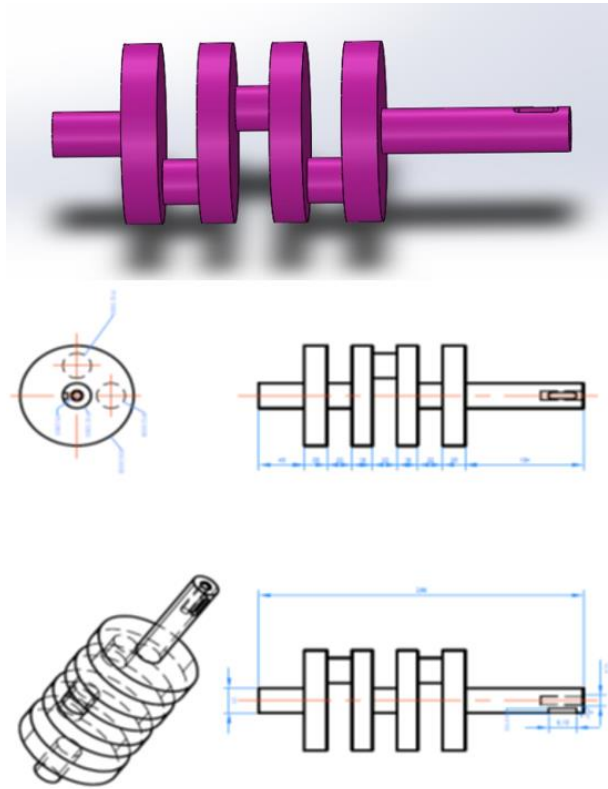


Figure 6. General views of the crankshaft designed in the SolidWorks environment

The power cylinder and cooler body were manufactured in two pieces of the AISI/SAE 303 material. Heat treatment was applied to this part to increase the frictional resistance between the piston and cylinder. The power piston was manufactured in one piece of the 7075 series aluminum alloy. A piston ring was not used to ensure sealing in the power piston. To provide sealing, the outer surface of the power piston was manufactured precisely, and a running clearance of 0.05 mm was provided between it and power cylinder. Power piston and displacer connecting rods were manufactured in two parts of the 7075 series aluminum alloy. Since the rod of the displacer piston passed through the middle of the power piston of beta type Stirling engines, it was turned and machined precisely by placing bronze material in the middle of the power piston. In this way, mechanical losses were minimized by ensuring the sealing of better quality between rod of displacer piston and rod of power piston.

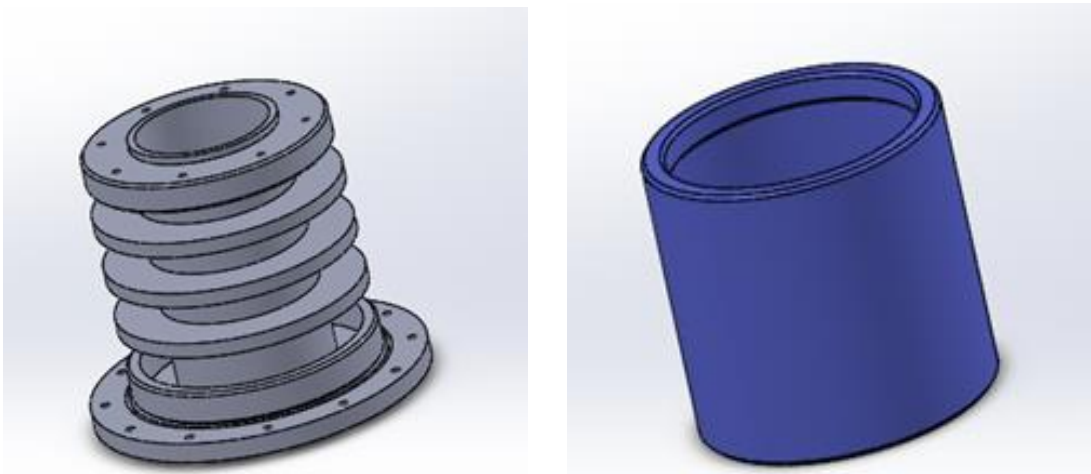


Figure 7. Power cylinder and cooler designed in the SolidWorks environment

The displacer pistons were manufactured of the AISI/SAE 303 pipe material. The outer surface of one of these pistons was covered with zirconium oxide to ensure thermal insulation. The design and manufacturing drawings of the displacer piston are shown in Fig. 8. An uncoated stainless-steel displacer piston was utilized in the experimental studies.



Figure 8. Assembly view of the displacer piston and the fitting part

The displacer cylinder was manufactured in one part of the AISI/SAE 303 (DIN X8CrNiS18-9 stainless steel) material. The displacer cylinder was connected to the power cylinder with the help of 8 socket head M6 bolts. To ensure sealing, the liquid gasket was used on the surfaces where the displacer cylinder contacted with the power cylinder. The bottom part of displacer cylinder was manufactured with flanges for the ease of assembly and better sealing. The design and manufacturing drawings of the displacer cylinder are shown in Fig. 9 and Fig. 10.

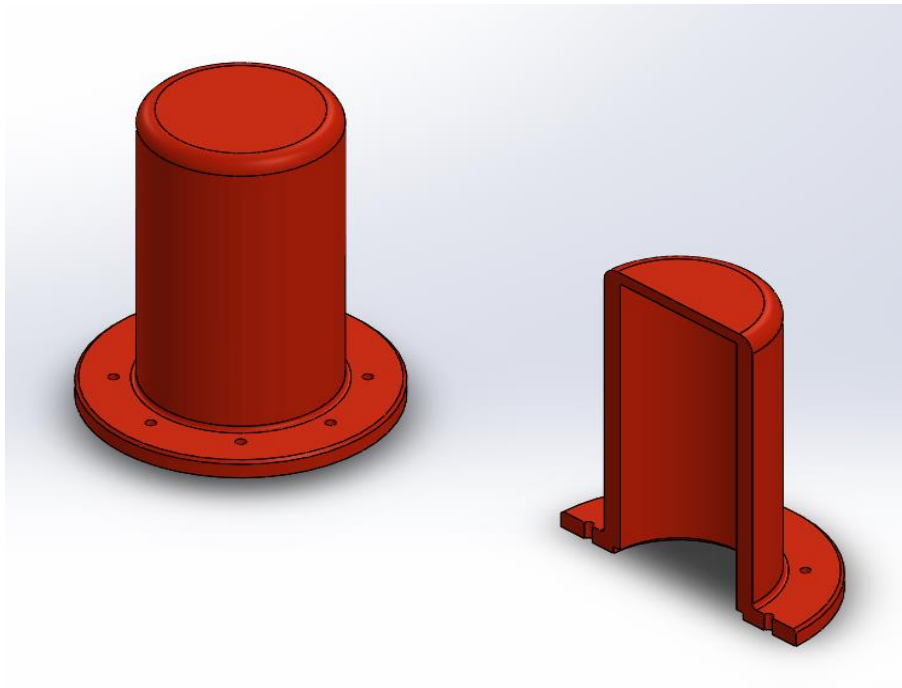


Figure 9. Schematic drawing of displacer cylinder designed in the SolidWorks environment



Figure 10. Schematic view of the manufactured displacer cylinder

2.3. Test systems developed for the manufactured Stirling engine

After the manufacturing processes, the engine assembly was performed in the laboratory environment. After the engine assembly was completed, the necessary environments were created in the laboratory of the Automotive Technology Department of Kırıkkale University to be able to perform experimental studies, and two different experimental setups were prepared. A Prony-type dynamometer, liquefied petroleum gas (LPG) fuel, and electronically controlled electric heater systems were developed to conduct the performance tests and analyses of the manufactured engine.



Figure 11. Experimental setup using liquefied petroleum gas (LPG)



Figure 12. Experimental setup using an electronically controlled electric heater

3. Experimental Studies and Performance Tests

In this study, the design, manufacture, and performance tests of a beta-type Stirling engine with a slider-crank mechanism with a swept volume of 365 cm^3 were carried out. The performance tests of the manufactured Stirling engine were conducted at hot end temperatures of $627 \text{ }^\circ\text{C}$, $727 \text{ }^\circ\text{C}$, and $827 \text{ }^\circ\text{C}$ and at a cold end temperature of $27 \text{ }^\circ\text{C}$, using an electrical heater and air as a working fluid. Water was used as a cold source. The results obtained in the experimental studies performed for different heater temperatures and different charge pressures are presented in Fig. 13, Fig. 14, and Fig. 15. According to the results obtained, it was revealed that the engine power values increased depending on the increase in the heater temperature and charge pressure. The maximum power values at all heater temperatures were acquired at a charge pressure of 4 bar.

Upon examining the graphs, it was observed that the engine power values obtained at a charge pressure of 5 bar were lower than the values obtained at a charge pressure of 4 bar. Experimental studies were tried to be conducted at a charge pressure of 6 bar. However, since excessive power losses in the engine were observed, experimental studies were carried out for charge pressures of 1-5 bar. The reason for the decrease in the engine power after 4 bar due to the increased charge pressure is the loss of engine performance due to the insufficient heating and cooling times needed for the working fluid because of the increase in the amount of working fluid in the cylinder.

In all experimental studies performed in this research, low engine power values were obtained due to the lack of a sufficient amount of the working fluid in the cylinder at low charge pressures. When the graphs are examined in detail, it is observed that the engine power obtained at low speeds for each charge pressure is higher than that obtained at high speeds. The reason for this originates from the fact that the heating and cooling times required for the working fluid are adequate at low engine speeds, while the heating and cooling times required for the working fluid are not adequate at high engine speeds due to the increase in speed. Hence, a certain part of the power that can be produced from the engine is lost in this way.

The maximum engine power was acquired as 69.5 W at a hot end temperature of $827 \text{ }^\circ\text{C}$, at a charge pressure of 4 bar, and at an engine speed of 200 rpm, and the maximum engine torque value was obtained as 4.21 Nm at a charge pressure of 4 bar and at an engine speed of 135 rpm. The lowest engine power among the maximum engine power values obtained from all experimental studies was determined to be 17.09 W at a hot end temperature of $627 \text{ }^\circ\text{C}$, at a pressure of 1 bar, and at an engine speed of 185 rpm. During the experimental studies, the best performance values were obtained at a hot end temperature of $827 \text{ }^\circ\text{C}$ and a charge pressure of 4 bar. Upon examining the results obtained in the experimental studies, it is observed that the heater temperature and charge pressure significantly affect the performance values of Stirling engines. To improve the operating parameters of Stirling engines, it is of great importance to design special heaters and heat exchangers in order to transfer the heat energy taken from the hot source to the working fluid at maximum efficiency. Moreover, it is desired that the working fluid used in Stirling engines has a high thermal conductivity and a low density.

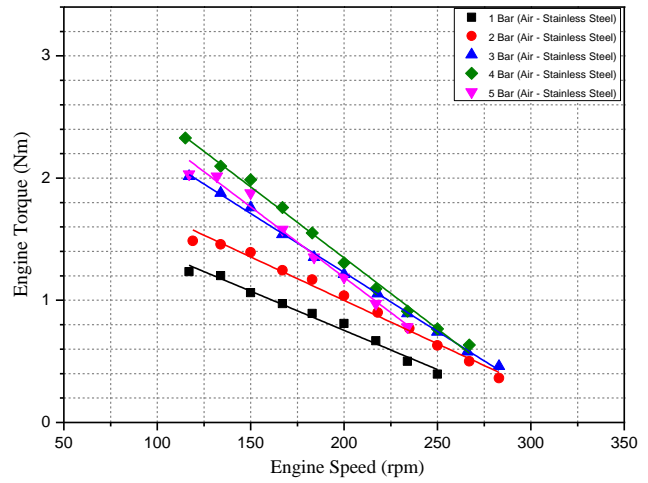
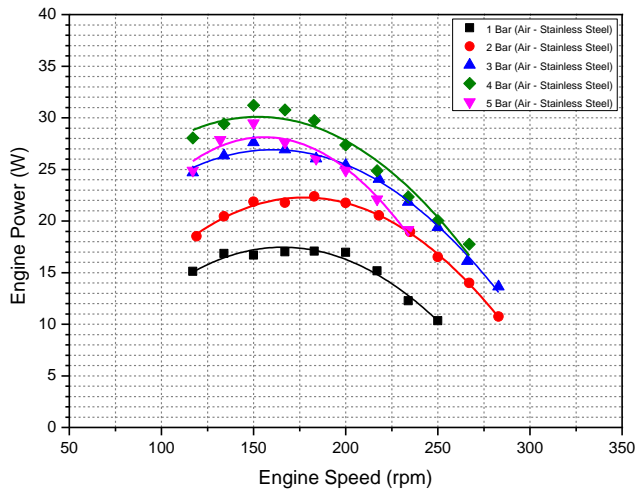


Figure 13. The variations of engine power and torque at different charge pressure (627 °C)

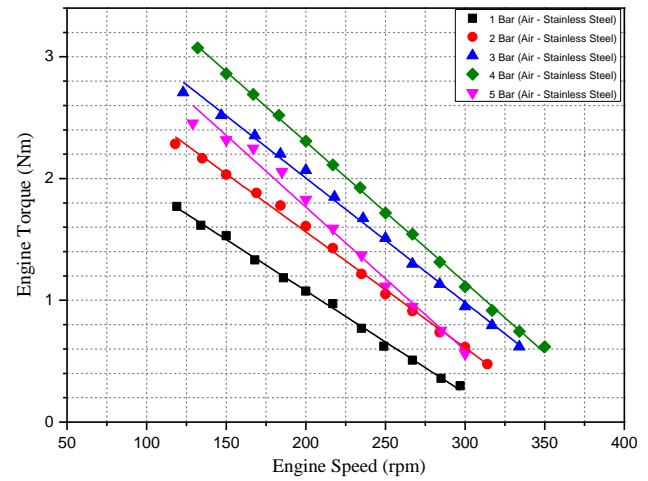
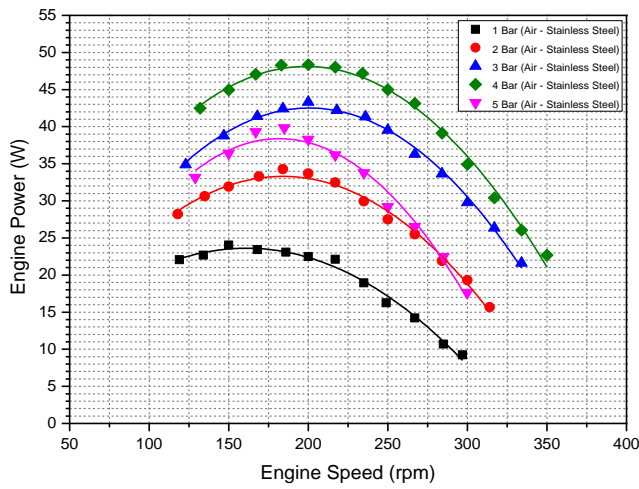


Figure 14. The variations of engine power and torque at different charge pressure (727 °C)

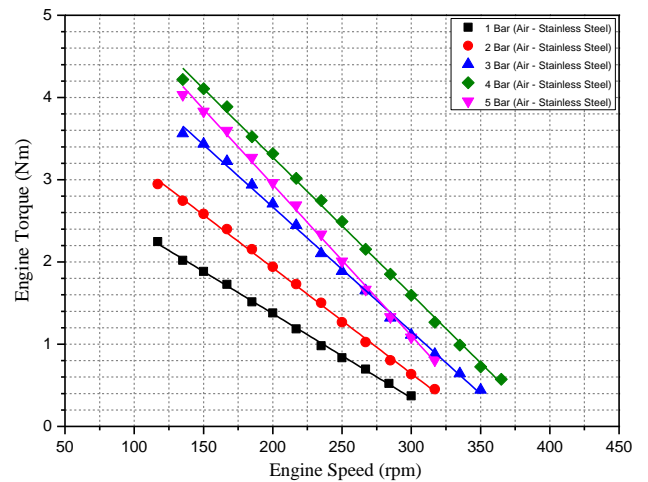
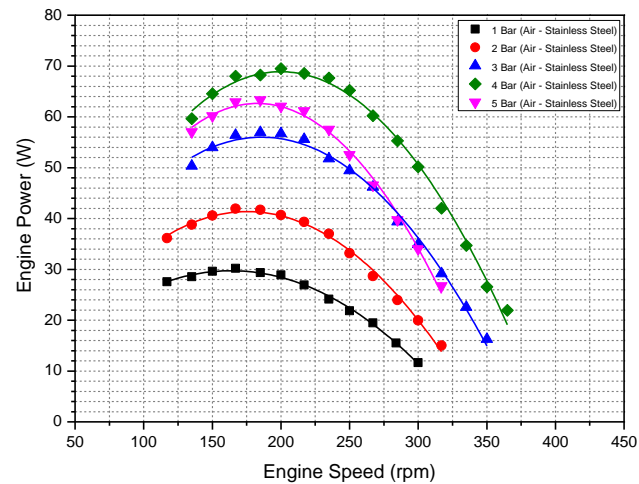


Figure 15. The variations of engine power and torque at different charge pressure (827 °C)

4. Conclusions

In this study, a beta type Stirling engine with a slider-crank mechanism having a swept volume of 365 cm³ was designed, manufactured, and tested. The engine parts, of which solid models were created before manufacturing, were assembled in the SolidWorks design program, and the theoretical study simulations of the engine were performed. The conditions that would affect the operating conditions in the cyclical test simulation of the engine were re-evaluated in the SolidWorks program, and the necessary design corrections were applied. After the design study was completed, the parts of the Stirling engine were produced with advanced technology CNC manufacturing techniques by selecting materials suitable for the operating conditions. After the manufacturing processes, the assembly of the engine parts was performed in the laboratory environment. After the engine assembly was completed, the necessary environments were created in the laboratory of the Automotive Technology Department of Kırıkkale University to conduct experimental studies, and two different experimental setups were prepared. Unlike internal combustion engines, Stirling engines are systems that generate power using all kinds of heat energy sources. A Prony-type dynamometer, liquefied petroleum gas (LPG) fuel, and electronically controlled electric heater systems were developed to conduct the performance tests and analyses of the manufactured engine. Experimental studies were carried out with air as working fluid. Torque and engine power output changes were acquired depending on the engine speed, heater temperature, and charge pressure. The maximum engine power was acquired as 69.5 W at a hot end temperature of 827 °C, at a charge pressure of 4 bar, and at an engine speed of 200 rpm, and the maximum engine torque value was obtained as 4.21 Nm at a charge pressure of 4 bar and at an engine speed of 135 rpm. The lowest engine power among the maximum engine power values obtained from all experimental studies was determined to be 17.09 W at a hot end temperature of 627 °C, at a pressure of 1 bar, and at an engine speed of 185 rpm. During the experimental studies, the best performance values were obtained at a hot end temperature of 827 °C and a charge pressure of 4 bar.

Acknowledgment

This study was supported within scope of the projects numbered 2016/020 by the Kırıkkale University Scientific Research Projects Coordination Unit. We would like to thank Kırıkkale University Scientific Research Projects Coordination Unit for their financial support.

References

- Araoz, J. A., Salomon, M., Alejo, L., and Fransson, T. H. (2015). Numerical simulation for the design analysis of kinematic Stirling engines, *Applied Energy*, 159:633-650.
- Barreto, G., and Canhoto, P. (2017). Modelling of a Stirling engine with parabolic dish for thermal to electric conversion of solar energy, *Energy Conversion and Management*, 132:119-135.
- Brey, H. D., Rinia, H., Weenen, F. L.V. (1947). Fundamentals for the development of the Philips air engine, *Philips Technical Review*, 9(4):97-104.
- Cheng, C. H., and Yu, Y. J. (2011). Dynamic simulation of a beta-type Stirling engine with cam-drive mechanism via the combination of the thermodynamic and dynamic models, *Renewable Energy*, 36(2):714-725.
- Çınar, C., Yucesu, S., Topgul, T., and Okur, M. (2005). Beta-type Stirling engine operating at atmospheric pressure, *Applied Energy*, 81(4):351-357.
- Çınar, C., Aksoy, F., Erol, D. (2012). The effect of displacer material on the performance of a low temperature differential Stirling engine, *International Journal of Energy Research*, 36:911-917.
- Erol, D., Yaman, H. and Doğan, B. (2017). A review development of rhombic drive mechanism used in the Stirling engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78:1044-1067.
- Erol, D., and Çalışkan, S. (2019). Comparative study on the performance of different drive mechanisms used in a beta type Stirling engine through thermodynamic analysis, *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 8(2):44-60.
- Erol, D., Doğan, B., and Çalışkan, S. (2021). The investigation of an energetic and exergetic performance characteristics of a beta-type Stirling engine with a rhombic drive mechanism. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(4):1-19.
- Finkelstein, T. and Organ, A. J., *Air engines the history science and reality of the perfect engine*. The American Society of Mechanical Engineers, New York, 2004.

- Gheith, R., Aloui, F., and Nasrallah, S. (2011). Experimental study of a beta Stirling thermal machine type functioning in receiver and engine modes, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 4(2):32-42.
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M.D. and Wagner, N. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation, *Energy Strategy Reviews*, 24:38-50.
- Guelpa, E., Bisch, A., Verda, V., Chertkov, M., Lund, H. (2019). Towards future infrastructures for sustainable multi-energy systems: A review, *Energy*, 184:2-21.
- Hansen, K., Mathiesen, B.V., Skov, I. R. (2019). Full energy system transition towards 100% renewable energy in Germany in 2050, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102:1-13.
- Krakowski, V., Assoumou, E., Mazauric, V. and Maïzi, N. (2016). Feasible path toward 40–100% renewable energy shares for power supply in France by 2050: A prospective analysis, *Applied Energy*, 171:501–522.
- Meijer, R. J. (1965). Philips Stirling engine activities, SAE Technical Paper (No. 650004).
- Lin, B., Zhu, J. (2019). Determinants of renewable energy technological innovation in China under CO₂ emissions constraint, *Journal of Environmental Management*, 247:662-671.
- Nathaniel, S. P., Iheonu, C. O. (2019). Carbon dioxide abatement in Africa: The role of renewable and non-renewable energy consumption. *Science of The Total Environment*, 679:337-345.
- Organ, A. J., (2014). *Stirling cycle engines inner workings and design*. John Wiley and Sons, Ltd, (ISBN:9781118818435).
- Ozcan, M. (2018). The role of renewables in increasing Turkey's self-sufficiency in electrical energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2629-2639.
- Reséndiz-Antonio, M., and Santillán, M. (2014). On the dynamical vs. thermodynamical performance of a β -type stirling engine, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 409:162-174.
- Rinia, H., Pre, F. K. D. (1946). Air engines, *Philips Technical Review*, 8:129-136.
- Stirling, R., *Stirling Air Engine and The Heat Regenerator*, Patent no 4081, 1816.
- Urieli, I. and Berchowitz, D. M. (1984). *Stirling Cycle Engine Analysis*. (1. Edition). Bristol: Adam Hilger.
- Weenen, F. L. V. 1947. "The Construction of the Philips air engine", *Philips Technical Review*, 9(5):125-134.



Kasis Profilinin Pasif Süspansiyon Sistemli Çeyrek Araba Modeli Kullanılarak Sürüş Konforuna Etkisi

The Effect of Bump Profile on Driving Comfort Using a Quarter Car Model with Passive Suspension System

Cihan Berke Cülcüoğlu¹, M. Taylan Daş¹

Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71305 Kırıkkale/TÜRKİYE

Başyuru/Received: 30/03/2021

Kabul / Accepted: 06/07/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Sürüş konforu, sürücü sağlığı ve araç sürüşünün daha güvenli olması için önemli bir faktördür. Yol profiline bağlı olarak araç içi vücut ivmelenmesi azaltılarak sürüş konforu artırılabilir. Bu çalışma, bir kasis üzerinden geçen araç için sistem davranışını ve sürücü konforunu incelemiştir. Kasis üzerinden geçiş hızları 5-25 km/sa arasında değerlendirilmiştir. Kasis uzunluğu TS 6283 standardına göre 3.6 m olarak alınmıştır. Kasis boyunun vücut ivmelenmesine etkisini karşılaştırmak için kasis uzunluğu 2.4 m olarak da alınmış, farklı kasis uzunlukları için sistem davranışı incelenmiştir. Hareket denklemleri; Newton-Euler metodu kullanılarak çıkartılmış, Matlab-Simulink'te blok diyagramları oluşturulup benzetim yapılmıştır. Karekök ortalaması [Root Mean Square (RMS)] metodu kullanılarak ivme değerlerine göre dikey ekseninde vücut ivmelenmesi ve yer değiştirmesi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Çeyrek araba modeli, Pasif süspansiyon, Sürüş konforu”

Abstract

Driving comfort is an important factor for driver health and safer driving. Depending on the road profile, driving comfort can be increased by reducing the in-vehicle body acceleration. This study examined system behavior and driver comfort for a vehicle passing over a bump. Passing speeds over the bump are evaluated between 5-25 km / h. The bump length is taken as 3,6 m according to TS 6283 standard. In order to compare the effect of bump length on body acceleration, the bump length was also taken as 2,4 m, and system behavior for different bump lengths was examined. Equations of motion were derived by using Newton-Euler method, block diagrams were created and simulated in Matlab-Simulink. Body acceleration and displacement on the vertical axis were investigated according to acceleration values using the Root Mean Square (RMS) method.

Key Words

“The Quarter car model, Passive suspension, Drive Comfort”

1. Giriş

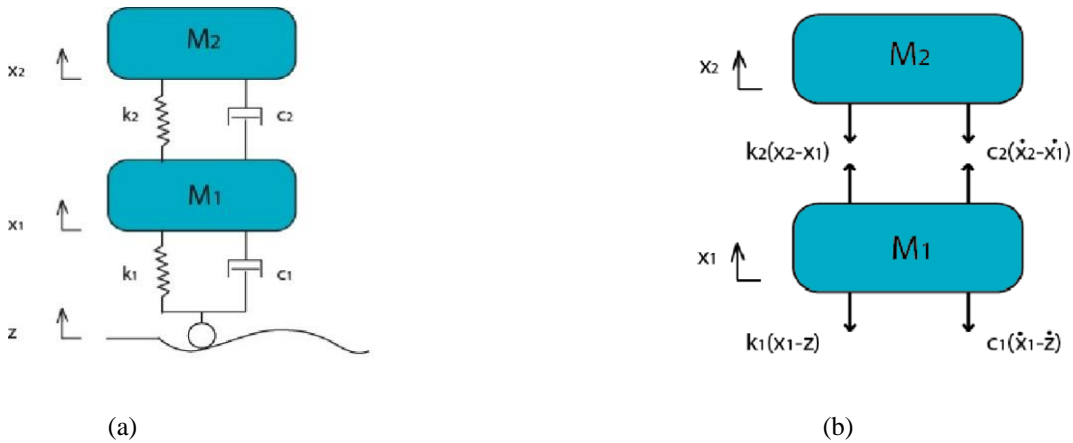
Araç süspansiyon sistemi, araç gövdesi ve tekerleklerin ayrımını sağlayan mekanik bir sistemdir. Süspansiyon sistemi; yay, amortisör ve bağlantı elemanlarından oluşur. Süspansiyon sistemi; yol tutuş, yük taşıma ve yolcu konforu olarak 3 ana kriter altında incelenir. Yol profilinin düzensizliği araç dinamiğini ve sürüş konforunu etkiler. İyi bir şekilde tasarlanmış süspansiyon, yol bozukluklarından kaynaklı titreşimleri en aza indirgeyerek sürücü için konfor sağlamalıdır, (Rajendiran ve ark., 2016), (Ahmed, 2015). Süspansiyon sistemi yol ile araç gövdesi arasındaki bağlantıyı yapar. Ani duruşlarda ve bozuk yollarda araç kontrolünü sürdürmeyi sağlarken sürüş konforunu da sağlamalıdır, (Florin ve ark., 2013). Temel anlamda sürüş konforunu sağlamak için dikey ivmelenmeyi en aza indirmeyi hedefler, (Salem ve Ayman, 2009). Süspansiyon sisteminin sürüş konforuna etkisi olduğu kadar sürücünün vücut sistemi ve bel ağrısı üzerinde de etkisi vardır, (Agharkakli ve ark., 2012). Literatürde birçok farklı parametre ve yöntemle çeyrek araba modeli üzerinde sürücü konforu için çalışmalar yapılmıştır, (Phalke ve Anirban, 2017). Genel olarak geçmiş çalışmalarda, çeyrek araba modeli için 5-25 km/sa hız aralığında kasis üzerinden geçişte araç davranışları incelenmiştir. Hareket denklemleri Newton'un ikinci yasasına uygun olarak oluşturulmuştur. Matlab-Simulink'te blok diyagramlarla tasarlanan çeyrek araç modelinin dikey yöndeki yer değiştirme ve ivme grafikleri oluşturulmuştur. Karekök ortalaması metoduyla ivme grafikleri oluşturulmuştur, (Phalke ve Anirban, 2017), (Nagarkar ve ark., 2016), (Hassaan, 2014), (Hassaan, 2015). Genel olarak bu çalışmada kasis üzerinden geçişlerde farklı hız değerlerinin ve kasis uzunluğunun sürüş konforuna etkisi incelenmiştir.

2. Matematiksel Modelleme

Matematiksel modelleme veya hareket denklemlerinin çıkarımı bir sistemin en basit anlamda sistem davranışını ele alan analitik denklemlerin elde edilmesidir. Mekanik sistemlerde hareket denklemlerini elde etmek için Newton-Euler denklemleri veya enerji metodu olarak bilinen Lagrange yaklaşımı kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında süspansiyon sistemi pasif olarak ele alınmış olup matematiksel modeli Newton yaklaşımıyla elde edilmiştir.

Günümüz araçlarında yaygın olarak kullanılan pasif süspansiyon sistemleri yol profili ve araç parametrelerine göre süspansiyon elemanlarından oluşur. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte yarı aktif ve aktif süspansiyon sistemleri de kullanılmaya başlanmıştır. Bu sistemler elektronik kontrol ile her bir süspansiyon sistemini ayrı ayrı denetler ve hidrolik olarak dışarıdan bir kuvvet uygular. Yani farklı yol koşullarına ve rüzgârın oluşturduğu yanal kuvvetlere göre tepki verip süspansiyonu ayarlar.

Bu çalışmada kullanılan pasif süspansiyonlu çeyrek araba modeli Şekil 1(a)'da gösterilmiştir. Literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır; çünkü modellenmesi ve hesaplanması basittir. Oluşturulan model iki serbestlik derecelidir: (x_1, x_2) . Giriş sinyali yani dış kuvvet olarak da tanımlanan yol profilinin araç üzerindeki etkisi (z) gösterilmiştir. Serbest kütleler arasında konumlandırılmış yay ve sönüm elemanı amortisörü oluşturur. M_1 kütlesi ve yol profili arasında konumlandırılmış yay ve sönüm elemanı, lastik sertliği ve lastik içerisindeki havayı temsil etmektedir.



Şekil 1. (a) Çeyrek araba modeli, (b) Çeyrek araba modelinin serbest cisim diyagramı

Şekil 1 (b)'de serbest cisim diyagramında gösterildiği gibi yay ve sönüm elemanlarının kütleler üzerindeki kuvvet etkileri oluşturulmuştur.

Hareket denklemlerini oluşturmak için $x_2 > x_1 > z$ kabulü ile; denklem (1) ve (2) de gösterilmiştir.

$$M_2 \ddot{x}_2 = -k_2 \cdot (x_2 - x_1) - c_2 \cdot (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (1)$$

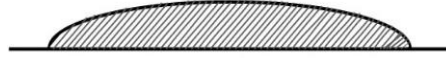
$$M_1 \ddot{x}_1 = k_2 \cdot (x_2 - x_1) + c_2 \cdot (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_1 \cdot (x_1 - z) - c_1 \cdot (\dot{x}_1 - \dot{z}) \quad (2)$$

Tablo 1: Parametre değerleri, (Mahajan, 2016)

Tanımlama	Parametre	Değer
Süspansiyon ağırlığı	M_1 (kg)	28
Araç gövdesinin ağırlığı	M_2 (kg)	208
Tekerlek yay katsayısı	k_1 (N/m)	127200
Süspansiyon yay katsayısı	k_2 (N/m)	18709
Süspansiyon sönüm katsayısı	c_2 (Ns/m)	1300
Tekerlek sönüm katsayısı	c_1 (Ns/m)	10

2.2 Yol Profili Modeli

Modellemedeki sistem üzerinde girdi sinyali olarak hız kesici tümsek Şekil 2'de şematik olarak gösterilmiştir. Türk Standartları Enstitüsünün TS 6283 standardına uygun şekilde aşağıdaki gibi modellenmiştir. Kasis tipleri, kısa, uzun ve düz tepeli olmak üzere 3 farklı kategoride sınıflandırılmaktadır. Bu çalışma kapsamında TS6283 standardı kapsamında boyu 3.6- 3.80 m olarak kullanılan uzun tümsek modeli ele alınmıştır. Avrupa birliği standartlarında kasis uzunluğu 3.7 - 4.25 m arasında kullanılmaktadır. (Arslan ve Hossainy,2020)



Şekil 2: Uzun kasis-Yol profili

$$0 < t < \frac{T}{2} \quad \text{için} \quad z = Z \sin(w_z t)$$

$$t > \frac{T}{2} \quad \text{için} \quad z = 0$$

$$Z=0.1 \text{ m} \quad L= 3.6 \text{ m}$$

Yukarıdaki denklem için kasis yüksekliği Z , kasis genişliği L , kasis frekansı w_z ve zaman t olarak tanımlıdır. Kasis frekansının hesaplanabilmesi için araba modelinin ne kadar sürede kasisten geçtiği, yani periyodu denklem (3) ile hesaplanabilir.

Kasis profili sinüsün bir fonksiyonu olarak modellenmiştir. Sinüs dalgasının bir tam periyodu göz önüne alındığında, sinüs dalgasının $0 < t < \frac{T}{2}$ arasındaki yarım periyodu ile kasis geometrisi oluşturulabilir. $t > \frac{T}{2}$ olarak tanımlanan kısımda z değişkenini sıfıra götürerek kasis sonunda düz bir yol profili tanımlanabilir.

$$T/2 = L/(V \cdot 1000/3600) \quad (3)$$

Hesaplanan periyot ile;

$$w_z = \frac{2\pi}{T} \quad (4)$$

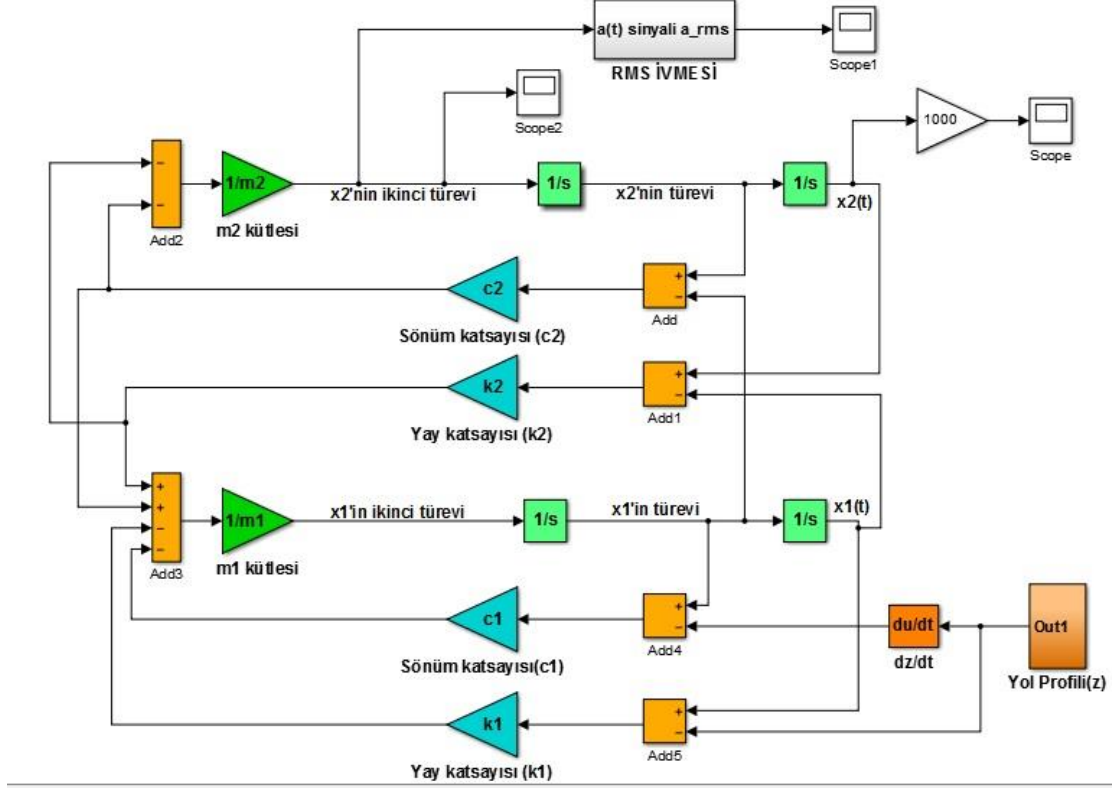
Denklem (4)'te frekans değeri hesaplanabilir.

Kasis uzunluğunun sürüş konforuna etkisini inceleyebilmek için, kasis boyunun kısaltıldığında araç davranışının karşılaştırılabilmesi için; $Z=0.1 \text{ m}$ ve $L=2.4 \text{ m}$ olarak alınıp tartışma kısmında değerlendirilmiştir.

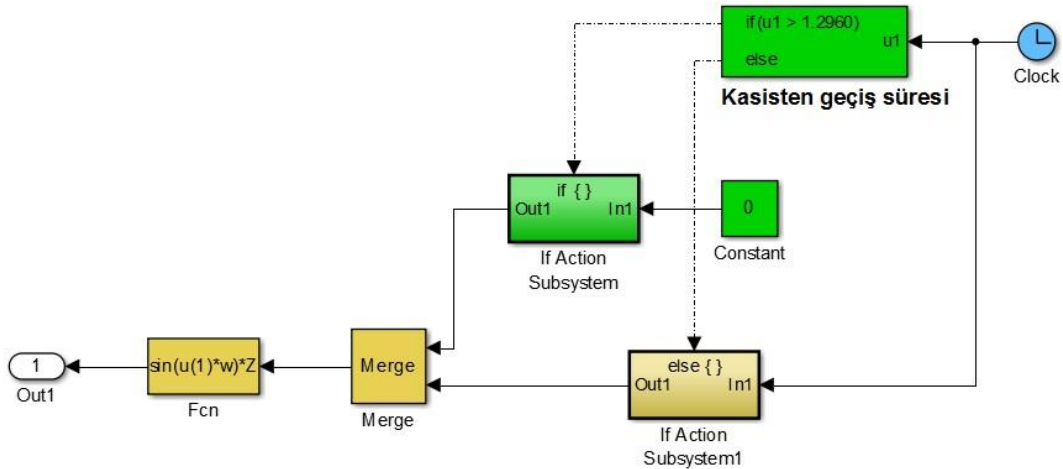
3. Modelleme ve Blok Diyagramların Gösterimi

3.1. Çeyrek araba modeli

Hareket denklemlerinin çözülebilmesi için Matlab-Simulink kullanılmıştır. Hareket denklemleri Şekil 3'te görüldüğü gibi blok diyagramlar olarak modellenmiştir. Giriş sinyali olarak yol profili sinüs dalgası şeklinde Şekil 4'te gösterildiği gibi modellenip sistemin davranışı analiz edilmiştir. Parametreleri ve giriş sinyali girdisini kullanarak farklı araç hızları ve kasis uzunlukları için süspansiyon ve araç kütesinin hareket grafikleri program üzerinde çizdirilebilir ve sistem davranışı incelenebilir.



Şekil 3. Çeyrek araba blok diyagramı- Simulink modeli



Şekil 4. Çeyrek araba blok diyagramı- Simulink modeli

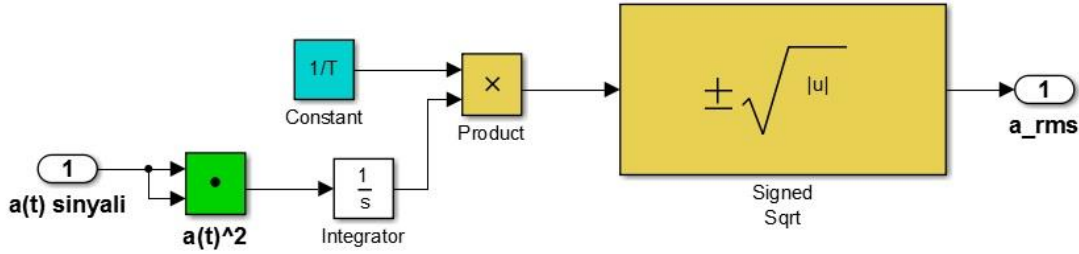
Şekil 4'te aracın kasis üzerinden geçiş süresi $v=10$ km/sa ve $L=3.6$ m için 1.2960 s olarak gösterilmiştir. Bu süre yarım periyoda eşittir ve her hız değeri için değişkendir.

3.2 RMS İvmesi Modeli

RMS metodu (Root Mean Square (karekök ortalaması)), sürüş konforunun belirli standartlar dahilinde irdelenebilmesi için kullanılan bir yöntemdir. Titreşim hareketi yapan sistemlerin farklı yönlerde salınım yapması pozitif ve negatif değerler ortaya çıkarır. Bu değerlerin ortalaması gerçeği yansıtmaz. Bu nedenle ISO-2631’de belirtilen aşağıdaki denklem yardımıyla her bir çıkış sinyalinin karelerinin karekök içerisinde ortalaması alınarak RMS değeri belirlenir. Denklem (5)’te verilen RMS ivme formülü Matlab-Simulink ile Şekil 5’te görüldüğü gibi blok diyagram olarak modellenmiştir.

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt} \quad (5)$$

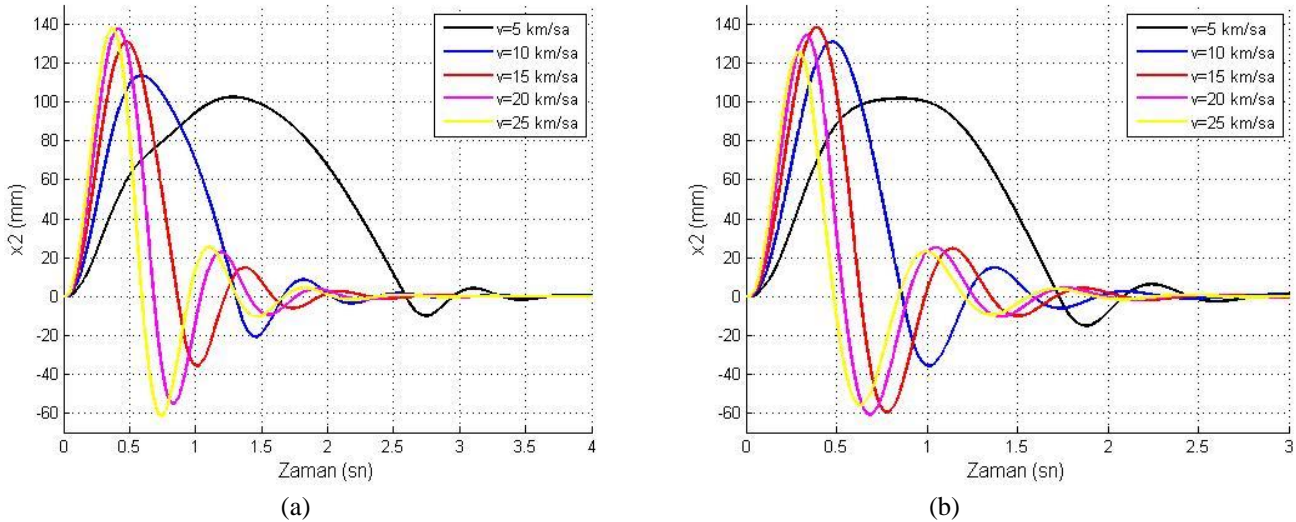
ISO-2631 standardına göre a_{rms} ivmesi 0.315 m/s^2 ’den küçük olduğu durumlarda konforlu, $0.315 < a_{rms} < 0.5$ az konforlu, $0.5 < a_{rms} < 0.8$ biraz konforlu, $a_{rms} > 0.8$ durumunda konforsuz olarak belirtilmiştir, (Zoccali, 2018). Araç tasarımında kullanılan yükler arasında kasilerden kaynaklanan yükler de yer almaktadır, (Doğru, 2019). Ayrıca trafik kazalarına sebep olarak araç, yol ve sürücü durumlarının etkisinin sınıflandırılması da makine öğrenmesiyle çalışılmıştır, (Altın ve ark, 2021).



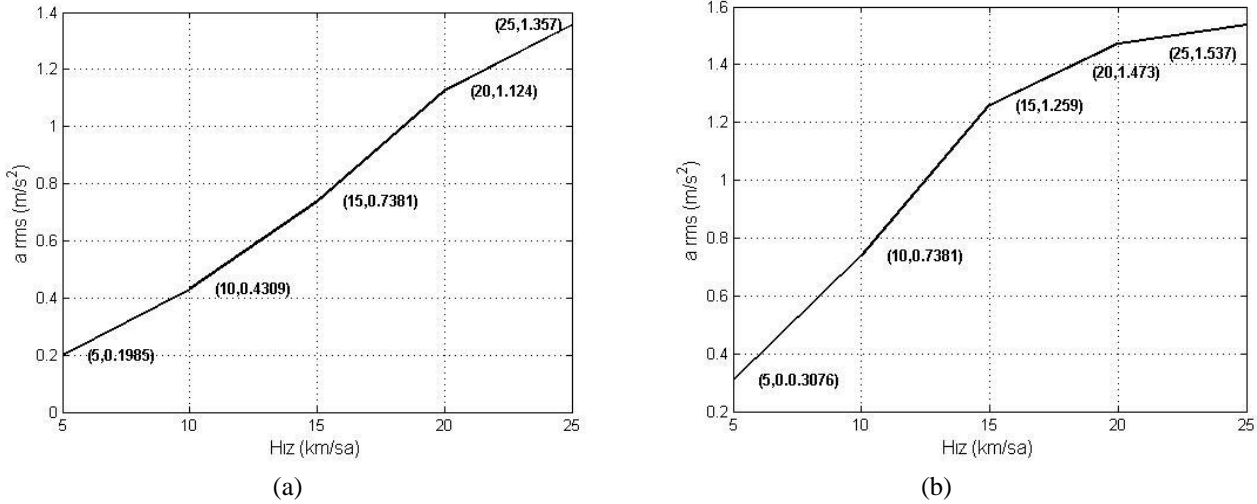
Şekil 5. RMS ivmesi blok diyagramı-Simulink

4 Analiz Sonuçları Ve Tartışma

Newton’un ikinci hareket yasasıyla çıkartılan hareket denklemleri ve Matlab-Simulink programında modellenen sistem için girdi sinyali olarak yol profilinin verildiği üst kısımlarda bahsedilmiştir. Bu kısımda çeyrek araba modeli için bir kasis üzerinden belirli hızlarda ($v=5-25 \text{ km/sa}$) geçişinde sistem davranışı, her bir hız değeri için M2 kütesinin yer değiştirme grafikleri ve karekökleri ortalaması metodu ile vücut ivmesi grafikleri incelenmiştir. Standartta yer verilen $L=3.6\text{m}$ kasis boyunu, daha düşük bir kasis boyu ile karşılaştırmak için $L=2.4\text{m}$ kasis boyuna sahip bir kasisin sürüş konforuna ve vücut yer değiştirmesine etkisi de incelenmiştir.



Şekil 6. (a) $L=3.6$ için M2’nin yer değiştirmesi, (b) $L=2.4$ için M2’nin yer değiştirmesi



Şekil 7. (a) L=3.6 için sürüş konforu Hız- a_{rms} grafiği, (b) L=2.4 için sürüş konforu Hız- a_{rms} grafiği

Şekil 6.a ve Şekil 6.b'de görüldüğü üzere sistem davranışına bakıldığında hızın artmasıyla sistemin yerleşme zamanının azaldığı gözlemlenir. Bu durum, araç hızıyla yani tümsekten geçiş süresiyle ilişkilendirilebilir. Ancak araç hızının artmasıyla birlikte M2 kütesinin maksimum ve minimum yer değıştirmesi de artmaktadır. Bu durum dikey eksen hareketinde daha düşük sürelerde daha yüksek bir hızlanma yaratacağı için ivmelenmeyi artırır ve sürüş konforunu etkiler. Şekil 7.a ve Şekil 7.b'deki grafik 5-25 km/sa hız aralığında ve L=3.6 m, L=2.4 m kasis uzunlukları için RMS vücut ivmelenmesini göstermektedir. a_{rms} ivmesinin 0.8 m/s²'den küçük olduğu durumlar konforlu olarak nitelendirilir. Yani L=3.6 m için 16 km/sa, L=2.4 m için 10.6 km/sa hızından daha düşük hızlar için sürüşün konforlu olduğu söylenebilir. Ayrıca kasis uzunluğunun azalmasıyla sürüş konforunun azaldığı da söylenebilir.

5. Sonuç

Bu çalışma, bir kasis üzerinden geçen pasif süspansiyon sistemli araç için sistem davranışını ve sürücü konforunu incelenmiştir. Hareket denklemleri Newton'un ikinci hareket yasasıyla çıkartılmış ve Matlab-Simulink'te sistem blok diyagramlarıyla modellenmiş, analiz edilmiş ve grafikleri çizdirilmiştir. Sürücü ivmelenmesi; karekök ortalaması metodu yardımıyla, kullanılan her bir hız değeri için hesaplanmış, grafiği çizdirilmiştir. Yol profilinden araç geçiş hızı arttıkça yerleşme zamanının azaldığı fakat vücut yer değıştirmesinin arttığı gözlemlenmiştir. Hesaplanan ortalama ivme değerlerinden L=3.6 m için 16 km/sa, L=2.4 m için 10.6 km/sa'ten daha düşük hızlarda konforlu olduğu belirtilmiştir. Kasis uzunluğunun azalmasıyla sürüş konforunun azaldığı belirlenmiştir.

Kaynaklar

Agharkakli, A., Sabet, G. S., & Barouz, A. (2012). Simulation and analysis of passive and active suspension system using quarter car model for different road profile. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 3(5), 636-644.

Ahmed, A. E. N. S., Ali, A. S., Ghazaly, N. M., & Abd el-Jaber, G. T. (2015). PID controller of active suspension system for a quarter car model. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 8(6), 899.

Arslan, T., Hossainy, M. (2020). Hız Tümseklerinin Araç ve Sürücüler/Yolcular Üzerindeki Etkilerinin Simülasyon Yöntemi ile Araştırılması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3 (1) , 11-16 .

Doğru, M. H. (2019). Topology Optimization of Truck Chassis Under Multi Loading Conditions. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 6(3), 856-867.

Florin, A., Ioan-Cozmin, M. R., & Liliana, P. (2013). Passive suspension modeling using MATLAB, quarter-car model, input signal step type. *New technologies and products in machine manufacturing technologies*, 258-263.

Hassaan, G. A. (2014). Car dynamics using quarter model and passive suspension, part I: effect of suspension damping and car speed. *International Journal of Computer Techniques*, 1(2), 1-9.

- Hassaan, G. A. (2015). Car dynamics using quarter model and passive suspension, Part II: a novel simple harmonic hump. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 12(1), 93-100.
- Mahajan, B. D., & Divekar, A. A. (2016, May). Modeling and system identification of a quarter car suspension using Simulink. In *2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)* (pp. 180-183). IEEE.
- Nagarkar, M. P., Patil, G. J. V., & Patil, R. N. Z. (2016). Optimization of nonlinear quarter car suspension–seat–driver model. *Journal of advanced research*, 7(6), 991-1007.
- Phalke, T. P., & Mitra, A. C. (2017). Analysis of Ride comfort and Road holding of Quarter car model by SIMULINK. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 2425-2430.
- Rajendiran, S., & Lakshmi, P. (2016). Simulation of PID and fuzzy logic controller for integrated seat suspension of a quarter car with driver model for different road profiles. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(10), 4565-4570.
- Salem, M. M. M., & Aly, A. A. (2009). Fuzzy control of a quarter-car suspension system. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 53(5), 258-263.
- Yavuz, A. A., Ergül, B., & Aşık, E. G. (2021). Trafik Kazalarının Makine Öğrenmesi Yöntemleri Kullanılarak Değerlendirilmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(1), 66-73.
- Zoccali, P., Loprencipe, G., & Lupascu, R. C. (2018). Acceleration measurements inside vehicles: Passengers' comfort mapping on railways. *Measurement*, 129, 489-498.



Beton ve Mermer Atıkları Kullanılarak Üretilen Bitümlü Sıcak Karışımların Optimum Bitüm Miktarının Bulanık Mantık Yöntemi ile Tahmin Edilmesi

Estimating the Optimum Bitumen Amount of Hot Bituminous Mixtures Produced Using Concrete and Marble Wastes by Fuzzy Logic Method

*Erdinç Halis Alakara¹ , Melih Naci Ağaoğlu¹ 

¹Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 60000 Tokat, Türkiye

Başvuru/Received: 22/04/2021

Kabul / Accepted: 29/08/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Özet

Bu çalışmada, Marshall Tasarım Yöntemi kullanılarak 6 farklı asfalt karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlarda agrega olarak; beton atığı, mermer atığı ve kalker kökenli doğal agrega kullanılmıştır. Her bir karışım grubunda bitüm yüzdesi; %3.5, %4, %4.5, %5, %5.5, %6 ve %6.5 olmak üzere 7 farklı şekilde kullanılmıştır. Her bir bitüm yüzdesi için 3 adet olmak üzere toplamda 126 (6*7*3) adet Marshall numunesi üretilmiştir. Karışımlar üretilirken Karayolları Teknik Şartnamesi 2013 (KTŞ 2013)'te binder tabakası için verilen kriterler göz önüne alınmıştır. Agrega gruplarının Marshall parametreleri ve optimum bitüm değerleri grafik yöntemiyle tespit edilmiştir. Sonrasında agrega efektif özgül ağırlığı ve bitüm yüzdesinin girdi olarak; pratik özgül ağırlığın ise çıktı olarak kullanıldığı bir bulanık mantık modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model sayesinde numunelere ait pratik özgül ağırlık değeri tahmin edilmiş ve buradan formül yardımıyla numunelere ait hava boşluğu yüzdesi değerleri hesaplanmıştır. Bu veriler yardımıyla "Hava Boşluğu-Bitüm Oranı" grafiği çizilmiş ve %5 hava boşluğu değerine karşılık gelen değer optimum bitüm değeri olarak belirlenmiştir. Son olarak, deneysel çalışmadan ve bulanık mantık metodu yardımıyla tahmin edilen optimum bitüm değerleri kıyaslanmıştır. Deneysel ve tahmin sonuçlarından elde edilen verilerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

"Bitümlü sıcak karışım, bulanık mantık, optimum bitüm, geri dönüşüm, Marshall yöntemi, agrega özgül ağırlığı"

Abstract

In this study, 6 different asphalt mixtures were prepared using the Marshall Design Method. As aggregate in the prepared mixtures, concrete waste, marble waste and natural aggregate of limestone origin were used. Percentage of bitumen in each mixture group; It was used in 7 different ways as 3.5%, 4%, 4.5%, 5%, 5.5%, 6% and 6.5%. A total of 126 (6*7*3) Marshall samples were produced, 3 for each bitumen percentage. While producing the mixtures, the criteria given for the binder layer in the Highways Technical Specification 2013 (KTŞ 2013) were taken into consideration. Marshall parameters and optimum bitumen values of aggregate groups were determined by graphic method. Afterwards, aggregate effective specific gravity and bitumen percentage as input; A fuzzy logic model has been developed in which practical specific gravity is used as the output. Thanks to the developed model, the practical specific gravity value of the samples was estimated and the air void percentage values of the samples were calculated with the help of the formula. With the help of these data, the graph of "Air Void-Bitumen Ratio" was drawn and the value corresponding to 5% air void value was determined as the optimum bitumen value. Finally, the optimum bitumen values estimated from the experimental study and with the help of fuzzy logic method were compared. It has been seen that the data obtained from the experimental and estimation results are quite close to each other.

Keywords

"Bituminous hot mix, fuzzy logic, optimum bitumen, recycling, Marshall method, aggregate specific gravity"

1. Giriş

Dünyada ve ülkemizde karayolu inşaatında kullanılan en yaygın üstyapı çeşidi esnek üstyapılardır. Esnek üstyapıların en üst katmanı olan kaplama tabakasında, agrega ve bitümden oluşan bitümlü sıcak karışım (BSK) malzemesi kullanılmaktadır. Birçok inşaatın imalatında olduğu gibi üstyapı imalatında da agregalar oldukça yüksek miktarlarda kullanılmaktadır. BSK'nın yaklaşık %95'i agregadan, %5'i de bitümden oluşmaktadır (Umar & Açar, 1991). Agregalar BSK'nın büyük bir kısmını oluşturduğu için karışımın performansını da önemli ölçüde belirlemektedir. Bu agregalar, genellikle doğal taş kaynaklarından elde edilmektedir. Fakat son yıllarda kaliteli agrega ocaklarına olan ihtiyacın artması, agrega temininde büyük sıkıntılar meydana getirmiştir. Bu sıkıntıların başında çevresel sorunlar gelmektedir. Doğal taş ocaklarından agrega çıkarma işlemi genelde patlatma yöntemiyle olduğu için bu durum ekolojik dengenin bozulmasına ve ocakların etrafındaki bitki örtüsünün yok olmasına neden olmaktadır. Tüm bu durumlar araştırmacıları, atık malzemelerin yeniden kullanımı üzerine incelemeler yapmaya yönlendirmiştir. Son yıllarda özellikle atık malzemelerin asfalt karışımlarında agrega olarak kullanımı ile ilgili çalışmalar oldukça hız kazanmıştır. Atık olarak ortaya çıkan çürük, tuğla tozu, pirinç kabuğu, atık mermerler gibi endüstriyel atık malzemelerin BSK'da kullanılabilirliğinin araştırılmasıyla ilgili çalışmalar yapılmıştır.

Pota ocağı çürufunun BSK'larda filler agrega olarak kullanımının incelendiği çalışmada, pota ocağı çürufu içeren asfalt karışımların hacimsel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Sonuç olarak pota ocağı çürufu içeren karışımların, kontrol numunelerine göre dolaylı çekme mukavemeti, hacimsel özellik ve tekrarlanan yüklere karşı direnç gibi durumlar açısından oldukça yüksek bir performans sağladığı tespit edilmiştir (Bocci, 2018). Diğer bir çalışmada ise tuğla tozunun mineral filler olarak BSK'larda kullanımı araştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, tuğla tozu ile hazırlanan karışımların, kontrol karışımlarına göre daha iyi bir mekanik özelliğe sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca tuğla tozunun, asfalt karışımların yorulma ömrünü ve nem hassasiyetini artırdığı, kalıcı deformasyonu ise önemli ölçüde azalttığı görülmüştür (Chen vd., 2011). BSK'larda pirinç kabuğu külünün filler agrega olarak kullanılmasının araştırıldığı bir diğer çalışmada ise pirinç kabuğu külünün %50 oranında filler agregaya ikame edilmesi durumunda en yüksek stabiliteyi verdiği ve BSK'larda kullanımının uygun olduğu tespit edilmiştir (Sargin vd., 2013). Atık mermerlerin BSK'nın binder tabakasında kullanımının incelendiği çalışmada; atık mermer katkılı ve katkısız Marshall numuneleri üretilmiş ve sonuç olarak mermer atığı ile üretilen karışımların hafif ve orta hacimli trafiğe maruz kalan kaplamaların binder tabakasında kullanılabilirliği görülmüştür (Gürer, 2005).

Yapılan araştırmalar sonucunda, tüm dünyada oluşan katı atıkların neredeyse yarısının inşaat sektöründen kaynaklandığı görülmüştür. Katı atıkların yaklaşık %40'ının inşaat ve yıkıntı atıklarından, bunun ise %50-60 oranında beton atıklarından oluştuğu tahmin edilmektedir (Maçın & Demir, 2018). Katı atıkların çok fazla olduğu bir diğer sektör ise mermer madenciligidir. Mermer madenciliginde, ocaktan çıkarma ve tesislerde işleme sırasında oldukça büyük miktarlarda atıklar oluşmaktadır. Mermerlerin ocaktan çıkarılması sırasında %50 civarında atık meydana gelirken, tesislerde işleme sırasında %20 civarında atık mermer parçaları oluşmaktadır (Alakara, 2020). Oluşan bu atıkların uygun bir şekilde geri dönüştürülmesi ile özellikle yol inşaatı gibi agreganın oldukça yoğun kullanıldığı kısımlarda kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir. Bu sayede hem ekonomik açıdan hem de çevresel açıdan büyük katkı sağlanacaktır.

Literatür çalışmaları incelendiğinde, BSK'lara ait bazı parametre değerlerinin bulanık mantık metodu ile tahmin edilebildiği görülmüştür. BSK'nın rijitliğinin Shell metoduna göre incelendiği çalışmada; bulanık mantık yaklaşımı kullanılarak bir tahmin modeli oluşturulmuştur. Sonuç olarak bulanık mantık yaklaşımından elde edilen değerlerin Shell metoduna göre hesaplanan değerlere oldukça yakın olduğu belirlenmiştir (Sayın & Tanyıldızı, 2006). BSK numunelerine ilave edilen polimer yüzdesi ve kırılma yüzdesine bağlı olarak Marshall stabilite değerlerinin tahmin edildiği çalışmada; deneysel ve tahmin sonuçları karşılaştırıldığında %5.12'lik bir hata oranıyla stabilite değerlerinin tahmin edilebildiği görülmüştür (Zehabchi vd., 2018). Bulanık mantıkla ilgili yapılan diğer bir çalışmada ise genişletilmiş kil kullanılarak üretilen hafif asfalt karışımların Marshall stabilitesi tahmin edilmiştir. Çalışmada girdi olarak birim hacim ağırlık, bitüm miktarı ve ultrases geçiş hızı değerleri; çıktı olarak ise stabilite değeri girilmiştir. Sonuç olarak Marshall stabilite değerlerinin çok yüksek bir doğrulukla tahmin edilebildiği görülmüştür (Serin vd., 2013).

Normal uygulamada BSK'ların optimum bitüm değerinin tespit edilebilmesi için Marshall deneyi kullanılmaktadır. Bu deney hem yorucu hem de zaman alıcıdır. Literatür araştırmaları, optimum bitümün bulanık mantık metodu kullanılarak tahmin edilmesine yönelik kısıtlı sayıda çalışmaların bulunduğunu göstermektedir. Literatürdeki bu eksiklik göz önüne alınarak yapılan bu çalışmada bir bulanık mantık modeli kurulmuştur. Modelde, agrega karışımlarına ait efektif özgül ağırlık değerleri ve bitüm miktarları girdi olarak; pratik özgül ağırlık değeri ise çıktı olarak kullanılmıştır. Daha sonra tahmin edilen pratik özgül ağırlık değerleri yardımıyla hava boşluğu yüzdesi değerleri belirlenmiş ve buradan da her bir gruba ait optimum bitüm miktarları tahmin edilmiştir. Son olarak bulanık mantık modeli kullanılarak elde edilen tahmin verileri deneysel veriler ile kıyaslanmıştır. Çalışma sayesinde; herhangi bir deneysel işlem gerçekleştirilmeden, çok kısa bir sürede ve çok yüksek bir doğruluk oranıyla optimum bitüm oranının tespit edilebileceği görülmüştür.

2. Deneysel Program

2.1. Materyal

2.1.1. Bitüm

Çalışma kapsamında 50/70 penetrasyon sınıfına sahip bitüm kullanılmıştır. Kullanılan bitüme ait fiziksel özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Bitümün fiziksel özellikleri

Test	Deney sonucu	Standart
Penetrasyon (25°C)	58	TS EN 1426
Yumuşama Noktası (°C)	50	TS EN 1427
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	1.036	TS 1013 EN ISO 3675
Düktilite (25°C, 5 cm/min)	> 100	TS EN 13589
Parlama Noktası (°C)	302	TS EN ISO 2592

2.1.2. Agregası

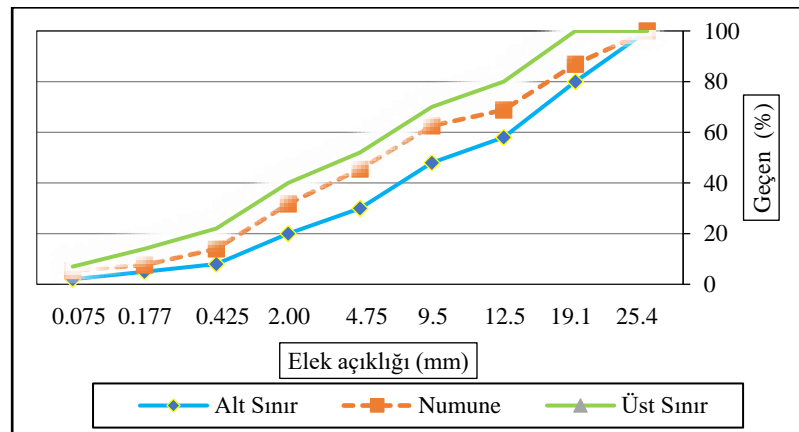
Çalışmadaki agregası karışımlarında; kalker kökenli doğal agregası, atık mermer ve atık beton agregası olmak üzere 3 farklı agregası tipi, farklı boyut ve yüzdelerde kullanılmıştır. Bu karışımlara ait bilgiler Tablo 2’de gösterilmiştir. Atık mermer ve atık betonlar laboratuvar tipi çeneli kırıcı ile belirli boyutlara getirilmiştir. Agregalara ait fiziksel özellikler Tablo 3’te verilmiştir. Çalışma kapsamında, binder tabakasına uygun olarak hazırlanan agregası gradasyonu Şekil 1’de gösterilmiştir. Şekil 1’de elde edilen agregası gradasyonunda agregası karışımının; %58.6’sı kaba agregası, %36.7’si ince agregası ve %4.7’si filler agregadan oluşmaktadır.

Tablo 2. Agregası gruplarının karışım oranları

Grup Adı	Kaba Agregası (%)		İnce Agregası (%)		Filler (%)	Toplam (%)
	Doğal	Mermer Atığı	Doğal	Beton Atığı	Doğal	
1	58.6	-	36.7	-	4.7	100
2	-	58.6	36.7	-	4.7	100
3	-	58.6	18.35	18.35	4.7	100
4	58.6	-	18.35	18.35	4.7	100
5	-	58.6	27.53	9.17	4.7	100
6	58.6	-	27.53	9.17	4.7	100

Tablo 3. Agregaların fiziksel özellikleri

Malzeme özellikleri	Doğal Agregası			Atık Mermer	Beton Atığı		Standart
	Kaba	İnce	Filler	Kaba	İnce		
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2.714	2.734	2.724	2.71	2.68	TS EN 1097-6	
Su emme (%)	0.45	0.67	-	0.30	6.82	TS EN 1097-6	
Los Angeles Aşınma değeri	20.65	-	-	20.78	-	TS EN 1097-2	
Yassılık indeksi değeri (%)	17.6	-	-	23.1	-	BS 812	
Soyulma Mukavemeti (%)	≥ 60’tan fazla	-	-	≥ 60’tan fazla	-	KTŞ Kıs 403 Ek-A	
Sıkışık Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	1.54	1.86	-	1.48	1.55	TS EN 1097-3	
Gevşek Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	1.40	1.69	-	1.33	1.42	TS EN 1097-3	

**Şekil 1.** Karışımlarda kullanılan agregası gradasyonu

2.2. Metot

2.2.1. Marshall tasarımı

BSK numunelerinin hazırlanmasında Marshall Tasarımı Metodu kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, Tablo 1’de verilen 6 farklı agrega karışımı ve 7 farklı bitüm oranı (%3.5, %4, %4.5, %5, %5.5, %6 ve %6.5) kullanılarak Marshall numuneleri hazırlanmıştır. Agrega karışımının ağırlığı oranınca bitüm ilave edilmiş ve her bir bitüm oranında 3 adet numune üretilmiştir. Bu şekilde toplamda 126 (6x7x3) adet numune hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanırken; 1150 gram agrega karışımı tartılmış ve bitüm ile birlikte etüvde 155°C’da yaklaşık bir gün ısıtılmıştır. Etüvden alınan agrega ve bitüm terazide tartılmış ve alttan ısıtıcılı mikserde karıştırılmıştır. Hazırlanan karışım önceden ısıtılmış ve yağlanmış kalıplara doldurularak Marshall tokmağı ile numunelerin her iki yüzüne 75 darbe uygulanmıştır. Son olarak numuneler oda sıcaklığında soğutulmuştur (Alakara, 2020).

2.2.2. Marshall parametrelerinin hesaplanması

Marshall parametreleri şu şekilde belirlenmektedir: öncelikle numunenin havadaki ağırlığı (A) belirlenir. Daha sonra numune suda bekletilerek doygun kuru yüzey ağırlığı (B) tespit edilir. Son olarak sudaki ağırlık (C) belirlenerek buradan numunenin hacmi (V) hesaplanır. Ayrıca hava boşluğu (V_h) değerinin hesaplanabilmesi için maksimum teorik özgül ağırlığın (D_T) belirlenmesi gerekir. Bu değer agrega efektif özgül ağırlığı (G_{ef}), numunede kullanılan bitüm yüzdesi (W_a) ve bitümün özgül ağırlığına (G_b) bağlı olarak hesaplanır. Marshall parametreleri Eşitlik 1, 2, 3 ve 4’te verilen formüller yardımıyla hesaplanır. Hazırlanan numunelerin, Marshall parametreleri belirlendikten sonra pratik özgül ağırlık (D_p), stabilite, akma, agregalar arası boşluk (VMA), asfalt ile dolu boşluk (V_f) ve hava boşluğu (V_h) grafikleri çizilerek optimum bitüm oranı hesaplanmıştır. Optimum bitüm miktarı, genellikle şartnamede verilen hava boşluğu limit değerlerinin ortalamasına karşılık gelen değer olarak alınmaktadır (Orhan, 2012). KTS 2013 binder tabakası için hava boşluğu limit değerlerini %4-6 arasında kabul etmiştir (KTS, 2013). Ortalama hava boşluğu değerine (%5) bağlı olarak belirlenen optimum bitüm değerine karşılık gelen diğer değerler grafikler yardımıyla hesaplanır ve şartnameye uygunluğu kontrol edilir.

$$V = B - C \quad (1)$$

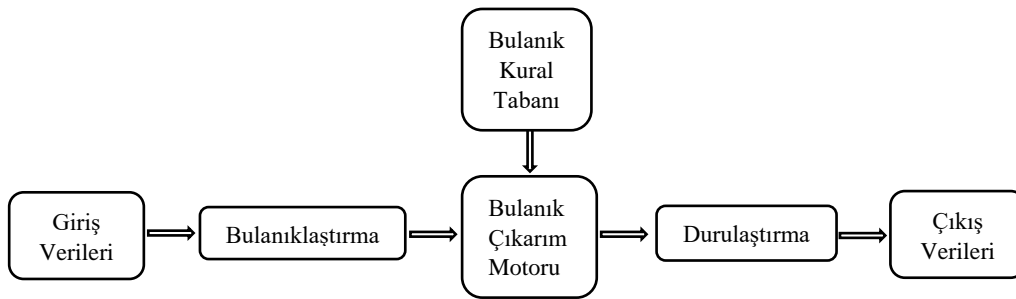
$$D_p = \frac{A}{V} \quad (2)$$

$$D_T = \frac{100 + W_a}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{W_a}{G_b}} \quad (3)$$

$$V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100 \quad (4)$$

2.2.3. Bulanık mantık

Lotfi Zadeh tarafından 1965 yılında geliştirilen bulanık küme teorisi, belirsizlik konusu ile ilgilenen bir matematiksel araçtır (Zehtabchi vd., 2018). Model, hesapları kelimelerle ifade etme kavramını ortaya koymuştur. Model sayesinde, şüpheli kavramların veya belirsiz kümelerin elde edilmesi ve tanımlanması gerçekleştirilir. Ayrıca belirsizliklerin analizini kolaylaştıran bir modeldir. Son zamanlarda, bulanık mantık uygulamalarının sayısı büyük ölçüde artmıştır. Bu uygulamalar beyaz eşyalardan tıbbi uygulamalara kadar oldukça geniş bir alana yayılmıştır. Bulanık teori "az", "çok", "orta", "yüksek", "düşük" gibi dilsel yapıları temsil eden mekanizma sağlamaktadır (Kara & Karacasu, 2017; Topçu vd., 2008; Topçu & Sarıdemir, 2008 a; Topçu & Sarıdemir, 2008 b; Kokoç, Ersöz & Aktepe, 2020). Bulanık mantık sistemleri oldukça hızlı, sorunsuz ve kontrol karmaşıklığı çok az olan bir modeldir. Şekil 2’de bulanık mantık modeline ait temel öğeler gösterilmiştir.



Şekil 2. Bulanık mantık modeline ait temel öğeler

Model genel olarak;

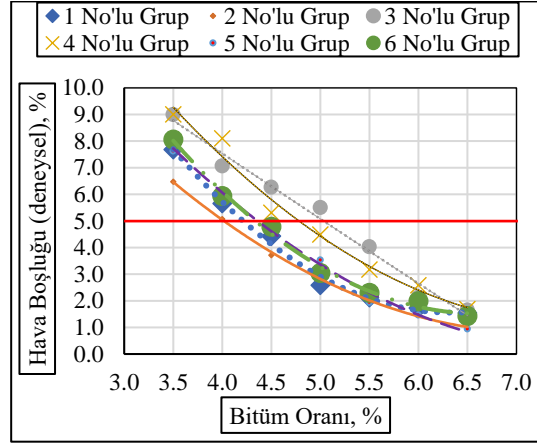
- Girdiler ve çıktılar arasındaki bulanık ilişkilere bağlı olarak “Eğer-Öyleyse” şeklinde oluşturulmuş bir bulanık kural tabanı,
- Bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarını tanımlayan veri tabanı,
- Kurallara bağlı olarak çıkarım işlemi yapan karar verme birimi,

- Girdileri sözel ifadeye dönüştüren bulanıklaştırma arayüzü,
- Bulanık sonuçları net çıktıya dönüştüren bir durulaştırma arayüzünden oluşmaktadır [18].

3. Deneysel Bulgular

3.1. Marshall Parametrelerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi

Çalışma kapsamında üretilen Marshall numunelerine ait parametreler deneyler sonucu belirlenmiştir. Optimum bitüm miktarı, her bir agrega karışım grubu için Şekil 3'te verilen "Hava Boşluğu – Bitüm Oranı" grafiğindeki, %5 hava boşluğu değerine karşılık gelen değer olarak alınmıştır.



Şekil 3. "Hava boşluğu – bitüm oranı" grafiği

Her bir agrega grubuna ait optimum bitüm değeri belirlendikten sonra Tablo 4'te gösterildiği gibi optimum bitüm değerlerine karşılık gelen stabilite, akma, asfaltla dolu boşluk ve agregalar arası boşluk değerlerinin şartname limitlerine uygunluğu kontrol edilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde tüm gruplar için bu değerlerin şartname limitleri arasında kaldığı görülmektedir. Tablo 5'te ise Marshall numunelerine ait özgül ağırlık ve hava boşluğu değerleri gösterilmektedir. Bu parametreler belirlenirken Eşitlik 1-4'te verilen formüller kullanılmıştır.

Tablo 4. Optimum bitüm miktarına karşılık gelen Marshall parametreleri

Karışım Grupları	Parametreler						
	Optimum Bitüm (%)	Pratik Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Hava boşluğu (%)	Asfaltla Dolu Boşluk (%)	Agregalar Arası Boşluk (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
1	4.20	2.410	5	64.44	13.89	1379	2.23
2	4.02	2.419	5	63.31	13.51	1113	2.38
3	5.03	2.347	5	64.54	14.10	1253	2.27
4	4.78	2.352	5	63.17	13.48	1542	2.55
5	4.35	2.387	5	63.23	13.47	1236	2.67
6	4.33	2.386	5	62.98	13.33	1310	2.52
Şartname Limitleri							
min	-	-	4	60	13	750	2
max	-	-	6	75	15	-	4

Tablo 4'te verilen deney sonuçları incelendiğinde, karışımlarda mermer agregası kullanılması durumunda stabilite değerlerinde düşüşler olduğu görülmektedir. Bu durumun mermer agregalarının yassılık indeksinin yüksek olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Fakat bu düşüşler şartname sınır değerinin oldukça üzerinde kalmaktadır. Karışımlarda ince agrega olarak beton atığı kullanılması durumunda ise stabilite değerlerinde genel olarak bir artış elde edilmiştir. Mermer ve beton atıklarının bir arada kullanılmasıyla kontrol karışımlarının stabilite değerine yakın sonuçlar elde edilebileceği de tespit edilmiştir. Beton atığının poroz bir yapıda olması ise karışımların optimum bitüm miktarlarının artmasına sebep olmuştur. Ancak beton atığı ve mermer atıklarının çevreye verdiği zararlar göz önüne alındığında, bu artışların göz ardı edilebilir miktarda olduğu düşünülmektedir. Pratik özgül ağırlık değerleri incelendiğinde ise beton atıklarının artmasıyla pratik özgül ağırlık değerlerinin düştüğü görülmüştür. Ayrıca beton atıklarının artması durumunda karışımların hava boşluğu değerleri artmıştır. Bu durumların nedeninin de yine beton atıklarının poroz bir yapıya sahip olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

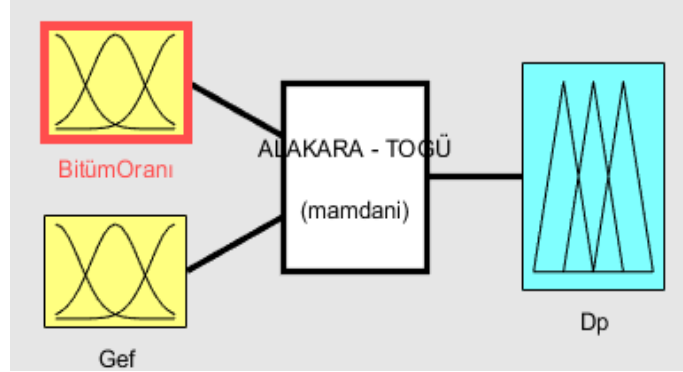
Tablo 5. Numunelere ait özgül ağırlık ve hava boşluğu değerleri

Agrega Karışım Grubu	Bitüm Oranı (%)	G_{ef} (g/cm ³)	D_T (g/cm ³)	Deneysel Sonuçlar	
				D_p (g/cm ³)	V_h (%)
1 No'lu Grup	3.5	2.703	2.564	2.367	7.68
	4.0		2.545	2.401	5.67
	4.5		2.528	2.416	4.41
	5.0		2.511	2.446	2.58
	5.5		2.494	2.441	2.13
	6.0		2.477	2.434	1.77
	6.5		2.461	2.423	1.54
2 No'lu Grup	3.5	2.704	2.564	2.398	6.48
	4.0		2.546	2.417	5.09
	4.5		2.529	2.435	3.70
	5.0		2.511	2.438	2.93
	5.5		2.495	2.446	1.94
	6.0		2.478	2.441	1.49
	6.5		2.462	2.438	0.96
3 No'lu Grup	3.5	2.655	2.522	2.295	8.98
	4.0		2.504	2.327	7.10
	4.5		2.488	2.332	6.26
	5.0		2.471	2.335	5.49
	5.5		2.455	2.356	4.02
	6.0		2.439	2.387	2.15
	6.5		2.424	2.384	1.65
4 No'lu Grup	3.5	2.654	2.521	2.294	8.98
	4.0		2.504	2.301	8.10
	4.5		2.487	2.355	5.29
	5.0		2.470	2.359	4.49
	5.5		2.454	2.376	3.20
	6.0		2.438	2.375	2.61
	6.5		2.423	2.382	1.68
5 No'lu Grup	3.5	2.680	2.544	2.350	7.62
	4.0		2.526	2.372	6.08
	4.5		2.509	2.389	4.78
	5.0		2.492	2.404	3.52
	5.5		2.475	2.427	1.95
	6.0		2.459	2.423	1.49
	6.5		2.443	2.420	0.96
6 No'lu Grup	3.5	2.678	2.542	2.337	8.04
	4.0		2.524	2.374	5.97
	4.5		2.507	2.387	4.79
	5.0		2.490	2.414	3.07
	5.5		2.474	2.417	2.28
	6.0		2.458	2.409	1.96
	6.5		2.442	2.407	1.44

3.2. Marshall Deney Sonuçlarının Bulanık Mantık Modeli ile Tahmini

Bu çalışmada, MATLAB programı içerisinde yer alan Mamdani tipi Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi (Fuzzy Inference System-FIS) kullanılarak Marshall parametrelerinden pratik özgül ağırlık (D_p) değerleri tahmin edilmiştir. Oluşturulan modelde girdi verileri olarak agrega karışım gruplarının efektif özgül ağırlığı (G_{ef}) ve bitüm oranı; çıktı olarak ise pratik özgül ağırlık (D_p) değerleri kullanılmıştır. 126 adet Marshall numunesinden elde edilen veriler kullanılarak bu model oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında oluşturulan bulanık mantık modeli Şekil 4'te gösterilmiştir. Modeldeki girdi ve çıktılara ait semboller Tablo 6'da; bu sembollere ait dilsel anlamlar da Tablo 7'de gösterilmiştir. Modele ait üyelik fonksiyonları ise Şekil 5'te gösterildiği gibidir. Üyelik fonksiyonları bazı kriterlere göre belirlenmiştir. BSK'larda binder tabakasındaki bitüm oranı değerleri KTŞ 2013'te %3.5-6.5 arasında kalmaktadır. Bu nedenle bitüm oranına ait üyelik fonksiyonun sınır değerleri şartnamedeki sınır değerler dikkate alınarak belirlenmiştir. Karışımların efektif özgül

ağırlık değerleri 2.654 ile 2.704 arasında değiştiği için efektif özgül ağırlık değerlerinin üyelik fonksiyonlarının sınır değerleri bu aralık göz önüne alınarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma sonucu elde edilen pratik özgül ağırlık değerleri ise 2.294 ile 2.446 arasında değiştiği için pratik özgül ağırlık değerlerinin üyelik fonksiyonlarının sınır değerleri de bu aralıkta seçilmiştir. Oluşturulan modelde toplamda 42 adet “Eğer-Öyleyse” kuralı oluşturulmuştur. Bu modelde pratik özgül ağırlık (D_p) değerleri tahmin edildikten sonra Marshall numunelerine ait hava boşluğu yüzdesi (V_h) değerleri Eşitlik 4’te verilen formül yardımıyla dolaylı olarak hesaplanmıştır. Bu sayede hava boşluğu değerleri herhangi bir deney yapılmadan sadece agrega karışımının efektif özgül ağırlığı ve bitüm oranına bağlı olarak formül yardımıyla hesaplanmıştır.



Şekil 4. Bulanık mantık modelinin genel yapısı

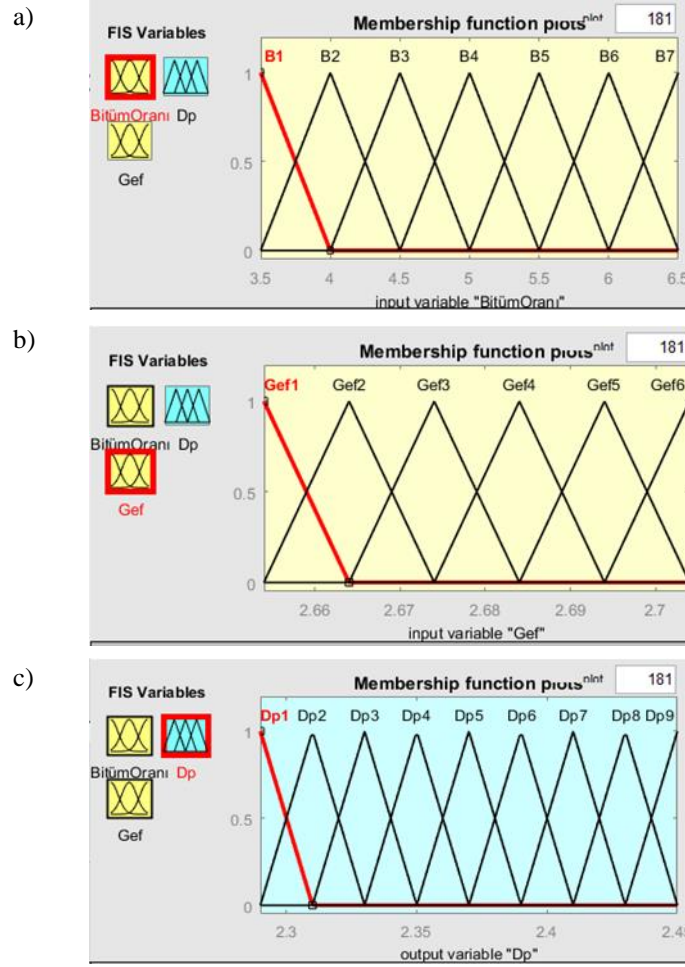
Tablo 6. Modelde kullanılan semboller

Girdiler		Çıktı
Bitüm oranı, (%)	Agrega karışımın efektif özgül ağırlığı (g/cm^3)	Pratik özgül ağırlık (g/cm^3)
B1	G_{ef1}	D_p1
B2	G_{ef2}	D_p2
B3	G_{ef3}	D_p3
B4	G_{ef4}	D_p4
B5	G_{ef5}	D_p5
B6	G_{ef6}	D_p6
B7		D_p7
		D_p8
		D_p9

Girdiler ve çıktılar için Tablo 6’da verilen sembollerin dilsel anlamı Tablo 7’de verilmiştir. “Eğer-Öyleyse” şeklinde oluşturulan modele ait kurallardan bazıları Şekil 6’da gösterilmiştir.

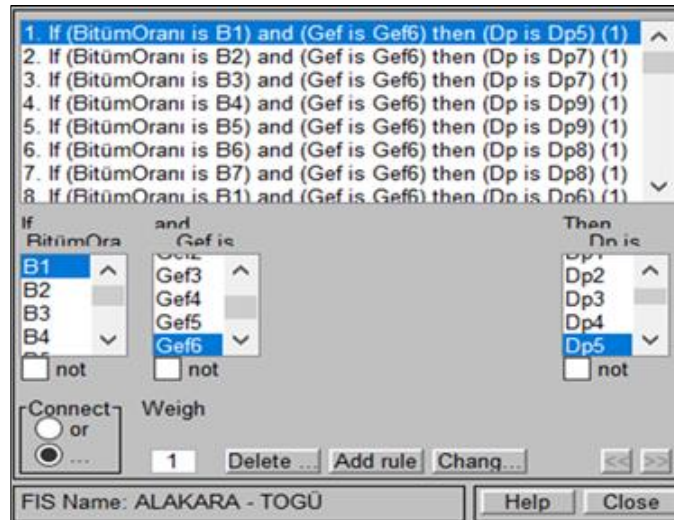
Tablo 7. Girdiler ve çıktı için sembollerin dilsel anlamı

Girdiler		Çıktı
B1: Çok düşük	G_{ef1}: Çok düşük	D_p1: Minimum
B2: Düşük	G_{ef2}: Düşük	D_p2: Çok düşük
B3: Düşük-Orta arası	G_{ef3}: Düşük-Orta arası	D_p3: Düşük
B4: Orta	G_{ef4}: Orta	D_p4: Düşük-Orta arası
B5: Orta-Yüksek arası	G_{ef5}: Orta-Yüksek arası	D_p5: Orta
B6: Yüksek	G_{ef6}: Yüksek	D_p6: Orta-Yüksek arası
B7: Çok yüksek		D_p7: Yüksek
		D_p8: Çok yüksek
		D_p9: Maksimum



Şekil 5. Modele ait üyelik fonksiyonları; a) B, b) Gef, c) Dp

Bu modelde, 42 adet “Eğer-Öyleyse” kuralı kullanılarak kural tabanı oluşturulmuştur. Modele ait kural örneği şu şekildedir: Eğer (bitüm oranı B1) ve (efektif özgül ağırlık G_{ef} 6) ise (pratik özgül ağırlık D_{p5}) şeklindedir. Kural örneğinde bitüm ve agrega efektif özgül ağırlığı kısımlarına sayısal değerler girilmektedir. Tablo 8’de bulanık mantık modeli ile tahmin edilen D_p değerleri ve Denklem 4’e göre hesaplanan V_h değerleri gösterilmiştir.



Şekil 6. Modele ait bazı kurallar

Tablo 8. Bulanık mantık modeli ile tahmin edilen değerler

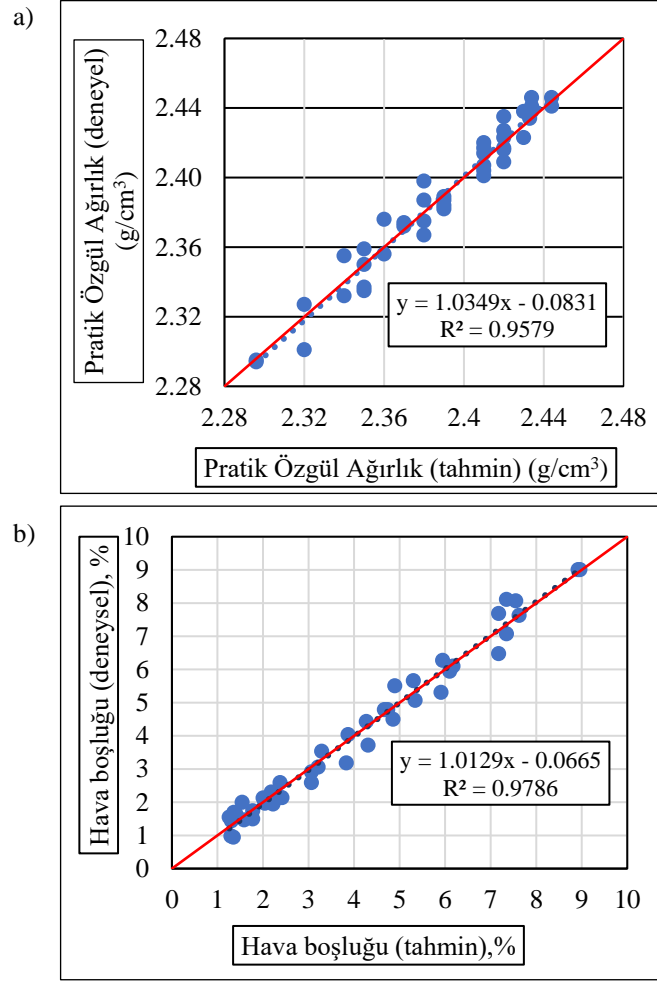
Agrega Karışım Grubu	Bitüm Oranı (%)	G_{ef} (g/cm ³)	D_T (g/cm ³)	Tahmin Sonuçları	
				D_P (g/cm ³)	V_h (%)
1 No'lu Grup	3.5	2.703	2.564	2.380	7.18
	4.0		2.545	2.410	5.30
	4.5		2.528	2.420	4.27
	5.0		2.511	2.434	3.07
	5.5		2.494	2.444	2.00
	6.0		2.477	2.433	1.78
	6.5		2.461	2.430	1.26
2 No'lu Grup	3.5	2.704	2.564	2.380	7.18
	4.0		2.546	2.410	5.34
	4.5		2.529	2.420	4.31
	5.0		2.511	2.434	3.07
	5.5		2.495	2.444	2.04
	6.0		2.478	2.434	1.78
	6.5		2.462	2.430	1.30
3 No'lu Grup	3.5	2.655	2.522	2.296	8.96
	4.0		2.504	2.320	7.35
	4.5		2.488	2.340	5.95
	5.0		2.471	2.350	4.90
	5.5		2.455	2.360	3.87
	6.0		2.439	2.380	2.42
	6.5		2.424	2.390	1.40
4 No'lu Grup	3.5	2.654	2.521	2.296	8.93
	4.0		2.504	2.320	7.35
	4.5		2.487	2.340	5.91
	5.0		2.470	2.350	4.86
	5.5		2.454	2.360	3.83
	6.0		2.438	2.380	2.38
	6.5		2.423	2.390	1.36
5 No'lu Grup	3.5	2.680	2.544	2.350	7.63
	4.0		2.526	2.370	6.18
	4.5		2.509	2.390	4.74
	5.0		2.492	2.410	3.29
	5.5		2.475	2.420	2.22
	6.0		2.459	2.420	1.59
	6.5		2.443	2.410	1.35
6 No'lu Grup	3.5	2.678	2.542	2.350	7.55
	4.0		2.524	2.370	6.10
	4.5		2.507	2.390	4.67
	5.0		2.490	2.410	3.21
	5.5		2.474	2.420	2.18
	6.0		2.458	2.420	1.55
	6.5		2.442	2.410	1.31

Tablo 9'da deneysel ve tahmin sonuçlarına ait D_P ile V_h değerleri bir arada gösterilerek bu veriler arasındaki yüzdesel mutlak farklar gösterilmiştir.

Tablo 9. Deneysel ve tahmin sonuçlarına ait yüzdesel farklar

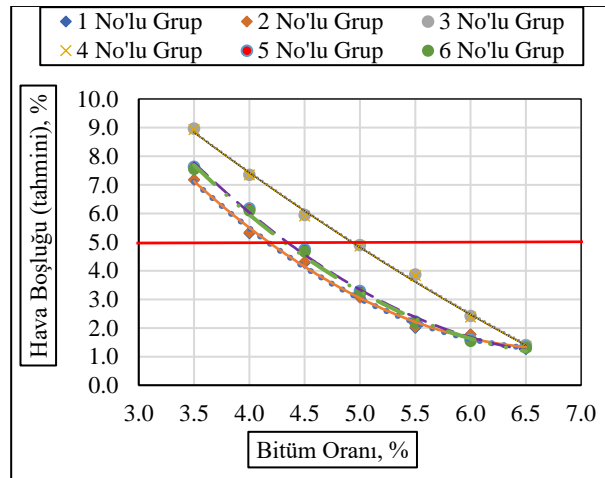
Agrega Karışım Grubu	Deneysel Sonuçlar		Tahmin Sonuçları		Yüzdesel Fark (%)	
	D _p (g/cm ³)	V _h (%)	D _p (g/cm ³)	V _h (%)	D _p (g/cm ³)	V _h (%)
1 No'lu Grup	2.367	7.68	2.380	7.18	0.55	6.51
	2.401	5.67	2.410	5.30	0.37	6.53
	2.416	4.41	2.420	4.27	0.17	3.17
	2.446	2.58	2.434	3.07	0.49	18.99
	2.441	2.13	2.444	2.00	0.12	6.10
	2.434	1.77	2.433	1.78	0.04	0.56
	2.423	1.54	2.430	1.26	0.29	18.18
2 No'lu Grup	2.398	6.48	2.380	7.18	0.75	10.80
	2.417	5.09	2.410	5.34	0.29	4.91
	2.435	3.70	2.420	4.31	0.62	16.49
	2.438	2.93	2.434	3.07	0.16	4.78
	2.446	1.94	2.444	2.04	0.08	5.15
	2.441	1.49	2.434	1.78	0.29	19.46
	2.438	0.96	2.430	1.30	0.33	35.42
3 No'lu Grup	2.295	8.98	2.296	8.96	0.04	0.22
	2.327	7.10	2.320	7.35	0.30	3.52
	2.332	6.26	2.340	5.95	0.34	4.95
	2.335	5.49	2.350	4.90	0.64	10.75
	2.356	4.02	2.360	3.87	0.17	3.73
	2.387	2.15	2.380	2.42	0.29	12.56
	2.384	1.65	2.390	1.40	0.25	15.15
4 No'lu Grup	2.294	8.98	2.296	8.93	0.09	0.56
	2.301	8.10	2.320	7.35	0.83	9.26
	2.355	5.29	2.340	5.91	0.64	11.72
	2.359	4.49	2.350	4.86	0.38	8.24
	2.376	3.20	2.360	3.83	0.67	19.69
	2.375	2.61	2.380	2.38	0.21	8.81
	2.382	1.68	2.390	1.36	0.34	19.05
5 No'lu Grup	2.350	7.62	2.350	7.63	0.00	0.13
	2.372	6.08	2.370	6.18	0.08	1.64
	2.389	4.78	2.390	4.74	0.04	0.84
	2.404	3.52	2.410	3.29	0.25	6.53
	2.427	1.95	2.420	2.22	0.29	13.85
	2.423	1.49	2.420	1.59	0.12	6.71
	2.420	0.96	2.410	1.35	0.41	40.63
6 No'lu Grup	2.337	8.04	2.350	7.55	0.56	6.09
	2.374	5.97	2.370	6.10	0.17	2.18
	2.387	4.79	2.390	4.67	0.13	2.51
	2.414	3.07	2.410	3.21	0.17	4.56
	2.417	2.28	2.420	2.18	0.12	4.39
	2.409	1.96	2.420	1.55	0.46	20.92
	2.407	1.44	2.410	1.31	0.12	9.03

Tablo 9'da verilen deneysel ve tahmini "D_p" değeri ile "V_h" değeri arasındaki ilişki incelenmiştir. Deneysel ve tahmini değerler arasındaki ilişkiler Şekil 7'de gösterilmiştir. Burada verilen R² değerleri deneysel ve tahmin verileri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. R² en fazla "1" değerini alabilmekte ve 1'e yaklaştıkça güvenilir sonuçlar alınmaktadır. Verilen grafikler incelendiğinde ise oldukça yüksek R² (D_p: %95.79, V_h: %97.86) değerlerinin elde edildiği görülmektedir.



Şekil 7. Deneysel ve tahmin verileri arasındaki regresyon ilişkisi; a) Dp, b) Vh

Tablo 8’de verilen Vh değerlerine göre Şekil 8’de verilen “Hava Boşluğu – Bitüm Oranı” grafiği çizilmiştir. Daha sonra KTŞ 2013’e göre %5 hava boşluğu değerine karşılık gelen değer optimum bitüm miktarı olarak kabul edilmiş ve Tablo 10’da verilen değerler optimum bitüm olarak bulunmuştur.

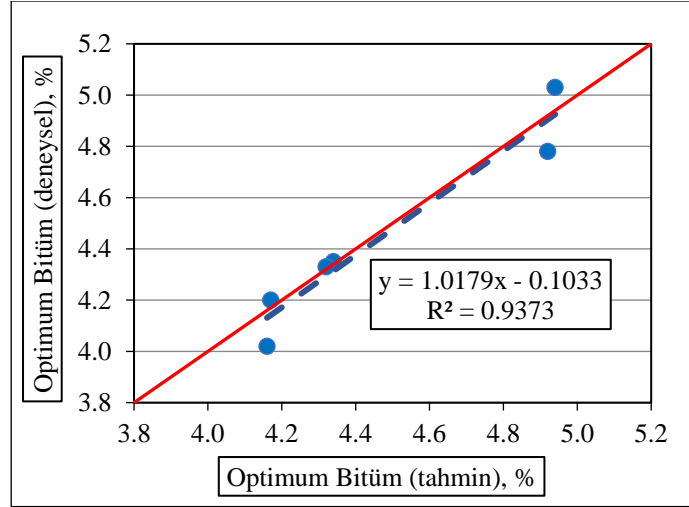


Şekil 8. Tahmini hava boşluğu – bitüm oranı grafiği

Tablo 10. Deneysel ve tahmini optimum bitüm oranları

Numune Grup No	Optimum Bitüm Oranı (%)	
	Deneysel	Tahmini
1 No'lu Grup	4.20	4.17
2 No'lu Grup	4.02	4.16
3 No'lu Grup	5.03	4.94
4 No'lu Grup	4.78	4.92
5 No'lu Grup	4.35	4.34
6 No'lu Grup	4.33	4.32

Son olarak deneysel ve tahmini bitüm değerleri arasındaki ilişkiyi daha iyi görebilmek için Şekil 9'da verilen grafik çizilmiştir.



Şekil 9. Deneysel ve tahmini optimum bitüm değerleri arasındaki regresyon ilişkisi

Şekil 9'daki grafik incelendiğinde, R^2 değerinin 0.9373 olarak bulunduğu görülmektedir. Buradaki denklem kullanılarak yapılan tahminlerde, 1'e oldukça yakın olduğu tespit edilen R^2 değeri dikkate alındığında, bulunan optimum bitüm değerlerinin anlamlı olduğu görülmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, BSK'ların optimum bitüm oranı bulanık mantık yaklaşımıyla tahmin edilmiştir. Çalışmada, Marshall Tasarım Yöntemi kullanılarak asfalt numuneleri üretilmiştir. Ayrıca üretilen numunelerde mermer ve beton atıkları kullanılmış ve bu atıkların BSK'larda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Karışımlarda atık mermer kullanılması durumunda stabilite değerlerinde bir azalış olduğu tespit edilmiştir. Bu düşüşün mermer agregalarının yassılık indeksi değerinin yüksek olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Ancak bu azalışa rağmen numuneler şartnamede verilen minimum stabilite değerinin (750 kg) oldukça üzerinde kalmıştır. Şehir içi yollarda ve trafiğin az olduğu yollarda atık mermer kullanımının uygun olabileceği ve bu şekilde atık haldeki malzemelerin de bertaraf edilebileceği düşünülmektedir. Ayrıca karışımlarda mermer ve beton atıklarının birlikte kullanılması durumunda, şahit numunelerin stabilite değerlerine oldukça yakın bir sonuç elde edilebileceği görülmektedir.
- Sonuçlar incelendiğinde, karışımlar içerisindeki beton atığı miktarının artması ile stabilitenin arttığı görülmektedir. Ancak beton atığının artması optimum bitüm miktarını da bir miktar artırmıştır. Fakat beton atıklarının çevreye verdiği zarar ve depolama maliyetleri düşünüldüğünde bu artışın göz ardı edilebilecek düzeyde olduğu düşünülmektedir.
- Deneysel sonuçlar ile oluşturulan bulanık mantık modeline göre tahmin edilen değerler arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler Şekil 7 ve Şekil 9'da gösterildiği gibi çizilmiştir. Grafikler incelendiğinde D_p , V_h ve optimum bitüm oranına ait R^2 değerlerinin sırasıyla %95.79, %97.86, %93.73 olarak bulunduğu, bu değerlerin 1'e oldukça yakın olduğu ve elde edilen tahminlerin anlamlı olduğu tespit edilmiştir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde Marshall numunelerinin pratik özgül ağırlık değerlerinin, optimum bitüm miktarına olan etkisinin bulanık mantık modeli ile araştırılmasına dair çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Bu çalışma sayesinde, numunelerin öncelikle pratik özgül ağırlık değerleri bulanık mantık yöntemiyle tahmin edilmiştir. Daha sonra denklemler yardımıyla hava boşluğu değerleri bulunmuştur. Elde edilen hava boşluğu değerleri kullanılarak "hava boşluğu-bitüm oranı" grafiği çizilmiştir. Son olarak %5 hava boşluğu değerine

karşılık gelen bitüm oranları her bir grup için optimum bitüm oranı olarak belirlenmiştir. Böylece pratik özgül ağırlık değerlerinin optimum bitüm miktarına olan etkisi bulanık mantık modeli kullanılarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlardan elde edilen optimum bitüm oranı değerleri ile tahmin edilen optimum bitüm oranı değerlerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Optimum bitüm miktarının sadece agrega özgül ağırlık değerine bağlı olmadığı, sıcaklık ve bitüm özellikleri gibi parametrelere de bağlı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle sonraki çalışmalarda bu gibi kriterlerin de dikkate alınmasında fayda olacağı düşünülmektedir. Ayrıca gelecek çalışmalarda mermer ve beton atıklarının ekonomikliği ile ilgili bir maliyet analizi yapılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

Referanslar

Akkurt S, Tayfur G & Can S. (2004). "Fuzzy logic model for the prediction of cement compressive strength" *Construction and Building Materials*, 34(8), 1429-1433. doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.020

Alakara E. H. (2020). Tokat İli Mermer İşletmelerinde Ortaya Çıkan Atık Mermerlerin ve Kentsel Dönüşüm Beton Atıklarının Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanımının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat.

Bocci E. (2018). "Use of ladle furnace slag as filler in hot asphalt mixtures". *Construction and Building Materials*, 161 (2018), 156–164, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.120

Chen M, Lin J, Wu S & Liu C. (2011). "Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture". *Construction and Building Materials*, 25 (4), 1532-1536. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.08.005

Gürer C. (2005). Atık Mermer Parçalarının Bitümlü Yol Kaplamalarında Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.

Kara Ç & Karacasu M. (2017). "Investigation of waste ceramic tile additive in hot mix asphalt using fuzzy logic approach". *Construction and Building Materials*, 141 (2017), 598-607. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.025

Karayolları Genel Müdürlüğü. "Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları". Ankara, 2012.

Karayolları Genel Müdürlüğü. "Karayolu Teknik Şartnamesi (KTS)". Ankara, 2013.

Kokoç M., Ersöz S. & Aktepe A. (2020). "A Fuzzy Inference System Proposal for Selecting Marketing Strategy". *International Journal of Eastern Anatolia Science Engineering and Design*, 2(1), 1-21.

Maçın K. E. & Demir İ. (2018). "Kentsel dönüşüm sürecinde İstanbul'da inşaat ve yıkıntı atıkları yönetimi". *ADYU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9 (2018), 188-201.

Sargın S, Saltan M, Morova N, Serin S & Terzi S. (2013). "Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete". *Construction and Building Materials*, 48 (2013), 390-397. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.029

Sayın E & Tanyıldızı H. (2006). "Bitümlü sıcak karışımların rijitliğinin bulanık mantık ile bulunması". *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21 (4), 645-649.

Serin S, Morova N, Sargın S, Terzi S & Saltan M. "The fuzzy logic model for the prediction of marshall stability of lightweight asphalt concretes fabricated using expanded clay aggregate". *Suleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Science*, 17(1), 163-172, 2013.

Topçu İ. B & Sarıdemir M. (2008). "Prediction of mechanical properties of recycled aggregate concretes containing silica fume using artificial neural networks and fuzzy logic". *Computational Materials Science*, 42 (1), 74-82. doi.org/10.1016/j.commatsci.2007.06.011

Topçu İ. B & Sarıdemir M. (2008). "Prediction of rubberized concrete properties using artificial neural network and fuzzy logic". *Construction and Building Materials*, 22(4), 532-540. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.11.007

Topçu İ. B, Karakurt C & Sarıdemir M. (2008). "Predicting the strength development of cements produced with different pozzolans by neural network and fuzzy logic". *Construction and Building Materials*, 29 (10), 1986-1991. doi.org/10.1016/j.matdes.2008.04.005

Umar F Ağar E. Yol Üstyapısı. Birinci baskı. İstanbul, Türkiye, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, 1991.

Zehtabchi A, Hashemi S. A. H & Asadi S. (2018). “Predicting the strength of polymer-modified thin-layer asphalt with fuzzy logic”. *Construction and Building Materials*, 169 (2018), 826-834. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.002



High-Risky Sectors in Terms of Work Accidents in Turkey

Hüseyin Ceylan^{*1}, Ahmet Kaplan², Murat Bekar¹

¹Kırıkkale University, Kırıkkale Vocational High School 71450, Kırıkkale, TURKEY

²Gümüşhane University, Gümüşhane Vocational High School 29100, Gümüşhane, TURKEY

Başvuru/Received: 17/05/2021 *Kabul / Accepted:* 23/07/2021 *Çevrimiçi Basım / Published Online:* 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Abstract

Work accidents are serious issues that disrupt harmonious environment in workplace. They cause not only death, injury or disability of employees, but also serious financial loss for businesses and countries. Work accidents are highly preventable incidents, when necessary, precautions are taken. Like the whole world, in Turkey also there are risky sectors where work accidents are intensified. The identification of risky sectors in Turkey, is the first step of being able to fight against work accidents in this sector. Therefore, in this study the riskiest sectors in Turkey were investigated basing on the official accident data from the last ten years. Thus, first of all, the sectoral distribution of work accidents, death and permanent incapacity cases that occurred in Turkey in 2010-2019 was examined. Sectors were evaluated in terms of six different parameters: the number of work accidents, the number of deaths because of work accidents, the number of permanent incapacities because of work accidents, general accident incidence rate, fatal accident incidence rate, and permanent incapacity accident incidence rate. The top ten sectors with intensity have been determined for each parameter. Then, all these data were combined and the ten most risky sectors in Turkey in terms of work accidents were defined. In the last 10 years, the sector of "41-Building Construction" has been found to be the riskiest sector in Turkey, where the most work accidents have occurred, the most employees die and the most employees are permanently disabled. On the other hand, the "05- Mining of Coal and Lignite" sector, in which the general accident incidence rate, fatal accident incidence rate, and permanent incapacity accident incidence rate values are the highest, was the second most risky sector.

Keywords: "Work Accidents, Risk, Risky Sectors, Building Construction, Turkey."

1. Introduction

Occupational accidents are unintentional and unexpected events that result from unsafe acts and conditions, resulting in death or property damage, or temporarily halt production and are mostly preventable with the proper precautions. The causes of work accidents are formulated with a **4M** approach. The 4M here comes from the first letters in the English words **Man**, **Machine**, **Media** and **Management**. In other words, the causes of occupational accidents can be collected under four main headings. These are;

- ✓ Human causes (Man),
- ✓ Technical reasons arising from factors such as machinery, countertops and materials (Machine),
- ✓ Causes of environmental factors (Media),
- ✓ Reasons arising from disorders in management and organizational structure (Management).

As in Turkey, there are risky sectors in terms of occupational accidents in the world. The Construction, Mining and Transportation sectors are the most frequently experienced sectors of deaths in occupational accidents. However, the fact that the accident incidence rate values in countries where OHS measures are implemented effectively are much lower than in Turkey reveals how important OHS is in preventing accidents. The top three countries with the highest fatal accident incidence rate values in the world are India, Russia and Turkey. This situation is important for Turkey's OHS performance.

Although work accidents are an important problem for all countries, they can be distinctly prevented if the concept of Occupational Health and Safety (OHS) is applied correctly. The most important consequence of work accidents is the death, severe injury, limb loss or disability of employees. According to the International Labor Organization's (ILO) report "Safety and Health at the Heart of the Future of Work", each year 380.000 workers die in work accidents, while 374.000.000 workers are injured in non-fatal work accidents (ILO, 2019). Moreover, these figures tend to increase. Along this financially immeasurable cost that employees endure, there are also economic losses caused by work accidents. Again, according to ILO estimates, this financial loss is 4% of global gross domestic product. In countries where the OHS mechanism works well, these financial losses approach 1% of the country's gross product, while it can reach up to 6% in countries where the mechanism does not work well (ILO, 2019).

Turkey is one of the worst-performing countries in the world in terms of occupational safety. In comparison with European Union countries, it introduces the worst performance in terms of fatal accident incidence rate (İSGGM, 2020). Due to the unsafe and unhealthy working conditions people in Turkey also die. According to the Social Security Institution (SSI) work accident and occupational diseases statistics annuals, 422.463 work accidents occurred in Turkey in 2019, 1.147 employees died in these accidents, while 4.318 employees were permanently incapacitated or, in other words, became disabled for life (SSI, 2010-2019). Moreover, this data belongs only to known accidents that are recorded. According to the data of the OHS Council, the number of dead employees during work accidents in 2019 was at least 1.736. Official work accident data for 2020 has not yet been released by SSI. However, according to the OHS Council, 2.427 employees died in work accidents in 2020. This indicates that death cases because of work accidents tend to increase.

A scientific approach is needed to reduce deaths and permanent incapacity cases caused by work accidents. Scientists in Turkey have many studies on occupational health and safety. The most important studies among them will be interpreted here. In their studies Türen and Gökmen (2014) investigated the effects of the age factor on deaths as a result of work accidents and didn't find any meaningful and linear relationship between them. In their studies conducted in Izmir Province, Akboga and Baradan (2015) determined high-risk level factors by applying univariate frequency and cross tabulation analysis to fatal accidents occurring in 94 building sectors. Based on the work accidents that occurred between 2005 and 2016 in Turkey, Yağımlı and Ergin (2017) estimated the number of work accidents and the resulting deaths for 2017 with the exponential smoothing method. In another study, Yağımlı and Hacibektaşoğlu (2018) estimated the number of accidents for 2016 by the exponential smoothing method using 2007-2015 SSI work accident data. In 2012-2016, Bilim et al. (2018) analyzed work accidents and occupational diseases in the mining sector together with the main and sub-sectors by comparing them with other sectors. Şimşek et al. (2020) in their case studies found that the probability of work accidents was reduced by 75% with the use of sensors in the risk assessment performed after the accident by using the 5x5 L type matrix method. Yağımlı and İzci (2017) estimated the data for 2016 with time series and smallest square methods using the number of deaths as the result of work accidents between 2008 and 2015 of the "Manufacture of Fabricated Metal products, Except Machinery and Equipment" sector in Turkey. In their studies, Viran and Barlas (2018) analyzed the sample accident with the formal safety assessment method and revealed determinations to reduce the factors based on the accident data in the closed area studies of the shipbuilding sector. Kazaz et al. (2016) interpreted the measures that can be applied by investigating the causes of work accidents occurring in the construction sector in Turkey. Based on accident data in the metal sector, Ayanoglu and Kurt (2019) created accident prediction models with multivariate data analysis methods and interpreted possible accident risks. In another study, Erginel and Toptancı (2017) tried to demonstrate measures relative to factors such as age and city using work accident data in the construction sector. In their research, Yardım et al. (2007) examined the current situation by calculating the mortality rates due to work accidents and occupational diseases between 2000 and 2005 using SSI data. Bilim and Çelik (2018) tried to reveal the status of the construction industry by making a sectoral analysis of work accidents between 2012 and 2016. Besides this, they determined the rate of work accident likelihood and evaluated the effect of the scale of the workplace on the accident probability. Öztürk and Eren (2019) investigated the impact of accident results on the same number of casualties on a sectoral basis by using the 2016 work accident statistics. Akyüz et al. (2019) compared work accidents and the number of deaths as a result of work accidents that occurred in Turkey and EU countries between 2008-2017. In another study, Şen et al. (2018) compared statistically the work accidents in Turkey and EU countries and found that Turkey was not sufficient in preventing fatal work accidents. Çoban and Kartal (2016) compared policies aimed at ensuring occupational health and safety in Turkey, England,

Germany, China and the USA and the number of fatal work accidents in countries between 2002 and 2013. Karadeniz (2012) study, it was emphasized that social protection is insufficient by basing on the work accidents and diseases data in the world and in Turkey. Using the work accident statistics for 2015, Erdugan and Türkan (2017) investigated whether there is any dependency between the variables of sector, gender and duration of incapacity for work. Taking advantage of work accidents examined by labor inspectors between 2007 and 2011, Kaplan and Kaplan (2019) determined the relationship level of factors such as age, gender, and education level. On the other hand, Ceylan (2012) analyzed the work accidents that occurred in the construction, mining, and metal sectors in Turkey between 2004-2010. In their work, Doğan et al. (2021) investigated a pier accident that occurred at the construction site and determined the necessary precautionary procedures to prevent similar accidents.

Turkey is performing very poorly in terms of OHS. Despite all the efforts made since 2003, the lack of a significant improvement in Turkey's OHS indicators and even the deterioration in some indicators such as the fatal accident incidence rate reveals that there is a systematic error in the OHS system. In this study, unlike the studies carried out in the literature, for the first time, the most important problem in Turkey's OHS mechanism is presented with a holistic approach. It is wrong to divide businesses into roughly 3 categories in terms of risk, as "less dangerous", "dangerous" and "very dangerous". Rather than that, it would be more effective to rank 88 distinct sectors in the official OHS database in terms of occupational accident risk and to develop sectorial measures to combat occupational accidents.

To prevent work accidents, it is necessary to establish an effective occupational safety mechanism. Classifying the sectors according to their risk levels, reviewing the correct system starting from the riskiest sectors to the least risky sectors and determining the necessary preventive measures would be a logical way to combat work accidents. In addition, determining the risk levels of sectors in terms of work accidents will also enable decision-makers to take additional measures specific to those sectors for very risky sectors. For this reason, in this study, 88 sectors are listed according to their risk levels in terms of work accidents in the SSI work accident and occupational diseases statistical annuals.

2. Basic Concepts

2.1. Work Accident

There are many definitions of work accidents in the literature. However, in Turkish legislation, the legal definition is mentioned in two places. The first of these is in the Occupational Health and Safety Law No. 6331. According to this definition, "the events that occur in the workplace or due to the execution of the work, that cause death or make the body integrity mentally or physically disabled" are called work accidents (6331 Sayılı İSG Kanunu, 2012). The second and main definition is in the Social Insurance and General Health Insurance Law numbered 5510. In this law work accident is defined as "When the insured is in the workplace, doing the work given by the employer, while working outside the workplace, going to work with a vehicle provided by the employer, or while the woman is on a breastfeeding leave, it is an event that causes immediate or later physical or mental disability to the insured." (5510 Sayılı Sosyal Sigortalar Kanunu, 2006)

2.2. Permanent Incapacity

It is the situation where the employee loses his / her earning power in the profession by at least 10% due to work accident or occupational disease (5510 Sayılı Sosyal Sigortalar Kanunu, 2006).

2.3. General Accident Incidence Rate

General Accident Incidence Rate is a benchmark used to compare countries, sectors with each other or any sector or country within itself in terms of work accidents over the years. *It shows the numbers of every 1000 people working in a calendar year are exposed to work accidents.* The formula is as follows (Ceylan, 2011).

$$\text{GAIR} = \frac{\text{NWA}}{\text{NE}} * 1.000 \quad (I)$$

GAIR: General Accident Incidence Rate

NWA: Number of Work Accidents

NE: Number of Employees

2.4. Fatal Accident Incidence Rate

It is another benchmark used to compare countries and sectors in terms of work accidents. *It shows the number out of every 1.000.000 people working in a calendar year die because of a work accident.* The formula is as follows (Ceylan, 2011).

$$\text{FAIR} = \frac{\text{NFA}}{\text{NE}} * 1.000.000 \quad (II)$$

FAIR: Fatal Accident Incidence Rate

NFA: Number of Fatal Accidents

2.5. Permanent Incapacity Accident Incidence Rate

It is the third benchmark used to compare countries and sectors in terms of work accidents. *It shows the number of every 1.000.000 people who work in a calendar year become permanently disabled because of a work accident.* The formula is as follows (Ceylan, 2011).

$$\text{PIAIR} = \frac{\text{NPJA}}{\text{NE}} * 1.000.000 \quad (\text{III})$$

PIAIR: Permanent Incapacity Accident Incidence Rate

NPJA: Number of Permanent Incapacities Accidents

3. Risky Sectors in Terms of Work Accidents

3.1. Methodology for Identifying Risky Sectors

Here, 25 sectors with the highest risk level in terms of work accidents were determined out of 88 sectors (Appendix-1) existing in SSI work accident and occupational diseases statistical annuals. The official data recorded by the SSI in the last ten years (2010-2019) as used for this purpose. Since the SSI 2020 statistical yearbook has not been published yet, it was not used in this study. According to official data, 2.360.442 work accidents have occurred in Turkey in the last 10 years, while 13.852 employees lost their lives in these accidents, and 29.144 employees became permanently incapable. In this study, the following sectors were found by analyzing the work accident data recorded in the last 10 years based on sectors:

- ✓ Top 10 sectors with the highest number of work accidents,
- ✓ Top 10 sectors with the highest number of fatal accidents,
- ✓ Top 10 sectors with the highest number of permanent incapacity cases,
- ✓ Top 10 sectors with the highest general accident incidence rate,
- ✓ Top 10 sectors with the highest fatal accident incidence rate,
- ✓ Top 10 sectors with the highest permanent incapacity accident incidence rate,

Later, according to Table-1, a risk score was assigned to the sectors ranked in the top 10 according to the six criteria above. By summing up the risk scores for each sector, 25 risky sectors in Turkey in terms of work accidents were determined.

Table 1. Risk Scores per Sectors

Sector	Risk Score
1. Sector	10
2. Sector	9
3. Sector	8
4. Sector	7
5. Sector	6
6. Sector	5
7. Sector	4
8. Sector	3
9. Sector	2
10. Sector	1

3.2. Sectors where Work Accidents are Intensified

In Table-2, the top ten sectors with the highest number of work accidents between 2010 and 2019 and the number of accidents is given. Table-3 shows the average of work accidents in these sectors for the last 10 years. If evaluate Table-2 and Table-3 together, approximately half of the accidents in the 2010-2019 period occurred in these 10 sectors. The top three sectors with the highest number of accidents "41-Construction of Buildings", "25-Manufacture of Fabricated Metal Products, Except Machinery and Equipment" and "10-Manufacture of Food Products", respectively.

Table 2. Sectors Where Work Accident Cases Are Intensified over the Years

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
TURKEY TOTAL	62903	69227	74871	191389	221336	241547	286068	359653	430985	422463
41-Construction of buildings	3056	3836	4511	14286	13508	15065	20159	34952	41759	25551
25- Manufacture of fabricated metal products, except machinery and equipment	6918	7268	7045	15699	18529	19221	20616	23627	25716	24085
10-Manufacture of food products	2422	2590	2972	9111	10971	12003	14351	20270	22610	22734
13-Manufacture of textiles	3474	3239	5127	10996	12128	12041	13446	16520	19573	20274
24- Manufacture of basic metals	4621	5272	4938	12061	12357	12529	13081	15670	17403	16413
56- Food and beverage service activities	856	1016	1310	6434	8818	10458	12626	16824	22487	25969
42-Civil engineering	1583	1718	1948	5917	7675	7903	9516	20873	27639	15927
23- Manufacture of other non-metallic mineral products	3861	4240	3733	9213	10244	10242	11721	14183	15622	13432
05- Mining of coal and lignite	8150	9217	8828	11289	10026	7429	8274	8468	8399	8983
81- Services to buildings and landscape activities	492	634	637	3082	6388	8972	11631	15188	17642	19683

Table 3. Top 10 Sectors with the Highest Number of Work Accident Cases (Average of 2010-2019)

	Average of 2010-2019	Its Share in All Accidents	Rank
TURKEY TOTAL	236044	% 100	
41- Construction of buildings	17668	% 7,5	1
25- Manufacture of fabricated metal products, except machinery and equipment	16872	% 7,1	2
10- Manufacture of food products	12003	% 5,1	3
13- Manufacture of textiles	11682	% 4,9	4
24- Manufacture of basic metals	11435	% 4,8	5
56- Food and beverage service activities	10680	% 4,5	6
42- Civil engineering	10070	% 4,3	7
23- Manufacture of other non-metallic mineral products	9649	% 4,1	8
05- Mining of coal and lignite	8906	% 3,8	9
81- Services to buildings and landscape activities	8435	% 3,6	10
TOP 10 INDUSTRY TOTALS	117400	% 49,7	

In Table-4, the first 10 sectors with the highest general accident incidence rate are given. While calculating the general accident incidence rate, the number of accidents in the sectors and the number of employees were found by taking the arithmetic average of the last 10 years. After, general accident incidence value of 88 sectors was calculated by using Equation-1. Table-4 is formed by listing the top 10 sectors with the highest general accident incidence rate. As understood from this table, the miners working in "05-Mining of Coal and Lignite" sector are the employees, who are frequently exposed to accidents in Turkey. Considering the averages of the last 10 years, while approximately 18 out of every thousand workers in Turkey were exposed to accidents, this rate is approximately 207 for the miners. These rates show that work accidents in the "05-Mining of Coal and Lignite" sector are about 11 times more intensive than the average of Turkey. In terms of general accident incidence rate, this sector is followed by "24-Manufacture of Basic Metals", "23-Manufacture of Other Non-metallic Mineral Products" and "25- Manufacture of Fabricated Metal Products, Except Machinery and Equipment" sectors, respectively. What is striking in this table is that the "41-Construction of Buildings" sector, which has experienced the most accidents in the last 10 years, has not been included in the list in terms of general accident incidence rate. The reason for this is that this sector is one of the sectors having the most employees among 88 sectors. Approximately 8% of all workers work in this sector. Therefore, the accident rate per 1000 workers decreases.

Table 4. Top 10 Sectors with the Highest General Accident Incidence Rate (Average of 2010-2019)

	General Accident Incidence Rate	Rank
TURKEY TOTAL	18,22	
05- Mining of coal and lignite	206,83	1
24- Manufacture of basic metals	72,95	2
23- Manufacture of other non-metallic mineral products	46,38	3
25- Manufacture of fabricated metal products, except machinery and equipment	45,61	4
29- Manufacture of motor vehicles, trailers and semi-trailers	44,23	5
22- Manufacture of rubber and plastic products	39,78	6
52- Warehousing and support activities for transportation	34,23	7
55- Accommodation	30,50	8
42- Civil engineering	30,12	9
10- Manufacture of food products	28,37	10

3.3. Sectors where Work Accident Death Cases are intensified

In Table-5, the top ten sectors with the highest number of fatal work accidents between 2010 and 2019 and the number of fatalities are given. Table-6 shows the average of death cases in these sectors for the last 10 years. If to interpret Table-5 and Table-6 together, approximately 65% of death cases in the 2010-2019 period occurred in these 10 sectors. The top three sectors with the highest number of deaths are "41-Construction of Buildings", "49-Land Transport and Transport via Pipelines" and "42-Civil Engineering", respectively.

Table 5. Sectors where Work Accident Death Cases are intensified over the years

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
TURKEY TOTAL	1444	1700	744	1360	1626	1252	1405	1633	1541	1147
41- Construction of buildings	264	304	127	296	260	239	239	340	360	207
49- Land transport and transport via pipelines	133	194	73	183	172	162	179	211	175	184
42- Civil engineering	107	118	66	121	143	124	130	158	162	105
43- Specialized construction activities	104	148	63	104	98	110	127	89	69	56
05- Mining of coal and lignite	86	55	20	36	335	26	11	31	11	13
23- Manufacture of other non-metallic mineral products	37	39	22	48	49	46	48	58	44	24
25- Manufacture of basic metals	43	72	25	35	31	37	27	36	48	31
46- Manufacture of basic metals	39	31	23	35	31	24	44	54	60	34
08- Other mining and quarrying	24	43	17	28	38	40	64	38	33	28
47- Retail trade, excluding motor vehicles and motorcycles	33	42	11	35	38	33	40	30	37	28

Table 6. Top 10 Sectors with the Highest Number of Work Accident Death Cases (2010-2019 Average)

	Average of 2010-2019	Share in All Cases	Rank
TURKEY TOTAL	1385	% 100	
41- Construction of buildings	264	% 19,1	1
49- Land transport and transport via pipelines	167	% 12,1	2
42- Civil engineering	123	% 8,9	3
43- Specialized construction activities	97	% 7,0	4
05- Mining of coal and lignite	62	% 4,5	5
23- Manufacture of other non-metallic mineral products	42	% 3,0	6
25- Manufacture of fabricated metal products, except machinery and equipment	39	% 2,8	7
46- Wholesale trade, except of motor vehicles and motorcycles	38	% 2,7	8
08- Other mining and quarrying	35	% 2,5	9
47- Retail trade, excluding motor vehicles and motorcycles	33	% 2,4	10
TOP 10 INDUSTRY TOTALS	900	% 65	

In Table-7, the first 10 sectors with the highest fatal accident incidence rate are given. Here, while calculating the fatal accident incidence rate, the number of death cases in the sectors and the number of employees were found by taking the arithmetic average of the last 10 years. Afterward, the fatal accident incidence rate of 88 sectors was calculated by using Equation-2. Table-7 is formed by listing the top 10 sectors with the highest fatal accident incidence rate. As understood from this table, the sector with the most frequent fatal accident rate in Turkey is the "05-Mining of Coal and Lignite" sector. Considering the averages of the last 10 years, while approximately 107 out of every million workers in Turkey die in work accidents, this rate is approximately 1440 for the miners. These values show that fatal accident cases in the "05-Mining of Coal and Lignite" sector are about 13 times more intensive than the average of Turkey. In terms of fatal accident incidence rate, this sector is followed by the "08-Other Mining and Quarrying", "42-Civil Engineering" and "49-Land Transport and Transport via Pipelines" sectors, respectively.

Table 7. Top 10 Sectors with the Highest Fatal Accidents Incidence Rate (Average of 2010-2019)

	Fatal Accident Incidence Rate	Rank
TURKEY TOTAL	106,93	
05- Mining of coal and lignite	1439,88	1
08- Other mining and quarrying	592,34	2
42- Civil engineering	367,90	3
49- Land transport and transport via pipelines	296,03	4
43- Specialized construction activities	294,61	5
41- Construction of buildings	251,03	6
23- Manufacture of other non-metallic mineral products	201,90	7
35- Electricity, gas, steam, and air conditioning supply	165,90	8
01- Vegetable and animal production, hunting and related service activities	162,96	9
24- Manufacture of basic metals	153,11	10

3.4. Sectors where Permanent Incapacity Cases Are Intensified due to Work Accidents

In Table-8, the top ten sectors with the highest number of permanent incapacity due to work accidents between 2010 and 2019 are given. Table-9 shows the average of the permanent incapacity cases experienced in these sectors for the last 10 years. If to interpret Table-8 and Table-9 together, we can see that approximately 58 % of the permanent incapacity cases experienced in the 2010-2019 period occurred in these 10 sectors. The top three sectors with the highest number of permanent incidents of incapacity are "41-Construction of Buildings", "25-Manufacture of Fabricated Metal Products, Except Machinery and Equipment" and "42-Civil Engineering", respectively.

Table 8. Sectors where permanent incapacity cases are intensified due to work accidents over the years

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
TURKEY TOTAL	1976	2093	2036	1660	1421	3433	4447	3987	3773	4318
41- Construction of buildings	198	243	281	259	231	569	909	964	861	1029
25- Manufacture of fabricated metal products, except machinery	145	146	131	145	137	260	287	285	224	233
42- Civil engineering	62	73	101	70	58	213	300	314	290	357
43- Specialized construction activities	57	89	181	134	115	197	241	227	177	200
49- Land transport and transport via pipelines	58	64	82	75	67	162	182	168	184	268
23- Manufacture of other non-metallic mineral products	79	89	55	63	60	139	164	159	124	154
24- Manufacture of basic metals	40	56	71	63	47	135	178	152	128	129
13- Manufacture of textiles	62	69	70	67	55	100	145	117	96	145
10- Manufacture of food products	56	48	56	49	45	114	150	125	139	134
05- Mining of coal and lignite	50	81	67	54	60	101	145	81	54	71

Table 9. Top 10 Sectors with the Highest Number of Permanent Incapacity Cases due to Work Accidents (Average of 2010-2019)

	Average of 2010-2019	Share in All Cases	Rank
TURKEY TOTAL	2914	% 100	
41- Construction of buildings	554	% 19,0	1
25- Manufacture of fabricated metal products, except machinery and eq.	199	% 6,8	2
42- Civil engineering	184	% 6,3	3
43- Specialized construction activities	162	% 5,6	4
49- Land transport and transport via pipelines	131	% 4,5	5
23- Manufacture of other non-metallic mineral products	109	% 3,7	6
24- Manufacture of basic metals	100	% 3,4	7
13- Manufacture of textiles	93	% 3,2	8
10- Manufacture of food products	92	% 3,2	9
05- Mining of coal and lignite	76	% 2,6	10
TOP 10 INDUSTRY TOTALS	1700	% 58,3	

In Table-10, the top 10 sectors with the highest permanent incapacity accident incidence rate are given. Here, while calculating the fatal accident incidence rate, the number of permanent incapacity cases in the sectors and the number of employees were found by taking the arithmetic average of the last 10 years. Then, using Equation-3, the permanent incapacity accident incidence rate of 88 sectors was calculated. Table-10 is formed by listing the top 10 sectors with the highest permanent incapacity accident incidence rate. As understood from this table, the sector in which the most frequent incidents of incapacity due to work accidents are experienced in Turkey is the "05-Mining of Coal and Lignite" sector. Considering the averages of the last 10 years, approximately 225 out of every million employees in Turkey become incapable in work accidents, while this rate is approximately 1765 for the miners working in this sector. These rates show that permanent incapacity cases due to work accidents in the "05-Mining of Coal and Lignite" sector are approximately 8 times more intensive than the average in Turkey. In terms of the permanent incapacity accident incidence rate, this sector is followed by "16-Manufacture of Wood and of Products of Wood and Cork, Except Furniture; Manufacture of Articles of Straw and Plaiting Materials", "24-Manufacture of Basic Metals" and "42-Civil Engineering" respectively.

Table 10. Top 10 Sectors with The Highest Permanent Incapacity Accident Incidence Rate (Average of 2010-2019)

	Permanent Incapacity Accident Incidence Rate	Rank
TURKEY TOTAL	224,98	
05- Mining of coal and lignite	1765,02	1
16- Manufacture of wood and of products of wood and cork, except furniture; manufacture of articles of straw and plaiting materials	660,09	2
24- Manufacture of basic metals	637,96	3
42- Civil engineering	550,36	4
25- Manufacture of fabricated metal products, except machinery and equipment	538,01	5
41- Construction of buildings	526,78	6
23- Manufacture of other non-metallic mineral products	523,99	7
43- Specialized construction activities	492,03	8
31- Manufacture of furniture	431,78	9
22- Manufacture of rubber and plastic products	396,42	10

3.5. The Riskiest Sectors in Terms of Work Accidents in Turkey

The 10 riskiest sectors in terms of work accidents in Turkey are given in Table-11. Here, the methodology given in 3.1 was used while calculating the risk scores of the sectors. In other words, 10 risk points for the first place in the ranking, 9 risk points for the second place, and 1 risk point for the 10th place by decreasing it. As a result, the total risk score of that sector was found by summing the risk scores given for the 6 parameters seen in Table-11. Then, by listing the top 10 sectors with the highest risk score, Table-11 was created.

The riskiest sector in terms of work accidents in Turkey is the "41-Construction of Buildings" sector. The sector with the highest number of work accidents, accidents with fatal and permanent incapacity cases in Turkey is the "41-Construction of Buildings" sector. In addition, the sector that constitutes the construction sector "42-Civil Engineering" ranked 3rd place and the "43-Specialized Construction Activities" sector ranked as risky sectors from 7th place.

The second riskiest sector in terms of work accidents in Turkey is the "05-Mining of Coal and Lignite" sector. The sector with the highest incidence rate of general, fatal, and permanent incapacity accident in Turkey is the "05-Mining of Coal and Lignite" sector. In addition, another mining sector, "08-Other Mining and Quarrying", was ranked 9th.

One of the sectors listed in Table-11 is the "49-Land Transport and Transport via Pipelines" sector. This is the 2nd sector with the most fatal work accidents. In addition, it ranks 4th in the fatal accident incidence rate and 5th in the number of permanent incapacity cases. All this data reveals how risky this sector is in terms of work accidents.

Table 11. Top 10 Most Risky Sectors in Terms of Work Accidents in Turkey and Risk Scores per Sectors

	Accident Risk Score	GAIR Risk Score	Death Risk Score	FAIR Risk Score	Permanent Incapacity Risk Score	PIAIR Risk Score	TOTAL RISK SCORE
41- Construction of buildings	10		10	5	10	5	40
05- Mining of coal and lignite	2	10	6	10	1	10	39
42- Civil engineering	4	2	8	8	8	7	37
25- Manufacture of fabricated metal products, except machinery and equipment	9	7	4		9	6	35
23- Manufacture of other non-metallic mineral products	3	8	5	4	5	4	29
24- Manufacture of basic metals	6	9		1	4	8	28
43- Specialized construction activities			7	6	7	3	23
49- Specialized construction activities			9	7	6		22
08- Other mining and quarrying			2	9			11
10- Manufacture of food products	8				2		10

4. Conclusion, Discussion and Recommendations

In 2012, Occupational Health and Safety (OHS) law numbered 6331 was enacted in Turkey. Later, regulations on occupational health and safety were updated to combat work accidents more effectively. While what is expected from all these legal regulations was reducing work accidents with fatal and permanent incapacity cases, on the contrary, deterioration in all OHS indicators have been recorded after this date. For example, while 74.871 work accidents were recorded in 2012, 744 employees lost their lives in these accidents, and 2.036 employees became permanently disabled. According to the latest data of 2019, 422.463 work accidents occurred in 2019 and 1.147 employees died in the accidents, while 4.318 employees became permanently disabled (SGK, 2010-2019). All these data show that there is a serious deterioration in the OHS indicators of Turkey after the OHS law. This situation reveals that there is something failing in Turkey's OHS mechanism.

In Turkey, enterprises are divided into 3 categories: "Less Dangerous", "Dangerous" and "Very Dangerous" (İşyeri tehlike sınıfları tebliği, 2012). However, dividing all enterprises in Turkey into roughly 3 groups is not enough in terms of combating work accidents. All sectors should be examined in a detailed way, ranked according to risk levels as done here, and sectoral measures should be determined for high-risk sectors.

Hazard classes are used as the only separation standard for OHS services that organizations will provide to their employees in Turkey. All considerations and the validity periods, such as OHS services which a business will provide to its employees, will vary only depending on the hazard class to which that business is subject. However, the working conditions of two different enterprises that are in the same hazard class but operate in different sectors may considerably differ from each other. For this purpose, OHS mechanisms should be determined on a sectoral groundwork. In particular, the legislation should be reviewed for the "41-Construction of Buildings", "49-Land Transport and Transport via Pipelines", "42-Civil Engineering", "43-Specialized Construction Activities" and "05-Mining of Coal and Lignite" sectors that are prominent in fatal accidents. In addition, a special fighting tactic is needed for the risky sectors identified in this study in terms of the number of accidents and permanent incapacity cases.

Hundreds of thousands of work accidents are recorded every year in Turkey, not only because the legal legislation orders it, but also to see the failing aspects of the system and to fix it. Therefore, SSI work accident data should be examined and analyzed

regularly. For this purpose, all kinds of conveniences should be provided to all academicians and experts who want to work on this data.

The most important factor that causes the disruption of the OHS mechanism on a legal basis in Turkey is the way that the safety professionals are employed. Safety professionals who are in the position of an employer's member of staff are expected to audit that employer and report to the ministry if necessary. The anxiety of losing a job eliminates the professional independence of safety professionals. For this, the system of safety professionals must be completely evaluated.

Another problem with the OHS mechanism in Turkey is that people who are not experts in the main field of activity of the enterprise can become safety professionals in those very organizations. For instance, a biologist or chemist at a construction company could become a safety professional. To find the risks of a job, one needs to have the knowledge. Therefore, this system should be changed immediately; safety professionals should be assigned only to enterprises operating in their own areas of expertise.

Germany is one of the most successful countries in the world in terms of OHS performance. Its population is approximately the same as Turkey. Around one and a half million occupational accidents are recorded in Germany every year. As the number of registered work accidents in Turkey is around four hundred thousand, this means that a large part of the work accidents was not recorded.

Reporting occupational accidents to SSI within 3 working days is a legal obligation in Turkey. (6331 Sayılı İSG Kanunu, 2012). Declarations are made by the employer. SSI transfers the reported occupational accidents to a database and publishes them in the form of statistical annuals. From the statistical studies on this database, the failing aspects of Turkey's OHS mechanism are determined and useful information is produced for decision makers. Underreporting of occupational accidents casts a shadow on both the inability to measure Turkey's OHS performance correctly and the reliability of the information produced from the studies conducted on the Occupational Accident database.

Undoubtedly, an effective control mechanism is needed to prevent occupational accidents. Inspections on occupational health and safety in Turkey are carried out by labor inspectors affiliated to the Ministry of Labor and Social Security. Around 1000 labor inspectors work in Turkey since 2019. These labor inspectors carried out a total of 3088 inspections in 2019 (Table-12) (Çalışma Hayatı İstatistikleri, 2019). As of 2019, there are 1.891.512 workplaces and 14.314.313 workers in Turkey. Moreover, more than 600 thousand of these workplaces are in the "dangerous" and "very dangerous" categories. This shows that there is only one inspector for approximately 15.000 workers, and only 3088 of the nearly 2 million workplaces can be audited in terms of OHS. These data reveal that both the number of labor inspectors and the number of inspections are very, very insufficient. Increasing the number of labor inspectors firstly is a great importance in order to establish an effective inspection mechanism. In addition, the number of inspections should be made according to the risk situation of the sectors. The sectors with the highest number of fatal occupational accidents in Turkey were the construction, transportation and mining sectors in 2019. In Table 12 we can see that only 77 inspections were made in the Transport sector, which is one of the sectors with the highest number of deaths. This shows that labor inspectors, whose numbers are already insufficient, were not utilized effectively.

Table 12. Occupational health and safety inspections by Sector, 2019

Sector	Total number of inspections
Metal	798
Construction	513
Commerce, office, education and fine arts	341
Textile, ready-made clothing and leather	223
Petroleum, chemicals, rubber, plastics and medicine	192
Mining and stone quarries	152
Transport	77
Others	792
General Total	3088

References

- Akboğa, Ö., & Baradan, S. (2015). İnşaat Sektöründeki Ölümlü İş Kazalarının Karakteristiklerinin İncelenmesi: İzmir Alan Çalışması. 5. İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu, 215–224. Retrieved from http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/17611_42_57.pdf
- Akyüz, K. C., Yıldırım, İ., Akyüz, İ., & Ersen, N. (2019). Orman Ürünleri Sanayi Sektöründe İş Kazası ve Ölümlü İş Kazalarının Türkiye ve Avrupa Birliği Ülkeleri Düzeyinde İncelenmesi. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 20(2), 193–207. <https://doi.org/10.17474/artvinofd.509138>
- Ayanoğlu, C. Can, & Kurt, M. (2019). Metal sektöründe veri madenciliği yöntemleri ile bir iş kazası tahmin modeli önerisi. *Ergonomi*, 2(2), 78–87. <https://doi.org/10.33439/ergonomi.481861>

- Bilim, A., & Çelik, O. N. (2018). Türkiye'deki İnşaat Sektöründe Meydana Gelen İş Kazalarının Genel Değerlendirmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 725–731. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.444760>
- Bilim, N., DüNDAR, S., & Bilim, A. (2018). Ülkemizdeki Maden Sektöründe Meydana Gelen İş Kazası Ve Meslek Hastalıklarının Analizi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 423–432. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.435729>
- Çalışma Genel Müdürlüğü, (2020). Çalışma Hayatı İstatistikleri-2019. [https://www.csgb.gov.tr/istatistikler/calisma-hayati-istatistikleri-kitabi/](https://www.csgb.gov.tr/istatistikler/calisma-hayati-istatistikleri/resmi-istatistik-programi/calisma-hayati-istatistikleri-kitabi/)
- Ceylan, H. (2011). Türkiye'deki İş Kazalarının Genel Görünümü Ve Gelişmiş Ülkelerle Kıyaslanması. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 3(2).
- Ceylan, H. (2012). Analysis of occupational accidents according to the sectors in Turkey. *Gazi University Journal of Science*, 25(4), 909–918.
- Çoban, O., & Kartal, M. (2016). İktisadi Gelişmişlik-İş Sağlığı/ Güvenliği Ve Ölümlü İş Kazaları Arasındaki İlişkinin Tespit Edilmesi: Seçilmiş Ülke Örnekleri. *ÇKÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 7(2), 201–227.
- Dogan, E., Yurdusev, M. A., Yildizel, S. A., & Calis, G. (2021). Investigation of scaffolding accident in a construction site: A case study analysis. *Engineering Failure Analysis*, 120, 105108. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105108>
- Erdugan, F. (2017). Üç Yönlü Kontenjans Tablolarında Log-Lineer Model ile İş Kazası Verilerinin İncelenmesi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(2), 462–468.
- Erginel, N., & Toptancı, Ş. (2017). İş Kazası Verilerinin Olasılık Dağılımları İle Modellenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(Özel Sayı), 201–212. <https://doi.org/10.21923/jesd.10116>
- Ergül, B. (2018). Türkiye'deki İş Kazalarının Zaman Serisi Analiz Teknikleri ve Yapay Sinir Ağları Tekniği İle İncelenmesi Investigation of Work Accidents in Turkey with Time Series Analysis and Neural Network Technique. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, 2(2), 63–74.
- Ilıman, E. Z. (2015). Türkiye'de Meslek Hastalıkları. *Uluslararası Sağlık Yönetimi ve Stratejileri Araştırma Dergisi*, 1(1), 21–36. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/usaysad/issue/16703/173672>
- International Labour Organization. (2019). Safety and health at the heart of the future of work. In *Safety and Health at the heart of the Future of Work*.
- İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü. (2020). *İstatistiklerle Türkiye'nin İşg Görünümü*.
- İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu (2012, 30 Haziran). Resmi Gazete (Sayı: 28339) Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.6331.pdf>
- İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği (2012, 26 Aralık). Resmi Gazete (Sayı: 28509) Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=16909&MevzuatTur=9&MevzuatTertip=5>
- Kaplan, M., & Çallı Kaplan, M. (2019). Türkiye'de Çalışanların Demografik Özelliklerinin İş Kazalarına Etkilerinin Analizi. *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 17(2), 74–89. Retrieved from www.journal.uta45jakarta.ac.id
- Karadeniz, O. (2012). Dünya'da ve Türkiye'de İş Kazaları ve Meslek Hastalıkları ve Sosyal Koruma Yetersizliği. *Çalışma ve Toplum Dergisi*, 3, 15–75. Retrieved from <http://www.social-protection.org/gimi/gess/ShowWiki.do?wid=76>,
- Kazaz, A., Ulubeyli, S., & Acıkara, T. (2016). Türk İnşaat Sektöründe İş Kazaları ve Nedenleri Üzerine Bir Araştırma. *4. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi*, (November).
- Öztürk, T., & Eren, Ö. (2019). Yaralanmalı iş kazalarının en fazla meydana geldiği ilk otuz sektörün entropi tabanlı sıralama tekniği ile ayrıntılı incelenmesi. *Business & Management Studies: An International Journal*, 7(1), 153–171. <https://doi.org/10.15295/bmij.v7i1.1053>
- Sosyal Sigortalar ve Genel Sağlık Sigortası Kanunu (2006, 16 Haziran). Resmi Gazete (Sayı: 26200) Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.5510.pdf>
- Şimşek, S., Ağseren, S., & Şimşek, H. (2020). İş sağlığı ve İş Güvenliği Uygulamalarında Sensör Kullanımının İncelenmesi. *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi*, 12(1), 41–53. <https://doi.org/10.17932/IAU.IAUD.m.13091352.2020.1/45.41-53>
- Türen, U., & Gökmen, Y. (2014). Türkiye'de Meydana Gelen İş Kazaları Sonucu Ölümler ile Çalışanların Yaş Faktörü Arasındaki İlişki. *Sosyal Güvenlik Dergisi*, 4(1), 101–119.

Viran, A., & Barlas, B. (2018). Gemilerde Kapalı Alanlarda Yapılan Çalışmalar ve İş Kazalarının Analizi. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, 214, 19–36.

Yağimli, M., & Ergin, H. (2017). Türkiye’de İş Kazalarının Üssel Düzeltme Metodu ile Tahmin Edilmesi. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 4, 118–123. <https://doi.org/10.7240/marufbd.305236>

Yağimli, M., & İzci, F. B. (2017). Türkiye’de Makine ve Teçhizatı Hariç Fabrikasyon Metal Ürünleri İmalatı Sektöründe Yaşanan İş Kazaları ve Ölümlü İş Kazası Sayılarının Tahmini. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, 1(1), 9–15.

Yağimli, M., & Hacıbektaşoğlu, S. E. (2018). Türkiye’de İnşaat Sektöründe Yaşanan İş Kazaları Ve Ölümlü İş Kazası Sayılarının Tahmini. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, 9(22), 142–156.

Yardım, N., Çipil, Z., Vardar, C., & Mollahaliloğlu, S. (2007). Türkiye İş Kazaları Ve Meslek Hastalıkları: 2000-2005 Yılları Ölüm Hızları. *Dicle Tıp Dergisi*, 34(4), 264–271.

Appendix-1: Classification of Sectors According to Economic Activities (NACE-2)

	NACE Code	Sector Name
1	01	Crop and animal production, hunting and related service activities
2	02	Forestry and logging
3	03	Fishing and aquaculture
4	05	Mining of coal and lignite
5	06	Extraction of crude petroleum and natural gas
6	07	Mining of metal ores
7	08	Other mining and quarrying
8	09	Mining support service activities
9	10	Manufacture of food products
10	11	Manufacture of beverages
11	12	Manufacture of tobacco products
12	13	Manufacture of textiles
13	14	Manufacture of wearing apparel
14	15	Manufacture of leather and related products
15	16	Manufacture of wood and of products of wood and cork, except furniture; manufacture of articles of straw and plaiting materi
16	17	Manufacture of paper and paper products
17	18	Printing and reproduction of recorded media
18	19	Manufacture of coke and refined petroleum products
19	20	Manufacture of chemicals and chemical products
20	21	Manufacture of basic pharmaceutical products and pharmaceutical preparations
21	22	Manufacture of rubber and plastic products
22	23	Manufacture of other non-metallic mineral products
23	24	Manufacture of basic metals
24	25	Manufacture of fabricated metal products, except machinery and equipment
25	26	Manufacture of computer, electronic and optical products
26	27	Manufacture of electrical equipment
27	28	Manufacture of machinery and equipment n.e.c.
28	29	Manufacture of motor vehicles, trailers and semi-trailers
29	30	Manufacture of other transport equipment
30	31	Manufacture of furniture
31	32	Other manufacturing
32	33	Repair and installation of machinery and equipment
33	35	Electricity, gas, steam and air conditioning supply
34	36	Water collection, treatment and supply
35	37	Sewerage
36	38	Waste collection, treatment and disposal activities; materials recovery
37	39	Remediation activities and other waste management services
38	41	Construction of buildings
39	42	Civil engineering
40	43	Specialized construction activities
41	45	Wholesale and retail trade and repair of motor vehicles and motorcycles
42	46	Wholesale trade, except of motor vehicles and motorcycles

43	47	Retail trade, except of motor vehicles and motorcycles
44	49	Land transport and transport via pipelines
45	50	Water transport
46	51	Air transport
47	52	Warehousing and support activities for transportation
48	53	Postal and courier activities
49	55	Accommodation
50	56	Food and beverage service activities
51	58	Publishing activities
52	59	Motion picture, video and television program production, sound recording and music publishing activities
53	60	Programming and broadcasting activities
54	61	Telecommunications
55	62	Computer programming, consultancy and related activities
56	63	Information service activities
57	64	Financial service activities, except insurance and pension funding
58	65	Insurance, reinsurance and pension funding, except compulsory social security
59	66	Activities auxiliary to financial services and insurance activities
60	68	Real estate activities
61	69	Legal and accounting activities
62	70	Activities of head offices; management consultancy activities
63	71	Architectural and engineering activities; technical testing and analysis
64	72	Scientific research and development
65	73	Advertising and market research
66	74	Other professional, scientific and technical activities
67	75	Veterinary activities
68	77	Rental and leasing activities
69	78	Employment activities
70	79	Travel agency, tour operator and other reservation service and related activities
71	80	Security and investigation activities
72	81	Services to buildings and landscape activities
73	82	Office administrative, office support and other business support activities
74	84	Public administration and defense; compulsory social security
75	85	Education
76	86	Human health activities
77	87	Residential care activities
78	88	Social work activities without accommodation
79	90	Creative, arts and entertainment activities
80	91	Libraries, archives, museums and other cultural activities
81	92	Gambling and betting activities
82	93	Sports activities and amusement and recreation activities
83	94	Activities of membership organizations
84	95	Repair of computers and personal and household goods
85	96	Other personal service activities
86	97	Activities of households as employers of domestic personnel
87	98	Undifferentiated goods- and services-producing activities of private households for own use
88	99	Activities of extraterritorial organizations and bodies



Türkiye’de Kullanılan Deprem Yönetmeliklerinin Özellikleri ve Eşdeğer Yatay Deprem Yüğü Hesabının Değişimi

Characteristics of Earthquake Codes Used in Turkey and Change of Equivalent Horizontal Force Calculation

Sinan Cansız¹

¹*İstanbul Aydın Üniversitesi ABMYO-İnşaat Teknolojisi, 34295-İstanbul, TÜRKİYE*

Başvuru/Received: 04/06/2021

Kabul / Accepted: 09/10/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Depreme dayanıklı yapı tasarımı kavramı son yıllarda meydana gelen depremler sonrasında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Türkiye'nin sıklıkla deprem oluşturan fay hatları üzerinde olması sebebiyle her büyük deprem sonrası ağır can kayıpları yaşanmıştır. Tarihsel olarak incelendiğinde 1940 yılında yayınlanan ilk deprem yönetmeliğinden, 2018 yılında yayınlanan son deprem yönetmeliğine kadar birçok yönetmelik kullanılmıştır. Bu yönetmelikler kendi çağının teknolojik gelişmişlik seviyesine göre hazırlanmıştır. Türkiye'deki nüfusun yoğun olarak deprem tehlikesi altında yaşaması mevcut yapıların değerlendirilmesini gerektirmektedir. Türkiye'de kullanılan yapıların Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) altında incelenmesi çok emek ve süre gerektirmektedir. Ayrıca mevcut yapıların değerlendirilmesinde veya güçlendirilmesinde yapıldığı dönemin deprem yönetmeliğinin özelliklerinin bilinmesi gerekir. Bu çalışma kapsamında 80 yıllık süreçte hazırlanan deprem yönetmeliklerindeki deprem hesabının değişimi ve yönetmeliklerin özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca örnek yapı üzerinde tüm yönetmeliklere göre hesaplanan eşdeğer yatay deprem yükü değerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Son bölümde ise ASCE Amerikan yönetmeliği ile TBDY-2018 esaslarına göre örnek yapı üzerinde itme analizi sonuçları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Deprem yönetmeliği, deprem hesabı, deprem bölgesi”

Abstract

The concept of earthquake resistant building design has been widely used after earthquakes in recent years. Since Turkey is on fault lines that frequently cause earthquakes, heavy casualties have been experienced after each major earthquake. When examined historically, many seismic codes have been used, from the first earthquake code published in 1940 to the last earthquake code published in 2018. These codes have been prepared according to the technological development level of their age. The fact that the population in Turkey lives under the intense risk of earthquakes requires the evaluation of existing structures. Examining the structures used in Turkey under the Turkey Building Earthquake Code (TBDY-2018) requires a lot of effort and time. In addition, when evaluating or strengthening existing structures, the characteristics of the earthquake code of the period should be known. Within the scope of this study, the changes in the earthquake calculation in the earthquake codes prepared in the 80-year period and the characteristics of the codes were investigated. In addition, the results of the equivalent horizontal earthquake load value calculated according to all seismic codes on the sample structure were compared. In the last part, the results of the push-over analysis on the sample structure were compared according to the ASCE American seismic code and TBDY-2018 principles.

Key Words

“Earthquake code, earthquake account, earthquake zone”

1. Giriş

Dünya üzerinde yaşayan nüfusun büyük bir kısmı yaşamları boyunca küçük şiddetli de olsa depreme maruz kalmaktadır. Türkiye’de ise deprem tarihçesine baktığımızda tarihi kayıtlar İstanbul üzerinde yoğunlaşmıştır. Nüfusun yoğun olarak bulunduğu bölgede kayıtların daha fazla olması sebebiyle İstanbul ve çevresinin depremselliği tarihi kayıtlarda kısıtlı olsa erişilebilmektedir. AFAD istatistikleri incelendiğinde İstanbul ve çevresinde 50 yıllık aralıklarla şiddetli, 250 yıllık aralıklarla da çok şiddetli depremlerin meydana geldiği görülmüştür. Deprem sürekli olarak meydana geldiği ülkemizde deprem hakkında yapıların tasarımı için kullanılan çeşitli yönetmelikler hazırlanmıştır. Bunlar kronolojik olarak maddeler halinde aşağıda sıralanmıştır.

- Zelzele Mıntıklarında Yapılacak İnşaata Ait İtalyan Yapı Talimatnamesi (1940)
- Zelzele Mıntıkları Muvakkat Yapı Talimatnamesi (1944)
- Türkiye Yersarsıntısı Bölgeleri Yapı Yönetmeliği (1949)
- Yersarsıntısı Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (1953)
- Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY-1962)
- Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY-1968)
- Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY-1975)
- Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY-1998)
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007)
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018)

Türkiye’de yaşayan nüfusun büyük çoğunluğu deprem riskinde olan bölgelerde yaşamaktadır. Bu bölgede yaşayan insanların kullandığı yapılar zamanla oluşan depremler sonrasında çeşitli hasarlara maruz kalmaktadır. Bu oluşan hasar sonrasında yapıların önemine göre güçlendirme veya yeniden yapım gibi seçeneklere göre karar verilmektedir. Yapıların yıkılıp yeniden yapılması ülke ekonomisine olumsuz etkiye neden olmaktadır. Yapıların imal edildiği dönemlerde kullanılan yapı tasarım veya deprem yönetmelikleri yapıların değerlendirilmesinde önem arz etmektedir.

Geçmişten günümüze deprem yönetmelikleri incelendiğinde, ilk yayınlanan yönetmeliklerin deprem karakteristiklerinin yapıya yansıtılmasında yeterli başarılı olmadığı bilinmektedir. İlk yayınlanan yönetmeliklerde yapıya etki eden toplam yatay deprem yükü basit formulasyon ile tanımlanmışken, TBDY-2018’de ise çeşitli yöntemler ve birçok parametreye bağlı olarak açıklanmıştır. İlk yönetmeliklerde yapının taşıyıcı sistem türü, deprem yönü gibi parametreler dikkate alınmadan hesap yapılmaktaydı. . 2018 yılında yayınlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY 2018) binaların deprem performanslarının belirlenmesi amacıyla doğrusal ve doğrusal olmayan hesap yöntemleri ortaya konmuştur. Doğrusal hesap yöntemleri Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ve Modal hesap yöntemleridir. Doğrusal olmayan hesap yöntemleri ise İtme Yöntemleri ve Zaman Tanım Alanında hesap yöntemleridir.

Yönetmeliklerin arasındaki farklılıklar birçok araştırmacı tarafından birçok çalışmada incelenmiştir. Koçer vd. TDY 2007 ve TBDY 2018 de tanımlanan spektral ivme değerleri ile zemin hâkim periyotlarını, farklı risk gruplarına sahip dört il ve farklı yerel zemin sınıfları için elde etmişlerdir.

Tunç vd. DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 yönetmelikleri benzer yönleri ve farklılıkları açısından karşılaştırmışlardır. Çalışma kapsamında 10 katlı bir ofis binasının deprem analizi her iki yönetmeliğe göre ETABS programı kullanılarak yapılmıştır. Çalışma sonucunda tasarım iç kuvvetlerindeki artış irdelenmiş ve TBDY-2018’de tasarım iç kuvvetlerinde % 20-% 25 arasında artış olduğu görülmüştür.

Demir vd. yaptıkları çalışmada yapıların maksimum ötelenme taleplerini dikkate alarak, DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 yönetmeliklerini zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz açısından karşılaştırmışlardır. Aksoylu ve Arslan (2021) benzer şekilde DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 yönetmeliklerinde tanımlanan farklı deprem kuvveti hesaplama yöntemlerinin karşılaştırılmalı olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda TBDY-2018’de yapının doğal periyodunun DBYBHY-2007’e göre %45 daha fazla hesaplanmaktadır. Ayrıca Modal analiz sonucunda hesaplanan taban kesme kuvvetinin Eşdeğer yatay deprem yükü yönteminden hesaplanan taban kesme kuvvetinden %20 daha az olduğu her iki yönetmelikte de görülmüştür. Daha ekonomik çözümler istendiğinde modal analiz yönteminin eşdeğer yatay deprem yükü yöntemine göre daha avantajlı olduğu görülmüştür. Keskin ve Bozdoğan (2019) DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 esaslarına göre Kırklareli depremselliğini araştırmıştır. Özmen ve Sayın (2021) farklı zemin değerlerine sahip yapıların DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 esaslarına göre eşdeğer yatay deprem yükü yöntemini kullanarak karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda TBDY-2018 esaslarına göre hesaplanan yapının periyodu DBYBHY-2007’e göre daha yüksek çıkmıştır. Bu farkın ortaya çıkmasında 2018 deprem yönetmeliğine göre etkin kesit rijitliklerinin dikkate alınması ve hesaplarda kullanılacak periyot hesabında yapının etkili doğal titreşim periyodunun hesaplanması olarak gösterilebilir. Karaca vd. (2020) yapısal tasarım bağlamında Niğde örneğinde DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 esaslarına göre deprem yönetmelikleri karşılaştırılmıştır.

Önceki çalışmalar incelendiğinde çoğunlukla DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 esaslarına göre deprem yönetmelikleri karşılaştırılmıştır (Nemutlu vd. (2020), Döndüren vd. (2021), Ulutaş (2019), Çetin vd. (2020)) . Türkiye’deki mevcut yapıların çoğunluğunun önceki deprem yönetmelikleri döneminde inşa edilmesi sebebiyle ilk yönetmelikler ile son yönetmeliklerin karşılaştırılması literatüre önemli katkı sunacaktır. Bu amaçla bu çalışma kapsamında yıllara göre kullanımda olan deprem

2.3. Türkiye Yersarsıntısı Bölgeleri Yapı Yönetmeliği (1949)

1939-1944 yılları arasında meydana gelen depremler sonrası ağır can kaybı ve oluşan maddi hasarlar sebebiyle 1949 yılında Türkiye Yersarsıntısı Bölgeleri Yapı Yönetmeliği hazırlanmış ve uygulamaya konulmuştur. Bu yönetmeliğin önemli yeniliklerden birisi de deprem bölgelerinin harita olarak yönetmeliğe işlenmesidir. Bu yönetmelikte deprem bölgeleri tehlike bölgelerine sınıflandırılarak yönetmeliğin 1. Maddesine eklenmiştir. Yönetmelikte taşıyıcı sistem türlerine ve deprem bölgelerine yapı kat sayıları ve yükseklikleri çizelge olarak yönetmeliğe eklenmiştir. Yapıların kat yükseklikleri ve kat sayıları Çizelge 1’de sunulmaktadır.

Tablo 1. 1949 yılında yayımlanan "Türkiye Yersarsıntısı Bölgeleri Yapı Yönetmeliğine göre kat adetleri ve yapı yükseklikleri

Yapı Türü	1.Derece Deprem Bölgesi		2.Derece Deprem Bölgesi	
	Kat Adedi	Yapı Yük. (m)	Kat Adedi	Yapı Yük. (m)
Kargir yapılar	3	12.5	4	16.0
Moloztaş duvarlı kargir yapılar	2	9.0	2	9.0
Yarım kargir-hımsız yapılar	2	7.5	2	9.0
Ahşap yapılar	1	5.0	2	7.5
Kerpiç yapılar	1	3.5	1	3.5

Türkiye Yersarsıntısı Bölgeleri Yapı Yönetmeliği deprem etkisinin birbirine dikey iki eksen doğrultusunda etki ettiği ama ikisinin aynı anda tesir etmeyeceği ifade edilmiştir. 1949 Türkiye Yersarsıntısı Bölgeleri Yapı Yönetmeliğine göre deprem hesabı 2 numaralı bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$H = C(G + nP) \quad (2)$$

Burada; H deprem etkisinde taban kesme kuvvetini, G yapı ağırlığını, n yapının kullanımına dair 1-1/3 arasında değişen katsayıyı, P yapıya etki eden hareketli yükleri ve C birinci derece deprem bölgelerinde 0.04-0.02 aralığında, ikinci derece deprem bölgelerinde 0.03-0.01 aralığında bir katsayıyı temsil etmektedir. C katsayısı yapıyı tasarlayan mühendis veya denetleyici kurumun teknik personelinin tecrübesi ve yapının zeminine göre belirlenmektedir. Bu yönetmeliğin önemli bir farkı ise hareketli yüklerin deprem hesabına dahil edilmesidir. Önceki yönetmeliklerde deprem hesabı sadece binanın zati ağırlığına bağlı olarak hesaplanırken, bu yönetmelikte hareketli yük ve hareketli yük azaltma katsayıları da dikkate alınmıştır.

2.4. Yersarsıntısı Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (1953)

1949 yılında hazırlanan Türkiye Yersarsıntısı Bölgeleri Yapı Yönetmeliği revize edilmiş hali olarak hazırlanmıştır. Deprem hesabı 2 numaralı bağıntı ile hesap edilmekte olup, katsayıları detaylıca açıklamıştır. Bu açıdan 1949 Türkiye Yersarsıntısı Bölgeleri Yapı Yönetmeliği ile aynı prensiplere sahiptir. Deprem katsayıları ve bina kullanım katsayıları Çizelge 2 ve Çizelge 3’de özetlenmiştir.

Tablo 2. C katsayısının zemin durumuna göre değişimi

Koşullar	1.Derece Deprem Bölgesi	2.Derece Deprem Bölgesi
Kaya zemin kalınlığı 1m’den fazla olan araziler	0.02	0.01
Minimum kalınlığı 3m olan sert killi zeminler	0.03	0.02
Diğer tüm zeminler	0.04	0.03

Tablo 3. n katsayısının değişimi (hareketli yük için)

Yapı Türü	n
Sinema, tiyatro, otel, kahvehane, fabrika, umumi toplantı ve işyeri	1
Resmi Yapılar	1/2
Konutlar	1/3

Yersarsıntısı Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (1953) zeminleri sınıflandırarak deprem etkisini yansıtmada o tarihe kadar kullanılan en somut yönetmelik olarak öne çıkmıştır.

2.5. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY-1962)

Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY-1962) önceki yönetmeliklerin devamı niteliğindedir. Temel prensip olarak önceki yönetmelikler ile benzer özellikleri taşımaktadır. Eşdeğer yatay deprem yükü hesabında n hareketli yük katsayısında değişikliğe gidilmiş, ayrıca C katsayısının hesabında zemin cinsine ek olarak bina yüksekliği de eklemiştir.

$$C = C_0 n_1 n_2 \quad (3)$$

Burada; C_0 bina yüksekliğine göre değişen katsayı (0.10-0.06), n_1 yapı ve zemin cinsine bağlı katsayı ve n_2 ise deprem bölgesine bağlı katsayısı ifade etmektedir. Bu yönetmelikte deprem hesabı yapılırken, 2 numaralı bağıntıdaki n katsayısı bina kullanım amacına göre belirlenmekte olup, halkın yoğun olarak yığıldığı yapılarda 1, diğer yapılarda ise 0.5 alınması gerektiği belirtilmiştir.

2.6. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY-1968)

1968 tarihli deprem yönetmeliği betonarme yapılar açısından önem taşımaktadır. Bu yönetmeliğin önceki yönetmeliklerden en önemli farkı betonarme elemanlar ile ilgili temel hesaplama ve boyutların tanımlanması olmuştur. Önceki yönetmeliklerde betonarme yapılardan bahsedilmesine karşın tasarım prensiplerine girilmemişti. Bu yönetmelik ile birlikte betonarme elemanların boyutlarına dair koşullar tanımlanmıştır. Ayrıca deprem hesabı daha ayrıntılı hale getirilerek güncellenmiştir. Betonarme elemanlar ile ilgili temel tasarım prensipleri aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Betonarme yapılarda kolonlar tüm katlar boyunca sürekli olacaktır. Planda ise aynı doğrultuda olması sağlanacaktır.
- Kolon-Kiriş birleşim noktaları civarında etriye aralığı, bu elemanların ortasındaki etriye aralığının yarısı kadar olmalıdır. Ayrıca kolonlara ait etriyeler kirişler içinde de devam edecektir.
- Kolonların genişlikleri kat yüksekliğinin $1/20$ 'sinden ve 24 cm'den küçük olmayacaktır.
- Betonarme perde duvarlarının kalınlığı kat yüksekliğinin $1/25$ 'inden ve 20 cm'den az olamaz.
- Betonarme döşemelerin kalınlığı çatı döşemelerinde 8, diğer döşemelerde 10 cm'den az olamaz.
- Birinci ve ikinci derece deprem bölgelerinde asmolen döşeme yapılamaz.
- Kirişler en az 15x30 cm kesitinde olacak ve yükseklikleri kendilerine bağlantılı plak döşeme kalınlığının 3 katından fazla olacaktır.

Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelikte deprem hesabı daha da detaylandırılmıştır. Deprem hesabı 4-10 bağıntılarında özetlenmiştir.

$$F = C \cdot W \quad (4)$$

Burada; F deprem kuvvetini, W bina ağırlığını ve C deprem katsayısını ifade etmektedir.

$$C = C_0 \cdot a \cdot b \cdot g \quad (5)$$

$$W = \sum W_i \quad (6)$$

$$W_i = G_i + n_i P_i \quad (7)$$

$$T = 0.09(H/D)^{0.5} \quad (8)$$

$$T \leq 0.5 \rightarrow g = 1 \quad (9)$$

$$T > 0.5 \rightarrow g = 0.5/T \quad (10)$$

Burada; C_0 deprem bölge katsayısı, a ; deprem zemin katsayısı, b bina önem katsayısı, g bina dinamik katsayısı, H binanın temel tabanından toplam yüksekliğini, D bina genişliğini, T binanın birinci doğal titreşim periyodunu, W_i i . katın ağırlığı, G_i i . kattaki zati yükler toplamı, n_i i . kattaki hareketli yük katsayısı, P_i i . kattaki hareketli yükler toplamı olarak tanımlanmaktadır. Bu hesaplarda kullanılan katsayılar Çizelge 4-5-6-7'de gösterilmektedir.

Tablo 4. Deprem bölge katsayısı C_0

Deprem Bölgesi	C_0
I	0.06
II	0.04
III	0.02

Tablo 5. Deprem zemin katsayısı (a)

Zemin Cinsleri	a
Sert ve kayalık zeminler	0.80
Sert kumlu killi zeminler	1.00
Sulu ve gevşek zeminler	1.20

Tablo 6. Bina önem katsayısı

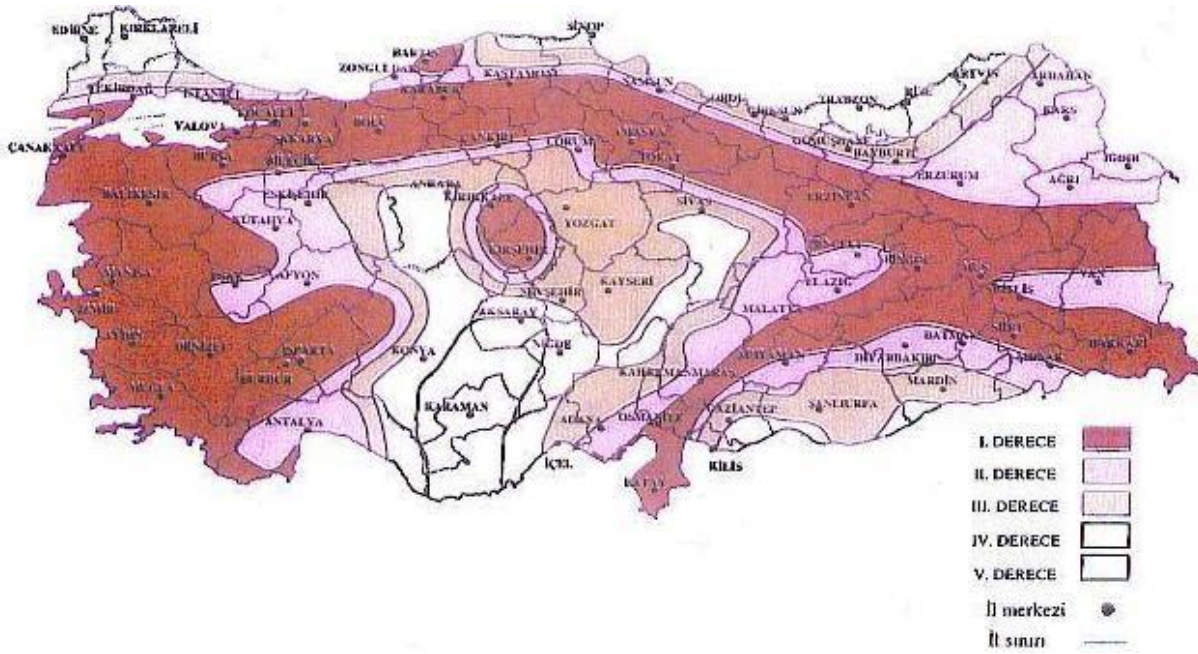
Yapı Türü	b
Deprem sonrası hemen kullanılması gereken yapılar	1.50
Önemli eşyaları saklayan yapılar	1.50
Halkın yoğun yığıldığı yapılar	1.50
Halkın az yığıldığı yapılar	1.00

Tablo 7. Hareketli yük katsayısı (n)

Yapı Türü	n
Sinema, tiyatro, okul, stadyum tipi yapılar	1.00
Sağlık yapıları, kamu yapıları, otel, apartman	0.50

2.7. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY-1975)

Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY-1975) günümüz modern yönetmeliklerine yakın bir yönetmelik olarak hazırlanmıştır. Özellikle hazırlandığı döneme göre deprem hesabını oldukça iyi tahmin etmektedir. Bu dönemde yönetmeliğe uygun tasarlanan binaların mevcut depremlere karşı dayanıklı olduğu görülmüştür. Bu yönetmelikte Türkiye dört deprem bölgesine ayrılmış olup, Şekil 2'de gösterilmektedir.

**Şekil 2.** 1972 tarihli deprem bölgeleri haritası (ABYYHY-1975)

1975 tarihli deprem haritası günümüz deprem haritasına çok benzemektedir. Özellikle kuzey Anadolu fay hattı ve güneye doğru çatallanan kısmı günümüz fay haritalarına oldukça yakındır. 1975 tarihli deprem yönetmeliği betonarme yapıların yoğun inşa edildiği dönem olması sebebiyle betonarme elemanların tasarımına önemli oranda yer vermiştir. Betonarme elemanların boyut ve donatılarına dair sınır değerler günümüz deprem yönetmeliklerine yakın değerlerdir. Deprem etkisinin hesabı daha da detaylandırılmış olup, zemine bağlı ivme spektrumları ilk kez yönetmelikte yer bulmuştur. Deprem hesabı 11-15 bağıntılarında özetlenmiştir

$$F = C \cdot W \quad (11)$$

$$C = C_0 \cdot K \cdot S \cdot I \quad (12)$$

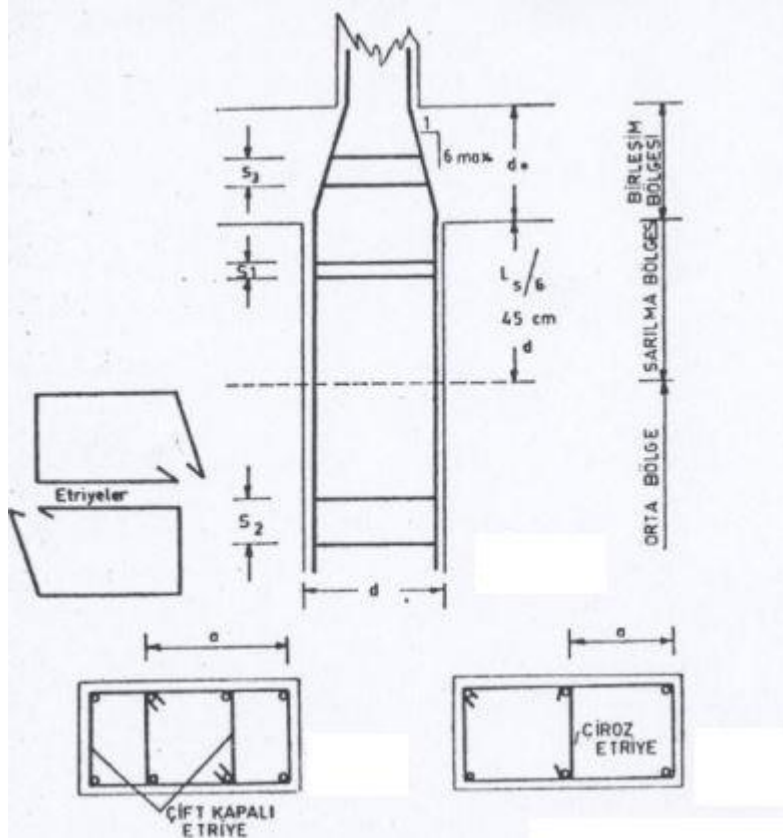
$$S = \frac{1}{|0.8 + T - T_0|} \quad (13)$$

$$T = \frac{0.09H}{\sqrt{D}} \quad (14)$$

$$F_t = 0.004F \left(\frac{H}{D}\right)^2 \quad (15)$$

Burada; F yatay deprem kuvvetini, W bina ağırlığını, C deprem katsayısı, C_o deprem bölge katsayısı, K yapı tipi katsayısı, S yapı dinamik katsayısı, I yapı önem katsayısı, H binanın temel tabanından toplam yüksekliğini, D bina genişliğini, T binanın binanın birinci doğal titreşim periyodu ve F_t son kata etki eden deprem yatay yükü olarak tanımlanmaktadır.

Bu yönetmelikte kolon-kiriş birleşim bölgelerine önem verilmiş ve sarılma bölgelerinin uzunlukları ve koşulları detaylandırılmış olup, Şekil 3'de gösterilmektedir.



Şekil 3. Düğüm noktaları ve sarılma bölgeleri (ABYYHY-1975)

2.8. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY-1998)

1998 yılında yayınlanan Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelikte (ABYYHY) depreme dayanıklı yapı tasarımının temel ilkelerinden olan düzensizlikler konusunda ilk koşullar detaylandırılmıştır. ABYYBHY-1998'de deprem bölgelerinde bulunan binalara etki edecek yatay deprem kuvvetlerinin hesabı için etkin yer ivme katsayısı, bina önem katsayısı ve tasarım spektrumu katsayıları belirlenmiştir. Bu veriler ışığında deprem kuvvetlerinin hesabı için kullanılacak hesap yöntemleri gösterilmiştir. İlk kez eşdeğer yatay deprem yükü yöntemi, mod birleştirme yöntemi ve zaman tanım alanına hesap adı altında detaylandırılmıştır. Bu açıdan incelendiğinde ABYYBHY-1998 daha akademik bir çalışmanın ürünüdür. Diğer yönetmeliklere göre daha bilimsel veriler ışığında hazırlanmıştır. Bu yönetmeliğe kadar düğüm noktalarında ve sarılma bölgelerindeki etriye sıklaştırmalarına önem verilmez iken, bu yönetmeliğin yayınlanması ve 1999 Kocaeli depreminden sonra bu kurallara sıkı bir şekilde uyulmaya başlanmıştır. 1998 Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmeliğe göre deprem hesabı 16 numaralı bağıntıya göre hesaplanmaktadır.

$$V_t = \frac{W \cdot A(T_1)}{R_a(T_1)} \geq 0.1 \cdot A_0 \cdot I \cdot W \quad (16)$$

Burada; V_t toplam eşdeğer deprem yükünü (taban kesme kuvvetini), W bina ağırlığını, A(T₁) spektral ivme katsayısını, A₀ yerel deprem ivmesi, R_a(T₁) deprem yükü azaltma katsayısını, T₁ binanın birinci periyodunu, S(T₁) zemin spektrum değeri, I bina önem katsayısını

göstermektedir. Yapıya ait spektral ivme katsayısı ve deprem yükü azaltma katsayısının hesabı 17-19 numaralı bağıntılarda özetlenmiştir.

$$A(T_1) = A_0 \cdot S(T_1) \cdot I \quad (17)$$

$$R_a(T) = 1.5 + (R - 1.5)T/T_A \rightarrow (0 \leq T \leq T_A) \quad (18)$$

$$R_a(T) = R \rightarrow (T > T_A) \quad (19)$$

Burada; T_A ve T_B yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodunu temsil etmektedir. Ayrıca bina ağırlığı hesabında kar yükünün %30'unun sabit yük olarak alınacağı, hareketli yük katılım katsayısı n değerinin endüstriyel sabit ekipmanlar için 1.00 alınacağı ancak vinç kaldırma yüklerinin kat ağırlığı hesabında dikkate alınmayacağı belirtilmektedir.

2.9. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007)

1995-Kobe ve en önemlisi 1999-Kocaeli depremlerinden sonra Türkiye'de ve dünyadaki deprem yönetmeliklerinde ciddi değişimler meydana gelmiştir. Özellikle Türkiye'de DBYBHY-2007 ile birlikte betonarme elemanların tasarımı deprem açısından değerlendirilip, TS-500 Betonarme yapıların tasarım ve hesap kuralları adlı şartname ile desteklenmiştir. Deprem sonrası meydana gelen ağır can kaybı ve ekonomik zararlar sebebiyle Türkiye'de hazır beton ve yapı denetim sistemi zorunlu hale getirilmiştir. Dünya'da ise 1999-Kobe depremi sonrasında kuvvet esaslı yaklaşımların olumsuz yanları ortaya çıkmıştır. Kuvvet esaslı yaklaşımlar ile tasarlanmış binaların depremde can güvenliğini sağlamasına rağmen deprem sonrası kullanılamaz hale gelmesi ekonominin durmasına sebep olmuştur. Bu deprem sonrası yapılan araştırmalar sayesinde kuvvet esaslı yaklaşımlara ilave olarak şekil değiştirme esaslı yaklaşımlar da kullanılmaya başlanmıştır. DBYBHY'de ise mevcut binaların şekil değiştirme esaslı yaklaşımlar altında performans analizine yer verilmiştir. Bu açıdan mevcut yapıların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi için ilk kez yönetmelikte koşullar ile tanımlanmıştır. Deprem hesabında kullanılan yöntemler ise Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik-1998 ile aynıdır.

2.10. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018)

1998 Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelikten sonra çıkarılan ilk kapsamlı yönetmeliktir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği önceki yönetmeliklerden en önemli farkı yapıların birden fazla performans hedefine göre tasarımına izin vermesidir. Önceki yönetmeliklerde mevcut yapıların değerlendirilmesinde kullanılan performans dayalı tasarımın, yeni yapılarda kullanılması önemli bir yeniliktir. Önceki yönetmeliklerde kullanılan deprem haritalarında Türkiye deprem bölgelerine ayrılarak deprem hesabı yapılırken, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde noktasal lokasyona bağlı olarak deprem tehlikesi hesaplanmaktadır. Bu açıdan standart ivme spektrumunu oluşturan deprem tehlikesi ve zemin etki parametreleri önemli derecede değişmiştir. İlk kez düşey tasarım spektrumu tanımlanarak kullanılmaya başlanmıştır. Deprem tehlikesi tek bir yer hareketi düzeyinde değil dört farklı düzeyde tanımlanmaktadır. Ayrıca önemli ve yüksek binalarda uygulamaya ait hükümlere yer verilmiştir. Türkiye Bina deprem yönetmeliğinde deprem hesabı 20 numaralı bağıntıya göre yapılmaktadır.

$$V_{tE}^{(x)} = m_t S_{aR}(T_P^{(x)}) \geq 0.04 m_t I S_{DS} g \quad (20)$$

Burada; $V_{tE}^{(x)}$ deprem taban kesme kuvvetini, $S_{aR}(T_P^{(x)})$ azaltılmış tasarım spektral ivmesini, m_t binanın toplam kütesini, I bina önem katsayısını, S_{DS} kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısını, g yerçekimi ivmesini ifade etmektedir. Azaltılmış tasarım spektral ivmesinin hesabı 21 numaralı bağıntıda verilmektedir.

$$S_{aR}(T) = \frac{S_{ae}(T)}{R_a(T)} \quad (21)$$

Burada; $S_{ae}(T)$ yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodunu ve $R_a(T)$ deprem yükü azaltma katsayısını ifade etmektedir. Yatay elastik tasarım ivme spektrumu ve deprem yükü azaltma katsayısının hesabı 22-27 numaralı bağıntılarda özetlenmiştir.

$$S_{ae}(T) = \left(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_A}\right) S_{DS} \rightarrow (0 \leq T \leq T_A) \quad (22)$$

$$S_{ae}(T) = S_{DS} \rightarrow (T_A \leq T \leq T_B) \quad (23)$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1}}{T} \rightarrow (T_B \leq T \leq T_L) \quad (24)$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \rightarrow (T_L \leq T) \quad (25)$$

$$R_a(T) = \frac{R}{I} \rightarrow (T > T_B) \quad (26)$$

$$R_a(T) = D + \left(\frac{R}{I} - D\right) \frac{T}{T_B} \rightarrow (T \leq T_B) \quad (27)$$

Burada; yatay tasarım spektrumu köşe periyotları T_A ve T_B , S_{DS} ve S_{D1} 'e bağlı olarak hesaplanmıştır. T_L sabit yer değiştirme bölgesine geçiş periyodu 6 s olarak tanımlanmıştır. R taşıyıcı sistem davranış katsayısı ve D dayanım fazlalığı katsayısını temsil etmektedir. S_{DS} ve S_{D1} 'in hesabında 28-29 numaralı bağıntı yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$S_{DS} = S_S F_S \quad (28)$$

$$S_{D1} = S_1 F_1 \quad (29)$$

Burada; S_S kısa periyot harita spektral ivme katsayısını, S_1 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısını, F_S kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayılarını, F_1 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayılarını belirtmektedir.

3. Deprem Yönetmeliklerinin Karşılaştırılması

Erzincan-1939 depremi sonrasında meydana gelen ağır can kaybı sonrasında yapıların tasarımında kullanılmaya başlanan deprem yönetmelikleri günümüze kadar teknolojiye ilerlemelerin etkisiyle sürekli güncellenmiştir. Türkiye nüfusunun önemli kısmı deprem bölgelerinde yaşamaktadır. Bunun da etkisiyle yapıların tasarımında yıllara göre farklı yönetmelikler kullanılmıştır. Bilimde meydana gelen her ilerleme ve akademik tecrübelerin sahaya da yansımalarının etkisiyle deprem yönetmelikleri sürekli olarak revize edilmiştir. Bu veriler ışığında yıllara göre deprem yönetmeliklerinde meydana gelen değişimlerin karşılaştırılması Çizelge 8'de gösterilmektedir.

Tablo 8. Deprem yönetmeliklerinin özellikleri ve deprem hesabının karşılaştırılması

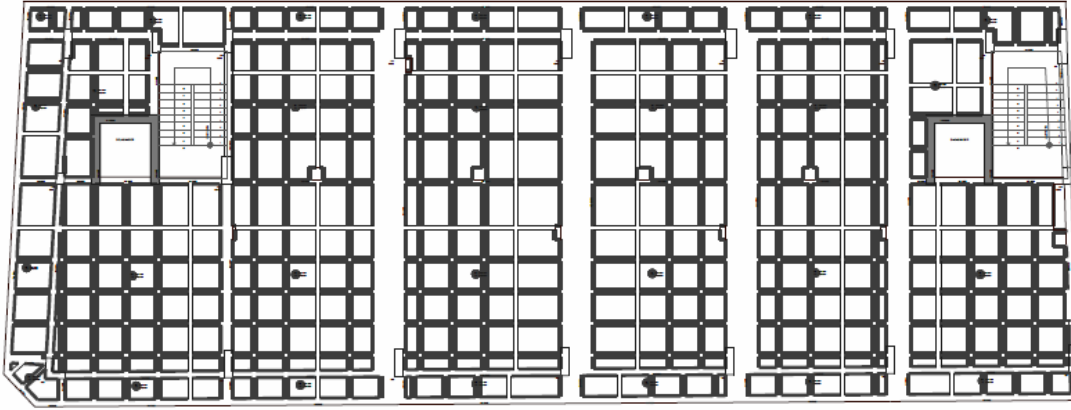
Yönetmelik	Özellik	Deprem Hesabı
ZMYİAİYT-1940	<ul style="list-style-type: none"> İlk yönetmelik (İtalya) İki deprem bölgesi tanımlı Ahşap-Yığma yapı ağırlıklı 	$T=C.W$
ZMMYT-1944	<ul style="list-style-type: none"> İlk yönetmelik (Türkiye) Zeminler sınıflandırıldı Kat sayıları belirlendi Ahşap-Yığma yapı ağırlıklı Deprem etkisi düşey (önemsiz) ve yatay (önemli) olarak tanımlandı 	$T=C.W$
TYBYY-1949	<ul style="list-style-type: none"> Deprem Haritası yapıldı Kat sayıları ve yükseklikleri revize edildi Hareketli yükler hesaba dahil edildi Yapı önem katsayısı kısmen dahil oldu 	$H=C(G+nP)$
YBYYHY-1953	<ul style="list-style-type: none"> C deprem katsayıları tanımlandı n yapı kullanım katsayıları tanımlandı 	$H=C(G+nP)$
ABYYHY-1962	<ul style="list-style-type: none"> C deprem katsayılarında hareketli yük etkisi tanımlandı n yapı kullanım katsayıları revize edildi 	$H=C(G+nP)$ $C=C_0.n_1.n_2$
ABYYHY-1968	<ul style="list-style-type: none"> Betonarme yapılar tanımlandı Betonarme elemanların boyutları sınırlandırıldı Binanın periyodu deprem hesabına eklendi 	$F=C.W$ $C=C_0.a.b.g$ $T = 0.09(H/D)^{0.5}$ $T \leq 0.5 \rightarrow g = 1$ $T > 0.5 \rightarrow g = 0.5/T$
ABYYHY-1975	<ul style="list-style-type: none"> Düğüm noktalarında etriye sıklaştırması tanımlandı Günümüz koşullarına en yakın yönetmelik Deprem haritası güncellendi İvme spektrumları tanımlandı 	$F = C.W$ $C = C_0.K.S.I$ $S = \frac{1}{ 0.8 + T - T_0 }$ $T = \frac{0.09H}{\sqrt{D}}$
ABYYHY-1998	<ul style="list-style-type: none"> Sektörde pratikte uygulanan ilk yönetmelik Deprem hesabı çağdaş yönetmeliklere benzer 	$V_t = \frac{W.A(T_1)}{R_a T_1}$ $\geq 0.1A_0.I.W$
DBYBHY-2007	<ul style="list-style-type: none"> Mevcut yapıların performans analizi eklendi Mevcut yapıların güçlendirilme koşulları ve yöntemleri tanımlandı ABYYHY-1998 ile aynı özelliklerde 	$V_t = \frac{W.A(T_1)}{R_a T_1}$ $\geq 0.1A_0.I.W$
TBDY-2018	<ul style="list-style-type: none"> Birden fazla performans hedefine göre tasarım eklendi Lokasyona bağlı deprem tehlikesi tanımlandı Düşey tasarım spektrumu tanımlandı 	$V_{tE}^{(x)} = m_t S_{aR}(T_P^{(x)})$ $\geq 0.04m_t I S_{DSg}$

4. Uygulama

Çalışma kapsamında incelenen yapı 2019 yılında alınan ruhsat ile yapılmış olup, kullanım amacı otel olarak tasarlanmıştır. Yapı betonarme taşıyıcı sistem kullanılarak imal edilmiştir. Yapı toplam 3 bodrum, 1 zemin, 5 normal katlı olup, C35 betonu ve B420C donatısı kullanılarak tasarlanmıştır. Yapı 550 m² kat alanına sahip olup, toplamda 4263 m² inşaat alanına sahiptir. Yapıya ait bilgiler Çizelge 9’da özetlenmiştir. Yapıya ait kat planı ise Şekil 4’de gösterilmektedir.

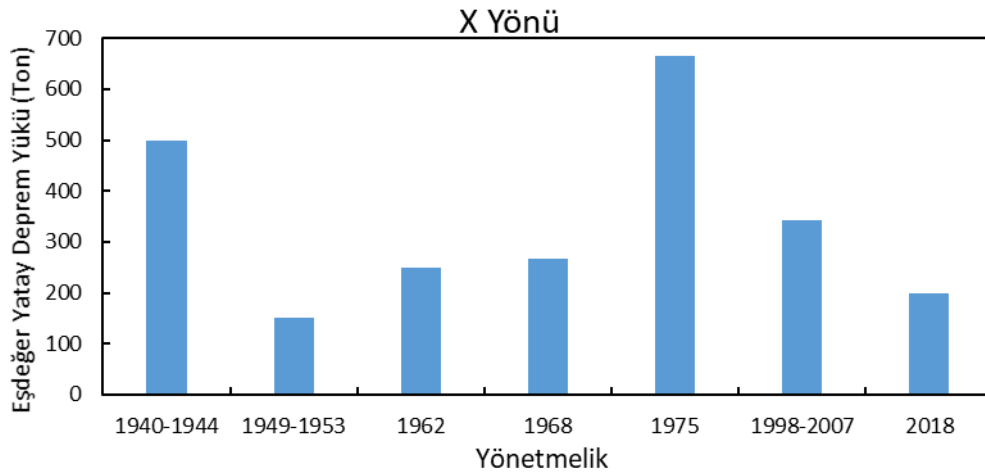
Tablo 9. Yapıya ait bilgiler

Bilgi	Yapıya ait Değer
Deprem Bölgesi	I
Bina yükseklik sınıfı	5
Zemin Sınıfı	Z3-ZC
Taşıyıcı sistem davranış katsayısı	7
T _A -T _B (DBYBHY)	0.15-0.60
T _A -T _B (TBDY)	0.07-0.34
Bina Önem Katsayısı	1
Yapı Kütlesi (t)	4997

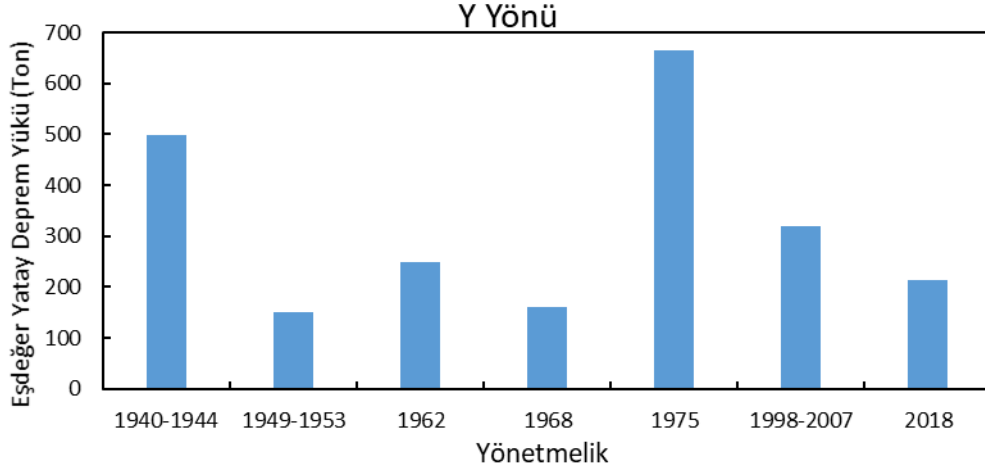


Şekil 4. Örnek yapıya ait kat planı

İncelenen yapının eşdeğer yatay deprem yükü yöntemiyle yıllara göre hesaplanmış değerler Şekil 5-6’da özetlenmiştir.



Şekil 5. X yönü için hesaplanan eşdeğer yatay deprem yüklerinin karşılaştırılması

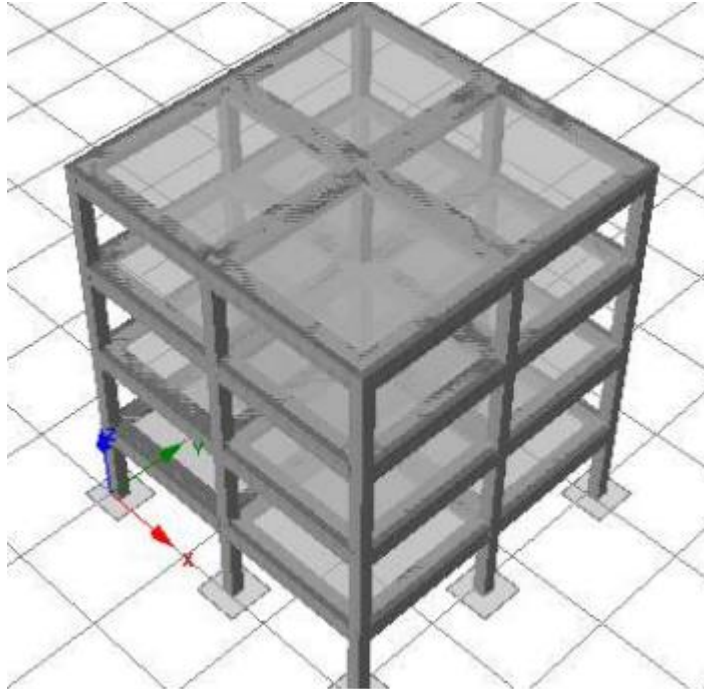


Şekil 6. Y yönü için hesaplanan eşdeğer yatay deprem yüklerinin karşılaştırılması

Yönetmeliklere dair sonuçlar incelendiğinde ABYYHY-1968 yönetmeliğine kadar eşdeğer yatay deprem yükü hesabında doğrultuların dikkate alınmadığı görülmüş olup, X ve Y yönü için aynı sonuçlar dikkate alınmıştır. ABYYHY-1968 yönetmeliğinde yapıların periyot hesabında deprem yönlerinin dikkate alınması sebebiyle X ve Y doğrultusunda deprem hesabı yapılabilmektedir. Yıllara göre hesaplanan eşdeğer yatay deprem yükü değerleri incelendiğinde ABYYHY-1975 yönetmeliğinin en yüksek değeri hesapladığı görülmüştür. TBDY-2018 yönetmeliği günümüz koşullarında, zemin değerlerine göre daha gerçekçi hesap yapması sebebiyle en doğru sonuçları verdiği düşünülmektedir.

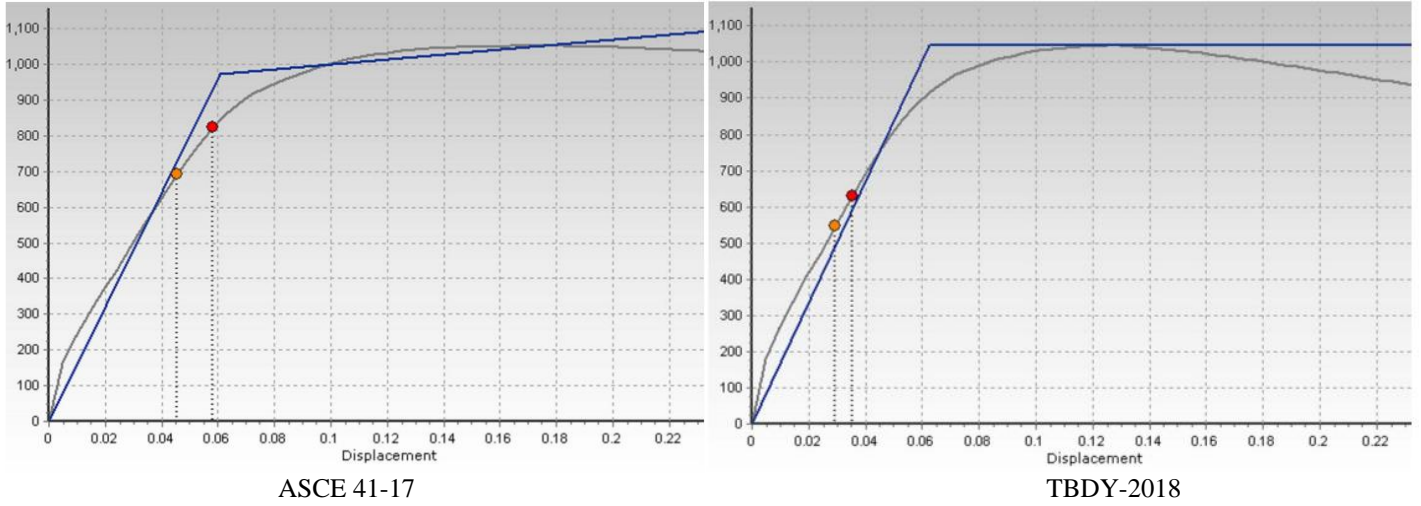
ASCE 41-17 ve TBDY-2018 Esaslarına Göre Örnek Yapının İtme Analizi Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında son olarak, Türkiye’de kullanılan TBDY-2018 yönetmeliği ile ASCE 41-17 yönetmeliği karşılaştırılmıştır. Bu amaçla Seismo-build programı kullanılarak örnek bir 4 katlı yapı modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde C30-B420C malzemesi kullanılmış olup, aynı zemin ve deprem durumu altında analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında oluşturulan yapı modeli Şekil 7’de gösterilmektedir.



Şekil 7. Seismo-Build programında modellenen yapıya ait ekran görüntüsü

Yapılan analiz sonucunda ASCE 41-17 ve TBDY-2018 esaslarına göre elde edilmiş itme analizi sonuçları Şekil 8’de karşılaştırılmaktadır.



Şekil 8. ASCE 41-17 ve TBDY-2018 esaslarına göre kapasite eğrileri

ASCE 41-17 ve TBDY-2018 esaslarına göre hesaplanan kapasite eğrileri incelendiğinde TBDY'nin ASCE 41-17'e göre daha ihtiyatlı hesap yaptığı görülmüştür. TBDY-2018'e göre daha düşük yer değiştirme ve kesme kapasitesi hesaplanmış olup, ASCE 41-17' göre daha yüksek kapasite değerlerine ulaşıldığı belirlenmiştir. Literatürde yapılan önceki çalışmalar incelendiğinde de TBDY-2018'in diğer muadil yönetmeliklere göre ihtiyatlı hesaplama yaptığı teyit edilmiştir.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında Türkiye'de kullanılan deprem yönetmeliklerinin özellikleri ve yapıldığı dönemdeki yapı sayısı incelenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar ve öneriler maddeler halinde sıralanmıştır.

- Örnek yapı üzerinden incelendiğinde TBDY-2018 yönetmeliğinin eşdeğer yatay deprem yükünü daha gerçekçi tahmin ettiği görülmektedir. Önceki yönetmelikler TBDY-2018 yönetmeliğinden daha yüksek eşdeğer yatay deprem yükü hesaplamıştır. TBDY-2018'e göre yapı periyodu hesabında etkin rijitliklerin dikkate alınması sebebiyle daha yüksek hesaplanan yapı periyodu, eşdeğer yatay deprem yükü hesabının DBYBHY-2007'e göre daha düşük hesaplanmasına neden olmuştur. Son dört deprem yönetmeliğinin sonuçları incelendiğinde eşdeğer yatay deprem yükünü azalan formda hesaplamaktadır. Buna karşın tasarıma esas iç kuvvetlerin etkisinin daha fazla artması sebebiyle son yönetmeliklerin daha güvenli olduğu birçok araştırmacı tarafından doğrulanmıştır.
- ASCE 41-17 ve TBDY-2018 esaslarına göre yapının itme analizi sonuçları incelendiğinde TBDY-2018'in ASCE 41-17'e göre daha ihtiyatlı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.
- 1939 Erzincan depreminden sonra başlayan deprem yönetmelikleri ilk zamanlarda; eşdeğer yatay deprem yükünü bina ağırlığının belirli yüzdesi alınacak şekilde kaba olarak hesaplamıştır. Sonrasında zemin etkileri ve bina önem katsayısı da dahil edilerek daha kapsamlı hesap yöntemlerine geçilmiştir. İlk çıkan yönetmelikler yığma ve ahşap yapıların tasarım ve uygulama kriterlerini içermiştir. 1968 yılındaki yönetmelik itibarıyla betonarme yapılar deprem yönetmeliklerine girmiştir. Bu açıdan bakıldığında 1968 öncesi betonarme yapıların deprem yönetmeliği ve tasarım kriterleri olmadan inşa edildiği düşünülebilir.
- ABYYHY-1998 yönetmeliğine kadar sektörde birçok deprem yönetmeliği teorik olarak kullanılmıştır. Özellikle ABYYHY-1975-1968 yönetmelikleri günümüz deprem yönetmeliklerindeki deprem etkisine yakın öneriler içermiştir. DBYBHY-2007 yönetmeliğinde Asmolen döşemelerin deprem bölgelerinde kullanımı serbest iken, TBDY-2018'de asmolen döşemelerin yapı sünekliği üzerine olumsuz etkileri sebebiyle kat sayısı ve deprem bölgesine göre izin vermiştir. Buna karşın ABYYHY-1968 yönetmeliğinde asmolen döşeme doğrudan deprem bölgelerinde kullanımı yasaklanmıştır.
- 1998 öncesi yapıların projeleri incelendiğinde birçok binanın fazla katlı, deprem hesabı olmadan, projesi olmadan veya projesine aykırı şekilde imal edildiği görülmüştür. Türkiye'deki bina sayıları incelendiğinde 2000 öncesi inşa edilen yapı sayısının toplam yapı stoğunda %60'ın üzerinde dilimde olduğu tahmin edilmektedir. Bu yapıların deprem yönetmeliğine uygun olmadan, denetimsiz ve hazır beton kullanılmadan inşa edildiği düşünülürse, depreme karşı dayanıksız olacağı tahmin edilmektedir. Türkiye'nin her bölgesine dağılmış olan bu yapıların bölge fark etmeksizin yenilenmesi gerekmektedir. En temel sonucu olarak Elazığ-2020 ve İzmir-2020 depremlerinde meydana gelen can kayıplarının büyük kısmı 2000 öncesi yapılan yapılarda meydana gelmiştir.

- Mevcut yapıların performans analizinde veya güçlendirilmesinde TBDY-2018 yönetmeliğine göre yapılmasına rağmen, mevcut yapının inşa edildiği dönemdeki koşulları bilmek, statik analizi yapacak mühendis için önem arz etmektedir. Hangi elemanın hangi koşullarda tasarlandığının bilinmesi, güçlendirilmesi gereken elemanların tespitinde yardımcı olacaktır. Bu açıdan mevcut yapıların performans analizinde ve güçlendirilmesi önceki yönetmeliklerin sektörde bilinmesi önemlidir.

Referanslar

Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY-1962), T.C. İmar ve İskan Bakanlığı, 1962.

Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY-1968), T.C. İmar ve İskan Bakanlığı, 1968.

Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY-1975), T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 1975.

Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY-1998), T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 1998.

Aksoyly, C, Arslan, M. (2021). 2007 ve 2019 Deprem Yönetmeliklerinde Betonarme Binalar İçin Yer Alan Farklı Deprem Kuvveti Hesaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılmalı Olarak İrdelenmesi. International Journal of Engineering Research and Development, 13 (2) , 359-374. DOI: 10.29137/umagd.844186

ASCE/SEI 41-17, (2017), Seismic rehabilitation and retrofit of existing buildings, American Society of Civil Engineers, Reston, VA.

Çetin, K., Demir, A., & Altıok, T. Y. 2007 Ve 2018 Türk Deprem Yönetmeliklerine Göre Yerel Zemin Sınıflarının Yapılardaki Burulma Düzensizliğine Etkisi. Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(2), 282-290.

Demir, A., & Kayhan, A. H. (2017). Deprem Yönetmeliği 2007 ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ile Uyumlu Zaman Tanım Alanında Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Eskişehir.

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, T. C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, <http://www.depremn.gov.tr>, 2007.

Devlet İstatistik Enstitüsü, 1965 il ve ilçe merkezleri ile nüfusu 5.000 ve daha fazla olan bucak ve köylerde binalar sayımı, Ankara.

Devlet İstatistik Enstitüsü, 1970 binalar sayımı, Ankara.

Devlet İstatistik Enstitüsü, Bina Sayımı 2000, Ankara.

Döndüren, M. S., Şeyda, H. A. V. A., & Ecemiş, A. S. Betonarme Bir Binanın Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi İle Dbybhy 2007 Ve Tbdy 2018 Yönetmeliklerine Göre Analizi. Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(2), 327-342.

Karaca, H, Oral, M, Erbil, M. (2020). Yapısal Tasarım Bağlamında 2007 Ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Karşılaştırılması, Niğde Örneği. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9 (2) , 898-903. DOI: 10.28948/ngumuh.667365

Keskin, E, Bozdoğan, K. (2018). 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Kırklareli İli Özelinde Değerlendirilmesi. Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 4 (1) , 74-90. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/pub/klujes/issue/37436/421614>

Koçer, M., Nakipoğlu, A., Öztürk, B., Al-hagri, M. G., & Arslan, M. H. (2018). Deprem Kuvvetine Esas Spektral İvme Değerlerinin TBDY 2018 Ve TDY 2007'ye Göre Karşılaştırılması. Selçuk-Teknik Dergisi, 17(2), 43-58.

Nemutlu, Ö. F., Balun, B., Benli, A., & Ali, S. A. R. I. (2020). Bingöl ve Elazığ İlleri Özelinde 2007 ve 2018 Türk Deprem Yönetmeliklerine Göre İvme Spektrumlarının Değişiminin İncelenmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 11(3), 1341-1356.

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. DOI: 10.47495/okufbed.797889

TBDY (2018), "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği", Çevre Şehircilik Bakanlığı. Ankara.

Tunç, G., & Tanfener, T. U. Ğ. R. U. L. (2016). 2007 ve 2016 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliklerinin Örneklerle Mukayesesi. 3. Ulusal Yapı Kongresi ve Sergisi Teknik Tasarım, Güvenlik ve Erişebilirlik, 1-13.

TÜİK, “Yapı İzin İstatistikleri: 2008-2020”, www.tuik.gov.tr, 2020.

Türkiye Yersarsıntısı Bölgeleri Yapı Yönetmeliği (TYBYY-1949), T.C. Bayındırlık Bakanlığı, 1949.

ULUTAŞ, H. (2019). DBYBHY (2007) ve TBDY (2018) Deprem Yönetmeliklerinin Kesit Hasar Sınırları Açısından Kıyaslanması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (17), 351-359.

Yersarsıntısı Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (YBYYHY-1953), T.C. İmar ve İskan Bakanlığı, 1953.

Zelzele Mintıklarında Yapılacak İnşaata Ait İtalyan Yapı Talimatnamesi (ZMYİAİYT-1940), T.C. Bayındırlık Bakanlığı, 1940.

Zelzele Mintıkları Muvakkat Yapı Talimatnamesi (ZMMYT-1944), T.C. Bayındırlık Bakanlığı, 1944.



İnsansız Sualtı Araçlarında (İSA) Hidrodinamik Sürüklenme ve Kaldırma Kuvvetlerinin Derinlik ve Hıza Bağlı Değişiminin HAD İle Analizi

Analysis of Depth and Speed-Dependent Variation of Hydrodynamic Drift and Lift Forces in Unmanned Underwater Vehicles (UUV) with CFD

Gülten Yılmaz^{*1} , Serhat Yılmaz² 

¹ Kocaeli Üniversitesi Hereke Asım Kocabıyık MYO. Elektronik Otomasyon Bölümü, 41800-Kocaeli, TÜRKİYE

² Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Haberleşme Mühendisliği Bölümü, 41300 Kocaeli, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 07/06/2021

Kabul / Accepted: 03/10/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Günümüzde İnsansız Sualtı Araçları (İSA), okyanus ve denizaltı keşifleri için sıklıkla kullanılmaktadır. Su yüzeyine yakın hareket eden İSA'ların hidrodinamiği, daha derinde hareket eden İSA'lara göre önemli farklılıklar gösterir. Bu makalede bir İSA'nın, yatay ve dikey doğrultularda, farklı derinliklerde (0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m ve 2.5 m) ve hızlarda (0.1 m/s, 0.5 m/s ve 1 m/s) yapmış olduğu hareketler sırasında, gövdesi üzerine etki eden hidrodinamik sürüklenme kuvvetleri, kaldırma kuvvetleri ve bunlara bağlı olarak sürüklenme ve kaldırma katsayıları belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmanın amacı, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analiz yöntemlerini kullanarak derinlik ve akış hızının hidrodinamik parametreler üzerindeki etkisini gözlemektir. Sayısal analizlerden elde edilen değerlerin doğruluğunu desteklemek için deneysel çalışmalar yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Analiz amaçlı simülasyonlarda, 2018-108 nolu Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (KOU-BAP) biriminden altyapı desteği alınarak geliştirilen, dört serbestlik dereceli İSA'nın SolidWorks yardımı ile bire bir ölçülerde tasarlanan 3 boyutlu CAD modeli kullanılmıştır. Flow Simulation ticari yazılımı, SolidWorks programıyla birlikte çalışabilen bir HAD yazılımıdır ve laminar ve türbülanslı akış analizleri için Navier Stokes denklemlerinin çözümünden yararlanır. Bu çalışmada, laminar akıştan türbülanslı akışa geçiş durumu için Flow Simulation k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“CAD Model, Sürüklenme Kuvveti, Kaldırma Kuvveti, Sürüklenme Katsayısı, Kaldırma Katsayısı”

Abstract

Unmanned Underwater Vehicles (UUV) are frequently used today for ocean and submarine exploration. The hydrodynamic properties of UUV's moving close to the water surface are quite different from those moving at deeper depths. In this article, an UUV's has done at different depths (0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m and 2.5 m) and velocities (0.1 m/s, 0.5 m/s and 1 m/s) in horizontal and vertical directions, during the movements, the hydrodynamic drag forces, the lift forces acting on the hull and the drag and lift coefficients depending on these were tried to be determined. The aim of the study is to observe the effects of depth and flow velocity on hydrodynamic parameters by using Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis methods. The accuracy of the values obtained from numerical analyzes was tried to be proven by conducting experimental studies. In the simulations for analysis, a three-dimensional CAD model of the four-degrees-of-freedom UUV, which was developed with the infrastructure support of the Kocaeli University Scientific Research Projects (KOU-SRP) unit, numbered 2018-108, was used. Flow Simulation commercial software is a CFD software interoperable with SolidWorks and utilizes the solution of Navier Stokes equations for laminar and turbulent flow analysis. In this study, the Flow Simulation k-ε turbulence model was used for the transition from laminar flow to turbulent flow.

Key Words

“CAD Model, Drag Force, Lift Force, Drag Coefficient, Lifting Coefficient”

1. Giriş

Derin denizleri keşfetmek için yapılan çalışmalarda, denizaltında insan varlığına duyulan ihtiyacı ortadan kaldıracak uygun alet ve ekipmanların tasarlanması, bu çalışmaların hızlı ve güvenli yapılabilmesi için oldukça önemlidir. Bu amaçla, çeşitli insansız denizaltılar geliştirilmiştir. İnsansız Sualtı Araçları (İSA'lar) veya uzaktan kontrol edilebilen sualtı araçları (ROV'lar), ölçüm ve deniz dibi araştırmaları, mayın taramaları, doğalgaz ve petrol araştırmaları, gemi altı hasarlarının tespiti ve bakımı gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır (Yakut vd., 2015). Araçların gövde şekilleri, kullanım amaçlarına uygun olacak şekilde tasarlanır. Literatürde en çok rastlananlar, sürüklenme kuvvetlerinin düşük olması nedeniyle enerji tüketimleri daha az olan, akım çizgili tasarıma sahip, silindirik veya torpido şeklindeki İSA'lardır. Diğer bir tür ise, daha kısa süreli görevler için veya buzdağları, barajlar gibi sualtı nesnelere araştıran İSA'lar, bu hidrodinamik yapıdan farklı olabilmektedir. İSA'ların hidrodinamik parametrelerinin, analitik yöntemlerle belirlendiği eşitlikler ise sadece silindirik veya torpido şekilli araçlar için geçerlidir. Bu durum, karmaşık geometriye sahip İSA' veya ROV'ların hidrodinamik parametrelerinin belirlenmesi işlemini güçleştirmektedir. Bu tür araçların, hidrodinamik parametreleri yalnızca ve en doğru olarak havuz deneyleri ve HAD analizleri ile bulunabilir.

İSA'ların denizdeki çalışma koşulları üç kategoriye ayrılabilir; deniz yüzeyi civarında, orta derinliklerde ve deniz tabanı yakınında. Su altı araçlarının tasarımındaki ana zorluk, manevra kabiliyetini korurken yeteneklerini farklı çalışma koşullarıyla eşleştirmektir. İSA'ların deniz yüzeyine yakın yatay hareketleri sırasında dalga oluşturma eğilimleri, aksel simetriye sahip araçlar için bile sıfır olmayan kaldırma kuvvetleri ve eğim (pitch) momentleri oluşturur. Bu etkiler nedeniyle, deniz yüzeyine yakın hareket eden İSA'lar için dinamik stabilite sağlamak büyük önem ve karmaşıklığa sahiptir. Çalışmaları sırasında, bir İSA özellikle GPS (Global Positioning System) navigasyonundan veri alırken sık sık deniz yüzeyine yaklaşır. Bu nedenle, deniz yüzeyine yakın ve farklı hızlarda hareket eden deniz altı araçlarına etki eden hidrodinamik kuvvet ve momentlerin değerlendirilmesi önemlidir. Tamamen suya daldırılmış hareketli İSA'ların hidrodinamik performansını değerlendirmek için, sıvı akışını tanımlayan denklemlerin doğru bir şekilde çözülmesi gerekir. Pratik olarak, bu denklemlerdeki kuvvetler ve momentler hidrodinamik katsayılar cinsinden ifade edildiğinden, bu katsayılar bir prototip oluşturmadan önce elde edilmelidir. Özellikle deniz yüzeyinden derinde hareket eden, aksel simetriye sahip araçlar için hidrodinamik katsayıların hesaplanmasında kullanılacak yöntemler deneysel, yarı deneysel ve sayısal yöntemler olarak sınıflandırılır. Bununla birlikte suya daldırılmış, hareketli bir araç deniz yüzeyi yakınına ulaştığında, yüksek veya orta derinlikler için hesaplanan katsayılar artık geçerli değildir ve bu koşullarda manevra kabiliyeti ve stabiliteyi değerlendirmek için kullanılamaz. Bu durumda, araç gövdesinin hareket dinamikleri, serbest yüzey dalgalarından etkilenir. Dalma derinliğinin fonksiyonu olarak, bir İSA'nın hidrodinamik katsayılarının tahmini, farklı çalışma koşullarına ait doğru dinamik modellerin elde edilmesi için son derece önemlidir.

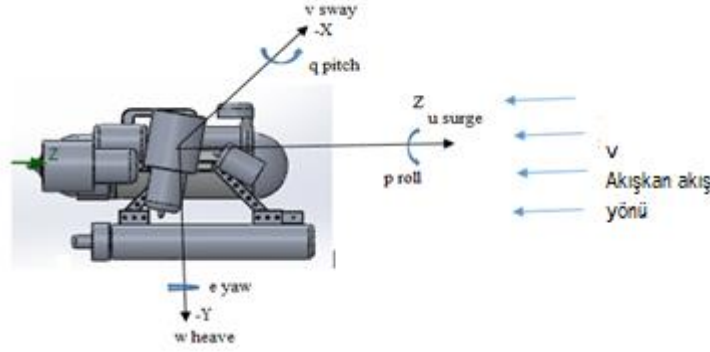
Deniz yüzeyine yakın hareket eden İSA'ların genel direnci, iki bileşenden oluşur: sürtünme ve basıncın neden olduğu viskoz direnç ve dalgalanmaların oluşturduğu direnç (Varus ve Paulling, 2010). Hidrodinamik katsayıları hesaplamak için kullanılan sayısal tekniklerdeki son gelişmeler ile ilgili uygun çözümler sunulmuştur. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğine (HAD) dayalı sonlu hacim yöntemleri, su yüzeyinin, su altı araçları üzerindeki etkisini simüle etmek için oldukça başarılıdır. Sualtı araçlarının hidrodinamik özelliklerinin, yüzeye yakın ve daha derinlerde tespit edilmesi alanında, araştırmacılar tarafından havuz testleri ve HAD akış analizleri şeklinde birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin, (Zhao vd., 2009) ve (Shao vd., 2013), dikey ve eğik silindirler etrafındaki sabit akışı sayısal olarak çözmüşlerdir. (Malavasi ve Guadagnini, 2007), bir sualtı aracına etki eden hidrodinamik kuvvetleri ve bu kuvvetlere bağlı katsayıları, bir kanal tabanından çeşitli yükseklikler için incelemişlerdir. (Novais vd., 2012), bir insanın 3B CAD modeli ile gerçekleştirdikleri akış analizlerinden, farklı derinliklerde yüzerken insan gövdesine etki eden hidrodinamik kuvveti tahmin etmişlerdir. Enerji verimliliği açısından en uygun derinliği belirlemeye çalışmışlardır. (Salari ve Rava, 2017), bir otonom sualtı aracının bulunduğu derinlik mesafesini, aracın çap uzunluğuna bölerek boyutsuz hale getirilen derinliklerde, (0.75D, 1D, 1.5D, 2D ve 4D, D: Aracın çapı) çeşitli hidrodinamik parametreleri, elde etmişlerdir. (Javanmard ve Mansoorzadeh, 2019), torpido şeklindeki bir İSA'nın sürüklenme ve kaldırma katsayılarını, farklı çalışma derinlikleri için ANSYS Fluent programı kullanarak analiz etmişlerdir. (Yang vd., 2015), karmaşık geometrik yapıya sahip bir ROV'un hidrodinamik parametrelerinin akış hızlarına bağlı analizini ANSYS Fluent ticari programı yardımıyla yapmışlardır. (Du vd., 2014), deniz dibine yakın hareket eden bir İSA'nın hidrodinamik parametrelerinin, atak açısına bağlı değişimlerini ANSYS ICEM ticari programı yardımı ile incelemişlerdir.

İSA'lara, hareketleri sırasında etki eden kuvvet ve momentlerin, doğrusal ve açısal hızlanmalara bağlı değişimlerini ifade eden fonksiyonların katsayıları, hidrodinamik türevler olarak nitelendirilir. Hidrodinamik türevleri tahmin etmek için de önemli çalışmalar yapılmıştır. Örneğin; (Zhang vd., 2010), Sualtı araçlarının hidrodinamik türevlerinin (ek kütle ve sönümleme) deneysel yöntemler ile tahmininde sıklıkla kullanılan Düzlemsel Hareket Mekanizması (DHM)'ni Fluent yazılımını kullanarak modellemişler ve hidrodinamik türevleri bu şekilde tahmine çalışmışlardır. (Mitra vd., 2021), İSA gövdesine yönelik hidrodinamik özellikleri araştırmak için eğimli kanal yatakları üzerinde, farklı Reynolds sayılarındaki akış analizleri ile deneysel çalışmaları birlikte yürüterek sonuçları karşılaştırmışlardır. (Karasu, 2019), Reynolds sayısının 5000'den küçük olduğu durumlar için, silindir etrafındaki kararsız akışı farklı türbülans modelleri ile sayısal olarak incelemiş ve bu modellerin performanslarını karşılaştırmıştır. Çalışmada, aynı şartlarda aynı ağ yapısında türbülans modelleri olarak LES, k- ω tabanlı DES, k- ϵ Realizable ve k-kL- ω transition modelleri kullanılmıştır. Mansoorzadeh ve (Javanmard, 2014), Serbest yüzey akışlarının, sualtı aracının sürüklenme ve kaldırma katsayıları üzerindeki etkisini araştırmak için HAD programı yardımı ile iki fazlı akış için Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemlerinin çözümünü gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sayısal sonuçları, İsfahan Teknoloji Üniversitesi Denizaltı Ar-Ge Merkezi'nin çekme tankında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmışlar ve birbirine yakın değerler olduklarını göstermişlerdir.

Tamamen suya batmış olan bir sualtı aracının sabit hızda veya ivmeli hareketi için iticilerin, araç ataletini ve akışkandan kaynaklı hidrodinamik kuvvetleri yenecek miktarda güç üretmesi gerekir. Özellikle otonom araçların uzun süre su altında görev yapabilmeleri açısından enerji verimliliği önemli bir konudur. Bu kapsamda farklı hız, derinlik ve atak açıları ile hareketleri sırasında sualtı araçlarına etki eden hidrodinamik kuvvet ve momentlerin belirlenmesi önemlidir. Literatürde yer alan araştırmalar incelendiğinde, büyük çoğunluğu akım çizgili tasarıma sahip sualtı araçları olduğu ve genellikle atak açısına bağlı olarak sürüklenme ve kaldırma katsayılarının değişiminin araştırıldığı çalışmalar olduğu görülmüştür. Bu çalışma, karmaşık geometrik yapıya sahip bir aracın sürüklenme ve kaldırma katsayılarının derinlik ve akış hızına bağlı değişimini, karşılaştırmalı olarak araştırdığı için farklıdır. Böylelikle, aracın enerji tüketimi açısından hangi derinlikte ve hızda çalıştırılmasının daha uygun olacağına karar verilebilecektir. Ayrıca, tasarım aşamasında derinliğe bağlı basınç ölçümleri ile araç gövdesinde kullanılacak doğru malzemenin seçilmesine de katkı sağlayacaktır. Bütün bunlar, çalışmanın önemini artırmaktadır.

2. Dış Akış Analizi

Akışkanın, durağan bir katı cisim üzerinden hareket etmesi veya durağan bir akışkan içerisinde katı bir cismin hareket etmesi sırasında oluşacak hidrodinamik kuvvet ve momentlerin hesaplandığı problemler, dış akış problemleri olarak tanımlanır (Öztop, 2014). Bir İSA'nın 6 serbestlik dereceli genel hareketi; 3 doğrusal kuvvet ve 3 açısal momentum denklemi ile tanımlanır. Bazı durumlarda, akış alanları ve araç geometrisi, dış akış problemlerinin analitik yollarla çözülemeyeceği kadar karmaşık olabilir. Bu durumlarda, sualtı araçlarının dinamik sistem modellerinin belirlenmesi için gerekli olan hidrodinamik parametrelerin (ek kütle, sönümleme ve coriolis etkisi), hesaplanması sırasında, dış akış problemlerinin sayısal çözümünden yararlanır.



Şekil 1. Akışa bağlı kuvvet ve momentler (FlowSimulation koordinat sistemi için tanımlı)

Kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri, araç yüzeyi boyunca basınç ve çeper-kayma gerilmesinin integrali ile bulunur (Öztop, 2014).

$$F_D = \int_A dF_D = \int (-P \cdot \cos\theta + \tau_w \cdot \sin\theta) dA \quad (1)$$

$$F_L = \int_A dF_L = -\int (P \cdot \sin\theta + \tau_w \cdot \cos\theta) dA \quad (2)$$

Kaldırma kuvveti F_L ve sürüklenme kuvveti F_D , araç geometrisine, akışkanın yoğunluğuna (ρ) ve hızına (v) bağlıdır. Kaldırma ve sürüklenme kuvvet katsayıları boyutsal analiz ile eşitlik (3) ve (4)'teki gibi ifade edilir.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho \cdot v^2 A} \quad (3)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho \cdot v^2 A} \quad (4)$$

Burada A , hidrodinamik uygulamalar için ıslak yüzey alanıdır. Dış akışa bağlı kuvvetler, akışkanın yüzey üzerinde oluşturduğu basınç ve sürtünmelerden kaynaklanır.

$$F_D = F_{\text{sürtünme}} + F_{\text{basınç}} \quad (5)$$

$$C_D = C_{D,\text{sürtünme}} + C_{D,\text{basınç}} \quad (6)$$

Bu, su araçlarının kuvvet testinde kullanılan temel yaklaşımdır. Basınca bağlı sürüklenme katsayısı ($C_{D,\text{basınç}}$), akış frekansının fonksiyonu iken, sürtünmeye bağlı sürüklenme katsayısı ($C_{D,\text{sürtünme}}$), Reynolds sayısının (Re) fonksiyonudur. Sualtı aracının geometrisi, akış çizgileri ile paralel duruma getirilerek akış ayrılması ortadan kaldırılmaya çalışılmakta ve toplam sürüklenme kuvveti F_D , azaltılmaya çalışılır. Farklı geometrilere sahip katı gövde yapılarının dış akış analizlerinden elde edilen sonuçlardan, $Re > 10^4$ için C_D değerinin sabit olduğu gözlenmiştir (Öztop, 2014).

Basınç ve akışkanın yüzeyde oluşturduğu sürtünme kuvvetlerinin akışa dik doğrultudaki bileşenleri, araç gövdesini aynı yönde hareket etmeye zorlar. Bu zorlanma etkisine kaldırma denir. Kaldırma katsayısı C_L , aracın, yatay eksen etrafındaki dönme hareketinden (roll) oldukça etkilenir. Dönme hareketinin C_D üzerindeki etkisi ise çok küçüktür.

3. Simülasyon Modellerinin Tasarımı

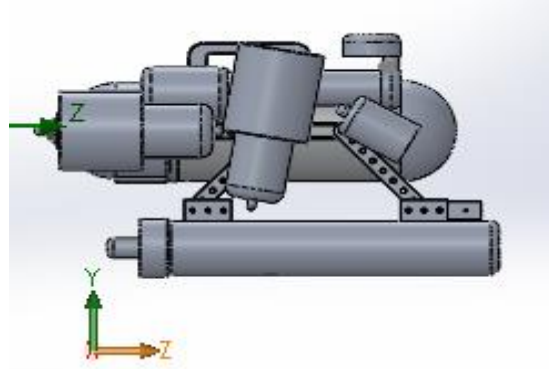
Bu çalışmada, hidrodinamik özellikleri incelenecek sualtı aracının (şekil 2), bilgisayar destekli çizim programı SolidWorks ile bire bir ölçülerde tasarlanan 3B modeli (şekil 3) kullanılmıştır. İSA modelinin, Solid Works ticari programı ile belirlenmiş olan bazı parametreleri Tablo 1’de görülmektedir.

Tablo 1. İSA’ya ait bazı fiziksel özellikler

Özellik	Değer
Kuru kütle (kg)	33.87
Boy (m)	0.62
En (m)	0.42
Yükseklik (m)	0.36
Hacim (m ³)	0.01
Yüzey alanı (m ²)	1.52



Şekil 2. İnsansız Sualtı Aracı (İSA)



Şekil 3. İSA'nın 3B CAD Modeli

Şekil 2’de görülen İSA; elektronik kontrol kartları ve bağlantı kablolarını muhafaza eden silindirik bir ana gövde, ikisi yatay diğeri dikey itme sağlayan 4 motor, dengeleme amaçlı dubalar, kamera, lamba ve ayak kısmında besleme sağlayan Lityum bataryaları muhafaza eden iki kurşun silindirden oluşmaktadır. Gövde yapısı genel olarak sert PVC’den üretilmiş ve sıvı sızdırmazlığı sağlanmıştır. İSA’nın 3B CAD modeline, SolidWorks’ta kullanılmış olan metaryallerin ataması yapıldıktan sonra kütlesi 33.87 kg olarak belirlenmiştir. Bu değer aracın tartılan kütlesi ile uyumludur. Araç geometrik yapısı açısından literatürde yaygın olarak karşılaşılan silindirik veya torpido tipindeki araçlara göre farklılık gösterir. Bu farklılık, hidrodinamik parametrelerinin analitik yöntemler ile belirlenmesini çok güçleştirmektedir. Bu çalışma, karmaşık geometriye sahip İSA’lar için kontrolör tasarımında gerekli olacak dinamik modellerinin elde edilmesi açısından çalışma alanına katkı sunacaktır.

Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemleri türbülanslı akış analizlerinde, türbülans modelleri yardımıyla çözülen Navier-Stokes denklemleridir. Bu denklemlerde, akış özellikleri zamana-ortalama ve zamana bağlı değişen kısım olmak üzere iki bileşene ayrılmıştır. Örneğin hız büyüklüğünün bileşenlere ayrılması eşitlik (7)’deki gibidir:

$$u_i = \bar{u}_i + w_i \quad (7)$$

Burada \bar{u}_i hızın zamana göre ortalamasını, w_i ise zamana bağlı hız miktarının ortalama değer ile olan farkını temsil etmektedir. Zamana bağlı çözülen RANS denklemleri Zamana-bağı Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (URANS) denklemleri olarak adlandırılır. Süreklilik denklemi ve URANS denklemleri sırasıyla eşitlik (8) ve (9)’da verilmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (9)$$

Eşitlik (9)'daki $(-\rho u'_i u'_j)$ terimi Reynolds gerilmesi olarak isimlendirilir. Burada u'_i ve u'_j , sırasıyla x-yönündeki ve y-yönündeki hızın bu yönlerdeki ortalama hız değerlerinden anlık sapma miktarlarıdır. Türbülans olayının kaotik yapısından ötürü bu değerlerin hesaplandığı analitik bir yöntem mevcut değildir. Bu nedenle Reynolds gerilmesi hesaplanırken ortalama hızdan sapma değerleri bazı yaklaşımlar kullanılarak hesaplanır. Türbülans modelleri bu değerlerin hesaplanabilmesi için geliştirilmiştir (Apaçoğlu, 2010).

Sualtı aracının, akışın düzenli olmadığı açık deniz sularında çalışacağı varsayılarak akış analizindeki akışkan örneği sıkıştırılmaz, açık kanal ve türbülanslı olarak belirlenmiştir. Türbülanslı akışa yönelik çözüm, türbülanslı kinetik enerji ve dağılım oranıyla ilgili iki denklemden oluşan $k-\varepsilon$ akış modelidir. İki denklemlilik türbülans modelleri arasında ekonomikliği ve pek çok akış olayında kabul edilebilir doğrulukta sonuç vermesi açısından yaygın olarak kullanılan yarı ampirik bir modeldir. Türbülans kinetik enerjisi (k) ve dissipasyon oranı (ε) için yazılan iki adet transport denkleminin çözümünü ve türbülans viskozitesinin hesabını içerir (Kaya ve Karagöz, 2007). Bu transport denklemleri k ve ε için sırası ile;

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{d}{dx_i} \left(\Gamma_k \frac{dk}{dx_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (10)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{d}{dx_i} \left(\Gamma_\varepsilon \frac{d\varepsilon}{dx_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (11)$$

şeklinde yazılabilir. Bu modelde difüzyon terimleri;

$$\Gamma_k = \mu + \mu_t / \sigma_k, \quad \Gamma_\varepsilon = \mu + \mu_t / \sigma_\varepsilon \quad (12)$$

hız gradyentinden kaynaklanan türbülans kinetik enerjisi üretimini ifade eden terim;

$$G_k = \mu_t \left(\frac{du_i}{dx_j} + \frac{du_j}{dx_i} \right) \frac{du_i}{dx_j} \quad (13)$$

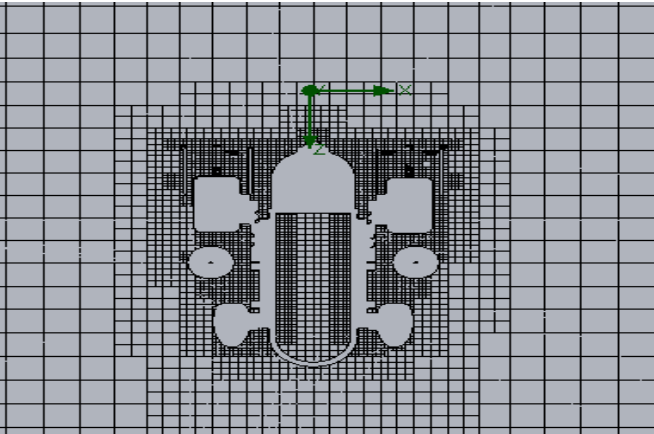
olup burada türbülans viskozitesi, türbülans kinetik enerjisi ve dissipasyon oranı cinsinden eşitlik 14'teki gibi yazılır.

$$\mu_t = \rho C \mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (14)$$

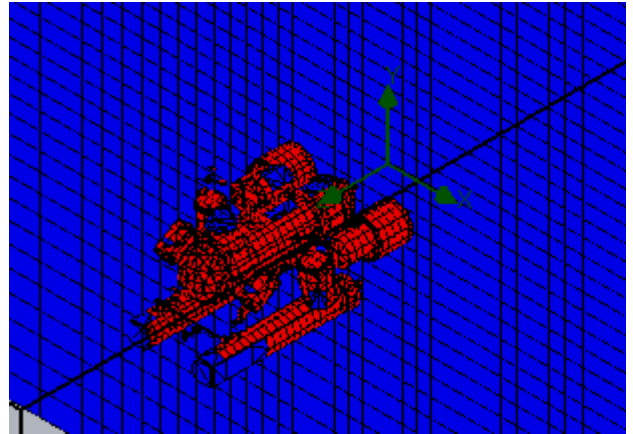
Bu çalışmada, İSA modelinin hareketsiz (statik) olduğu, etrafındaki akışkanın araç hızında hareket ettiğinin varsayıldığı bir mesh yöntemi kullanılmıştır. 0.1 m/s akış hızı için 0.5 m ve 1 m derinlikler için ve 0.5 m/s ve 1 m/s akış hızları için; 0.5 m, 1 m, 1.5 m ve 2 m derinliklerde dış akış simülasyonları gerçekleştirilmiştir. İSA'nın batma derinliği arttıkça, yüzey dalgalarının C_D ve C_L katsayıları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada, akış analizleri için bilgisayar destekli tasarım programı SolidWorks'un eklentisi olarak çalışan Flow Simulation programı kullanılmıştır.

3.1 k-ε modeli için ağdan bağımsızlık analizi

Hidrodinamik analizlerde, akış alanı ağ yapısı çok önemlidir. Bunun sebebi, ağ yapısı ve miktarının, hidrodinamik analizin doğruluğu ve işlem yükü üzerinde belirleyici olmasıdır. Bu nedenle analize başlamadan önce, en uygun ağ miktarını belirleme simülasyonları gerçekleştirildi. Aracın 3B modelinde bazı parçalar devre dışı bırakılarak modelde sadeleşmeler yapıldı. Böylelikle işlem yükü hafifletildi. Şekil 4'te görüldüğü üzere araç gövdesinin akışkan ile temas ettiği yüzeyler, daha küçük ağ yapısı ile kaplanarak araç geometrisi yakalanmaya çalışıldı.



Şekil 4. Araç gövdesi ve akışkan arayüzü ağ yapısı



Şekil 5. Araç gövdesi üzerindeki 3 boyutlu hacimsel ağ yapısı

Araç modeli ile, yaklaşık 4×10^3 değerindeki Reynolds sayısı için 4 farklı ağ sayısında ağdan bağımsızlık testleri yapılmıştır (Tablo.2). Analiz 846930 ağ sayısında iken, C_D değerlerinin ağ sayısından önemli ölçüde etkilenmediği gözlenmiştir.

Tablo 2. Ağ bağımsızlığı testi sonuçları

Ağ Sayısı	Sürüklenme Kuvveti (F_D)	Sürüklenme Katsayısı (C_D)
45586	0.2852 N	0.3209
108040	0.3055 N	0.3439
235210	0.2904 N	0.3258
846930	0.2905 N	0.3269

3.2 Kurulum ve Sayısal Çözüm

Araç modelini çevreleyen sıvı akışını modellemek ve çözmek için ticari Solid Works programı ile birlikte çalışan FlowSimulation HAD programı kullanılmıştır. Hesaplamalar için, araç gövdesini çevreleyen akış alanı ve su basıncı, akışkanın sıkıştırılmaz, izotermal RANS (Reynold Ortalamalı Navier Stokes) denklemleri ile hareket modellemesine dayalı olarak belirlenmiştir. Analizlerde 3 boyutlu hacimsel dış akış modeli kullanılmıştır. Akışkan-katı etkileşim bölgesi hücre sayısı : 19190, akışkan olarak ise deniz seviyesi atmosfer basıncı altında ve 293.2 °K sıcaklıktaki su seçilmiştir. Bu koşullardaki suyun yoğunluğu $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$, viskozitesi ise $\mu = 0.0010115 \text{ (Pa.s)}$ 'dir. Türbülanslı akış modeli olarak k- ϵ modeli kullanılmıştır. Türbülans parametreleri; intensity = % 0.1, length = 0.003 m seçilmiştir. Hesaplama bölgesi 6 m (uzunluk) x 4 m (genişlik) x 3 m (derinlik) olacak şekilde dikdörtgen prizma şeklinde belirlenmiştir. Aracın boyutları ise yaklaşık olarak 0.36m x 0.42 m x 0.62 m'dir. Şekil 4'te görüldüğü üzere, sıvı ve katı model etkileşiminin olduğu yüzeylerde daha ince bir ağ yapısı kullanılmıştır. Bu hacim, gerekli hesapsal doğruluk için yeterlidir. Sınır koşulu olarak ideal duvar seçilmiştir. Global Goals : Force Z ve Force Y olarak seçilmiş, Equation Goals1 : $C_D = \{GG \text{ Force } (Z) / (0.5 * 998.2 * 0.5^2 * 0.178)\}$ Equation Goals2 : $C_L = \{GG \text{ Force } (Y) / (0.5 * 998.2 * 0.5^2 * 0.382)\}$ şeklinde formül olarak girilmiştir.

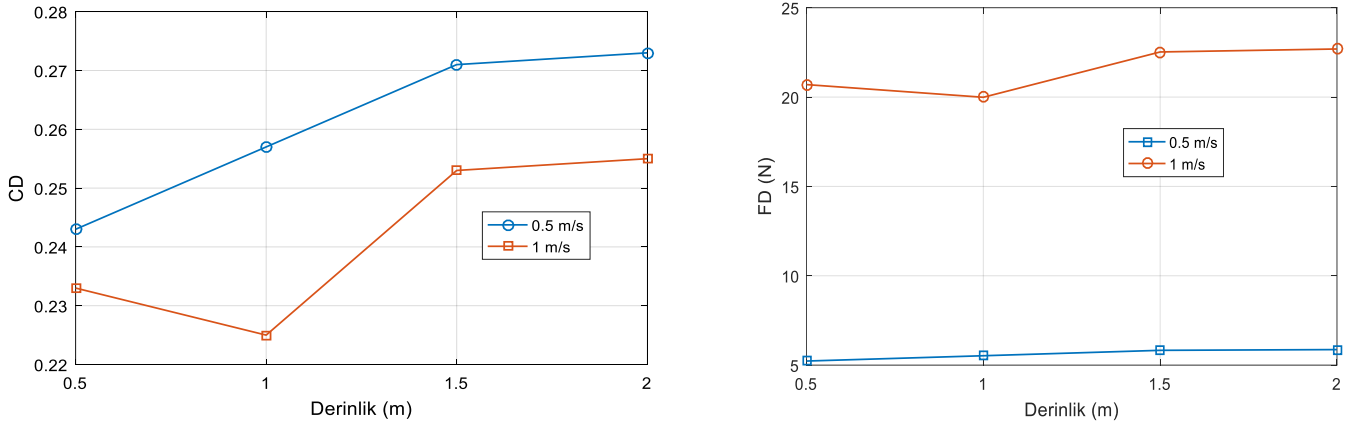
Sıvı içerisine tamamen batmış şekilde hareket eden bir sualtı aracı gövdesine etki eden kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri ile bunlara bağlı olarak değişen kaldırma ve sürüklenme katsayılarının, hareket derinliğine bağlı değişimlerini HAD çözüm yöntemleri aracılığı ile gözlemlemek, bu çalışmanın amaçlarından biridir. Bunun için, araç gövdesi sıvı yüzeyinden itibaren sırasıyla 0.5 m, 1 m, 1.5 m, ve 2 m derinliklere dalmış durumda iken ve yatay düzlemde 0.5 m/s ile 1 m/s hızlarla hareket ederken, araç gövdesine etki eden sürüklenme kuvveti F_D ve kaldırma kuvveti F_L hesaplanmıştır. Equation Goals simülasyon parametresi, C_D ve C_L değerlerini hesaplamak amacıyla eşitlik (3) ve (4)'e göre tanımlanmış denklemlerdir. Aracın, yatay ve dikey düzlem alanları sırasıyla 0.178 m² ve 0.382 m² olarak SolidWorks tarafından hesaplanmıştır.

4. Analiz Sonuçları

Araç modeli etrafındaki akışın, k- ϵ türbülans modeli çözümünden elde edilen, toplam sürüklenme kuvveti ve sürüklenme katsayısı, farklı derinlikler ve iki farklı hız değeri için Tablo 3' te listelenmiş ve Şekil 6'da grafiksel olarak sunulmuştur.

Tablo 3. Hidrodinamik özelliklerin derinliğe bağlı değişimi (akış hızı v=0.5 m/s için).

Derinlik (m)	Sürüklenme Kuvveti (N)	Kaldırma Kuvveti (N)	Sürüklenme Katsayısı (C_D)	Kaldırma Katsayısı (C_L)
0.5	5.228	-0.471	0.243	-0.0098
1	5.525	-0.509	0.257	-0.0106
1.5	5.828	-0.0704	0.271	-0.00147
2	5.869	0.098	0.273	0.0021



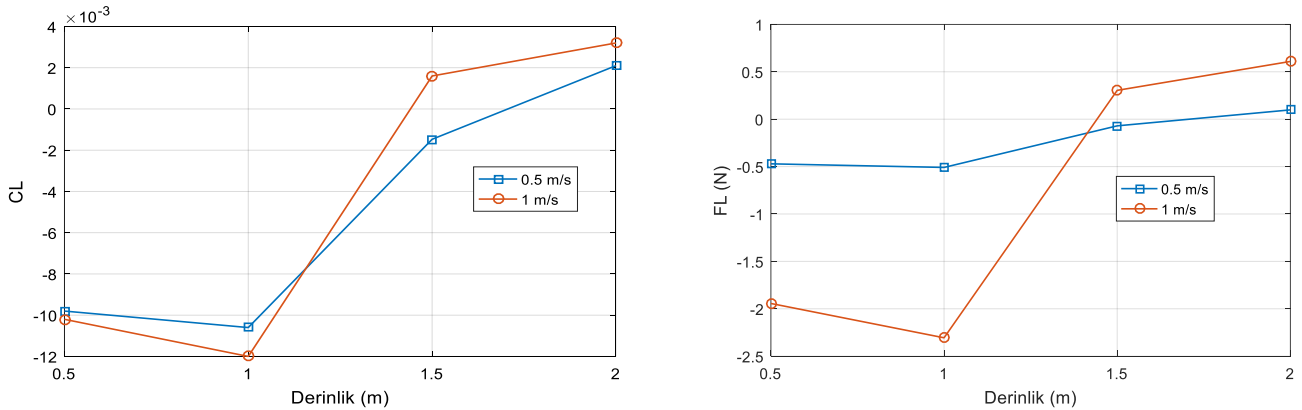
Şekil 6. Derinlik ve hızın fonksiyonu olarak sürüklenme katsayısı sürüklenme kuvveti

İncelenen iki akış hızı için (0.5 m/s ve 1m/s), dalma derinliği 1m'yi geçtiğinde, araç gövdesi ile temas eden akışkan miktarındaki artış viskoziteyi artırdığından F_D ve C_D artış göstermektedir. Bu derinlikten itibaren her iki hız değeri için 1.5 m'den ve 2 m'ye kadar olan derinlik değişiminde hem C_D hem de F_D değeri neredeyse sabit kalmaktadır. En düşük C_D ve F_D değerleri araç yüzeye yakın hareket ederken kaydedilmiştir. Hareket hızları çok yüksek olmadığından yüzey etkileri fazla gözlenmemiştir. Herhangi bir derinlik için, araç etrafındaki akış hızı arttıkça, sürüklenme kuvveti F_D artarken, sürüklenme katsayısı C_D 'nin azaldığı gözlemlendi.

Araç modeli etrafındaki akıştan kaynaklanan toplam kaldırma kuvveti ve kaldırma kuvveti katsayısı, farklı derinlikler ve iki farklı hız değeri için Tablo 4' de listelenmiş ve Şekil 7'de grafiksel olarak sunulmuştur.

Tablo 4. Hidrodinamik özelliklerin derinliğe bağlı değişimi (akış hızı $v=1$ m/s için).

Derinlik (m)	Sürüklenme Kuvveti (N)	Kaldırma Kuvveti (N)	Sürüklenme Katsayısı (C_D)	Kaldırma Katsayısı (C_L)
0.5	20.698	-1.944	0.233	-0.0102
1	19.988	-2.306	0.225	-0.0121
1.5	22.524	0.304	0.253	0.0016
2	22.691	0.609	0.255	0.0032

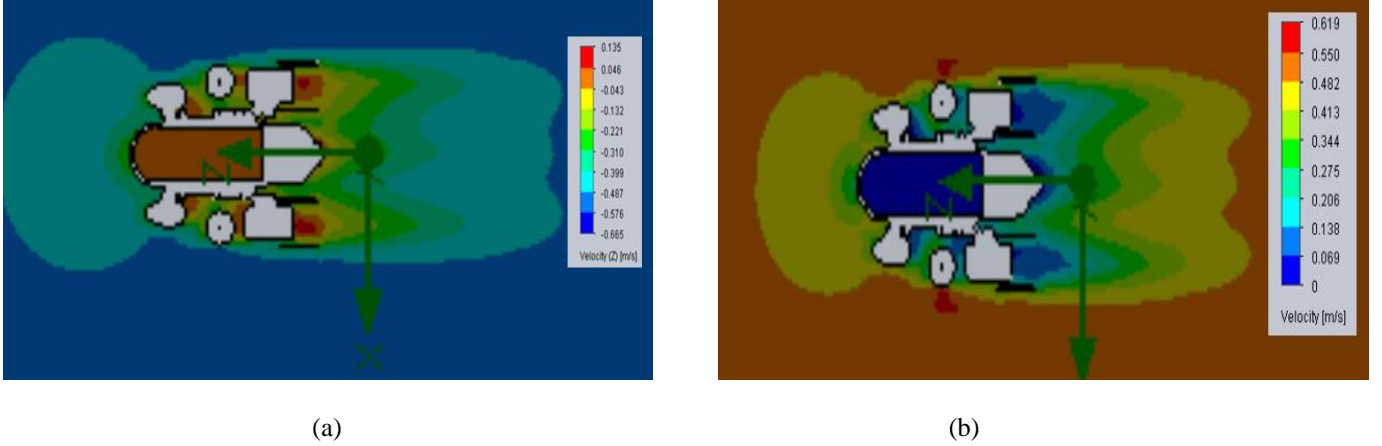


Şekil 7. Derinlik ve hızın fonksiyonu olarak kaldırma katsayısı ve kaldırma kuvveti

Sonuçlar dikkatli bir şekilde gözlemlendiğinde, yüzeye yakın kaldırma kuvvetinin yönünün ve büyüklüğünün, İSA'nın yüzeye yakın hareket etme hızına bağlı olduğu görülmektedir. Ayrıca, derinlik arttıkça, kaldırma katsayısının da arttığı, 1.5 - 2 m aralığında bu artışın azaldığı gözlenmiştir. Kaldırma kuvveti ise belli derinlikten sonra (yaklaşık 1.4 m) hıza bağlı olarak artmıştır. Derinlik 1 m'yi geçtikten sonra kaldırma katsayısında keskin bir değişim olduğu görülmektedir. Bu keskin değişimin, araç geometrisinin x-z düzleminde yeterince simetrik olmaması sonucu, dalış sırasında yatay eksen etrafında bir miktar dönme yapmasından

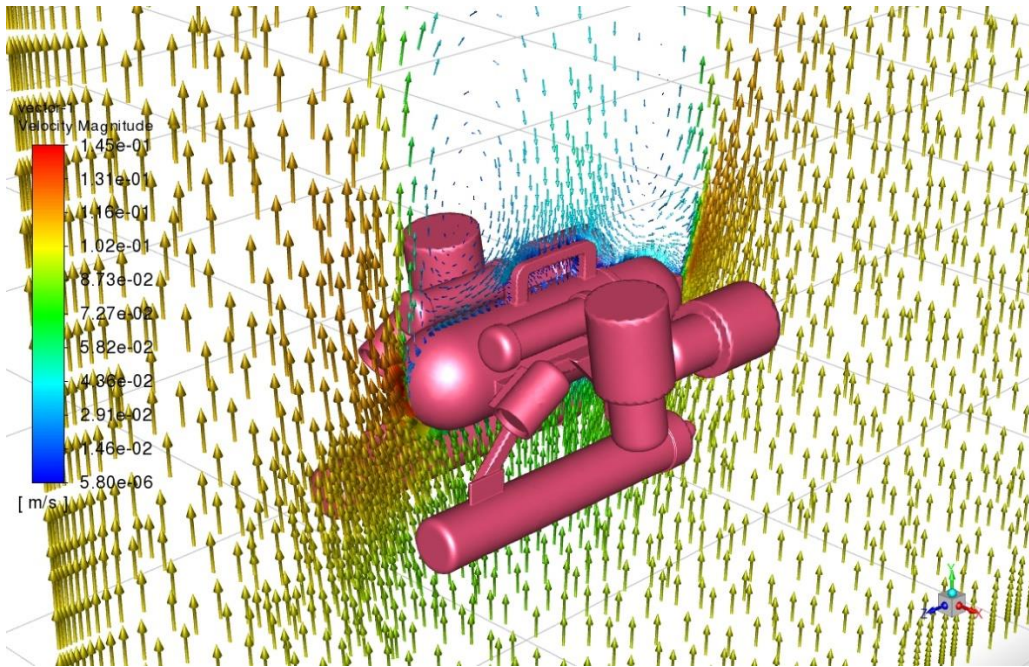
kaynaklandığı düşünülebilir. Deneysel çalışmalarla da gözlenmiştir ki, akış hızının yüksek olduğu durumlarda, kaldırma katsayısı derinlikle artmaktadır (Mansoorzadeh vd., 2014). Su yüzeyine yakinken kaldırma kuvvetinin yönü ve büyüklüğü, hızla bağlı olarak değişmektedir. Bu aynı zamanda İSA'nın gövde yapısının geometrisine ve simetriklik durumuna da bağlıdır.

Şekil 8'de, araç gövdesinin, 2 m ve 0.5 m derinliklerdeki hareketi sırasında analizler sonucu elde edilen hız dağılım profilleri görülmektedir. Akış hızı dağılımından da görüldüğü üzere, araç su yüzeyinden derine indikçe yüzey dalgalanmalarının etkisi azalmakta, basınçtan kaynaklı sürüklenme kuvveti artmaktadır. Gövde yüzeyindeki sürtünmeler artmakta ve hız değerleri düşmektedir. Bu da derin sulara hareket ederken C_d değerinin daha büyük olmasını açıklamaktadır. Araç gövdesinin ön kısmındaki hız değeri, 0.5 m derinlikte 0.348 m/s civarında iken, 2 m derinlikte bu değer 0.312 m/s civarındadır.



Şekil 8. İSA etrafındaki akışkan hız dağılımı (0.5 m/s hız ve (a) 2 m (b). 0.5 m derinlik için)

İSA'nın, dikey düzlemde 0.1 m/s akış hızı için dış akış simülasyonu sonucu elde edilen hız dağılımı şekil 9'da görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, akışkan sürtünmelerinin sebep olduğu dönme momenti, dönmeye sebep olmuş bu da aracın arka kısmında akış ayrılması oluşturmuştur. Ayrıca hızın düşük olması da akış ayrılmasına neden olmuş olabilir. araç yüzeyi üzerindeki sürtünme kuvveti, diğer analizlere göre düşük hız nedeniyle daha yüksektir. Bu nedenle gövde etrafında hız düşüşleri görülmektedir.

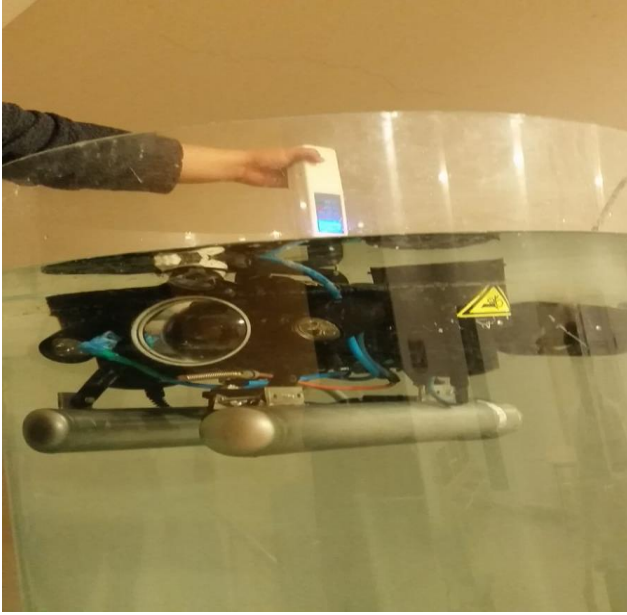


Şekil 9. Dikey hareket için İSA etrafındaki akışkan hız dağılımı (0.1 m/s)

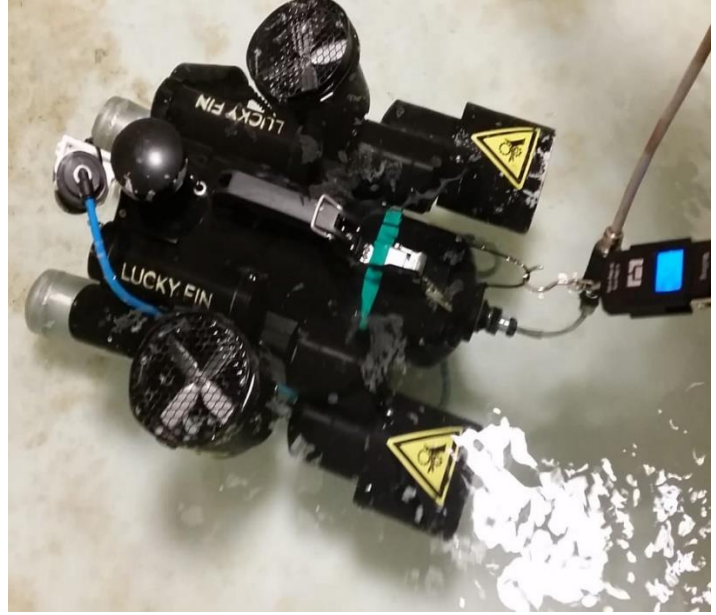
5. Deneysel Çalışmalar

4 serbestlik dereceli (yatay ve dikey eksenlerde doğrusal öteleme ve bu eksenler etrafında açılal dönme) otonom sualtı aracının, Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünde bulunan sualtı aracı deney platformlarında bazı testleri

gerçeklenmiştir. Yatay ekseninde doğrusal öteleme hareketi testi için kullanılan deney platformu, 2.5 m çapa ve 1.5 m derinliğe sahip dairesel bir havuzdur. Dikey ekseninde batma testi için kullanılan platform ise yüksekliği 2 m, çapı 80 cm olan bir silindirdir (şekil 10 a ve b).



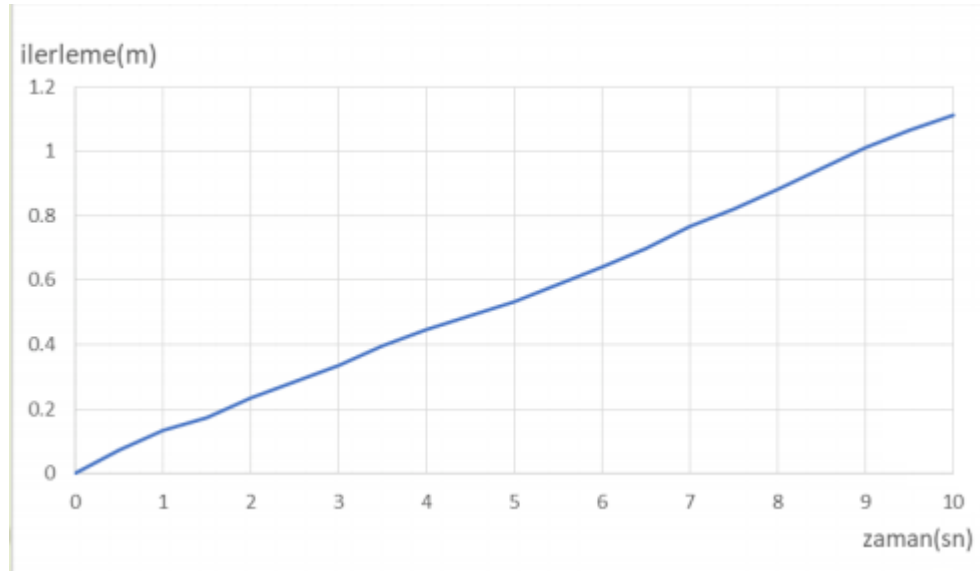
(a)



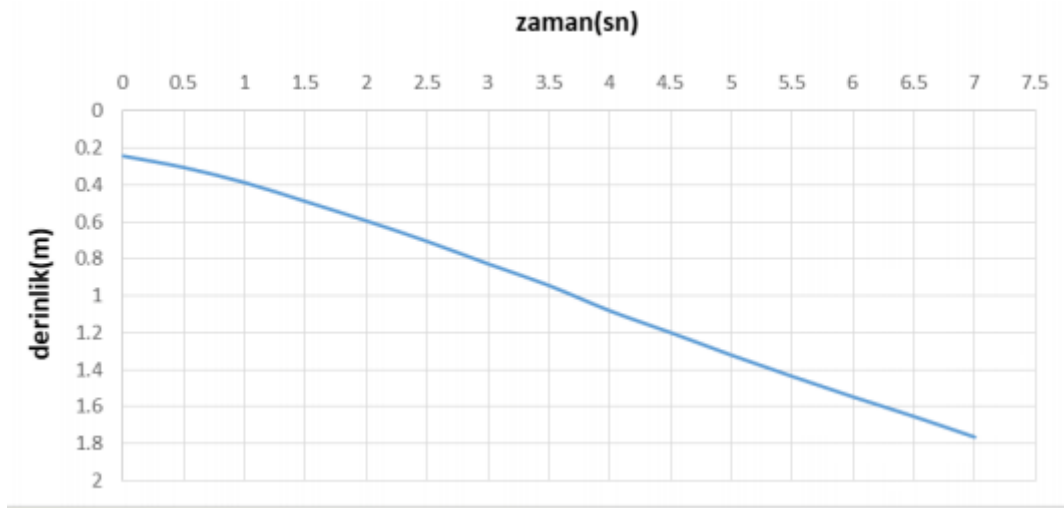
(b)

Şekil 10. Testler için kullanılan deney platformları **a)** silindirik platform **b),** dairesel platform

Test çalışmaları sırasında araç, 0.5 m ve 1 m derinliklere daldularak yaklaşık 0.1 m/s hız değerinde yatay ekseninde doğrusal öteleme hareketi yaptırılmıştır. Bu hareket sırasında yatay motorların itme kuvveti ile suyun sürtünme kuvveti arasındaki fark olan net kuvvetler, dijital dinamometre ile ölçülmüştür. Bu net kuvvet, yatay motorların itme kuvvetinden çıkartılarak sürtünme kuvvetleri belirlenmiştir. Bu değerler, sayısal hesaplamalar sonucu elde edilen kuvvet değerleri ile karşılaştırıldığında, HAD analizlerinin sonuçlarını doğrular niteliktedir (Tablo 5).



Şekil 11. İSA'nın tam PWM ileri geri öteleme hareketi deney verileri



Şekil 12. İSA'nın tam PWM aşağı yukarı öteleme hareketi deney verileri

Hem yatay hem de dikey hareketler için yol-zaman grafiklerinden (şekil 11 ve 12), hız yaklaşık olarak 0.1 m/s olarak elde edilmiştir. C_D ve C_L , deneysel ölçümlerden elde edilen sürtünme kuvvetleri kullanılarak eşitlik (3) ve (4)'e göre hesaplama yoluyla elde edilmiştir. İSA'nın, tam PWM çalışmada ulaşabildiği hız değeri yaklaşık 0.1 m/s olduğundan, karşılaştırmaların yapılabilmesi için bu akış hızında HAD analizleri tekrar yapılmıştır (0.5m ve 1m dalma derinlikleri için). 0.1m/s akış hızı için Reynolds sayısı yaklaşık olarak 350 civarındadır. Bu da akışın laminar olduğu anlamına gelmektedir. Akış analizleri yapılırken sadece laminar akış seçilmiştir. Diğer akış hızları, 0.5 m/s ve 1m/s için ise ($Re \approx 1700$ ve $Re \approx 3500$), laminar ve laminar + türbülanslı akış birlikte seçilmiştir. Diğer akış analizi parametreleri, önceki analizler ile aynıdır.

Sürüklenme kuvveti katsayısı (C_D) ve kaldırma kuvveti katsayısı (C_L)'nin sayısal analizler ve deneysel ölçümlerden elde edilen değerleri arasındaki fark, analizlerde kullanılan hesaplama alanının, deney platformlarından şekil ve boyut olarak farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Her ne kadar sayısal çözümlerde akış laminar olarak belirlenmiş olsa da deneysel ölçümler sırasında kısa mesafede duvara çarpıp dönen dalgaların hidrodinamik kuvvet ve momentler üzerinde bozucu etkileri olmuştur ve bu da sonuçlar üzerinde etkilidir. Bir diğer etken ise, motorlar çalışırken dönen pervanelerin, sayısal analizlerde göz ardı edilmiş olmasıdır.

Tablo 5. 0.5 ve 1 m derinlikler için deneylerden ve HAD analizlerinden elde edilen sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri katsayılarının karşılaştırılması (hız = 0.1 m/s)

Metod	C_D (0.5m)	C_L (0.5m)	C_D (1m)	C_L (1m)
HAD	0.3374	0.4617	0.3258	0.4114
Deneysel ölçümler	0.3502	0.5128	0.3401	0.4491
Error (%)	3.79	11.06	4.38	9.16

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, bir İSA'nın sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri ve bu kuvvetlere bağlı katsayıların derinliğe bağlı nasıl değiştiğini görmek amacıyla laminar ve laminar-türbülanslı geçiş akış analizleri yapılmıştır. Sayısal analizlerde, İSA'nın 1:1 ölçülerdeki modeli kullanılmıştır. Araç gövdesinin çalışma derinliği arttıkça yüzey etkileri azalmıştır. Simulasyonlar, su yüzeyinden itibaren 0.5, 1, 1.5, ve 2 m olmak üzere dört farklı derinlik için, 0.5 m/s ve 1 m/s akış hızlarında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, 0.5 m ve 1 m derinlikler için 0.1 m/s akış hızında HAD analizleri ve deney platformunda test ölçümleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sürüklenme ve kaldırma katsayıları, sayısal çözümlerden elde edilen değerlerle karşılaştırıldığında tatmin edici düzeyde yakın bulunmuştur. Sonuçlar, sürtünme katsayıları üzerindeki yüzey etkisinin hem İSA hızının hem de batma derinliğinin bir fonksiyonu olduğunu ortaya koymuştur. Basınç direnci ve dolayısıyla dalga oluşturma direncine bağlı toplam sürüklenme katsayısının, daha yüksek derinliklerde elde edilenlere göre serbest yüzeyin yakınında daha küçük olduğu gösterilmiştir. Akış hızı düştükçe sürüklenme katsayıları daha yüksek çıkmıştır. Örneğin, İSA 1 m/s'lik hızda, 2 m derinlikte hareket ederken kaydedilen sürüklenme katsayısı 0.255 iken, 0.5 m/s akış hızı ile aynı derinlikte hareketi sırasında bu değer 0.273'tür.

Analiz sonuçlarına gör (şekil 8 ve 9), toplam sürüklenme kuvveti yüzeye yakın hareket halinde, yüzey dalgalanmaları ve akışkan viskozitesi kaynaklı iken daha derindeki hareketlerde basınç kaynaklıdır. Dış akış esnasında enerji tüketimini azaltmak için iki tür akış kontrol yöntemi uygulanabilir. Bunlardan biri, aracın aerodinamik yapısında iyileştirme yapmak, diğeri ise cisim yapısında herhangi bir değişiklik olmaksızın sistemde enerji kullanılarak cisim etrafındaki akışın kontrol edildiği yöntemdir. Bu iki yöntemden hangisinin kullanılacağına yapılacak HAD analizleri ve fizibilite hesaplarıyla karar verilebilir.

Bir İSA'nın kararlı hareket edebilmesi için kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri gibi hidrodinamik etkileri karşılayabilecek itme kuvvetini motorları aracılığı ile sağlaması gerekmektedir. Optimum güç tüketiminin olması için aracın hangi derinlik ve hızda çalıştırılacağı önemlidir ve bu çalışma bu soruya yanıt bulabilmek ve gelecek çalışmalara ışık tutabilmek amacıyla yapılmıştır. Sayısal sonuçların doğruluğunun, deneysel ölçümlerle kanıtlanması sonucu, karmaşık geometrik yapıya sahip İSA'nın hidrodinamik model parametrelerinin belirlenmesinde HAD analizlerinden yararlanılabileceği sonucuna varılmıştır. Bazı özel görevler için tasarlanan İSA'lar, geometrik olarak torpido veya silindirik şekle sahip olmayabilirler ve düşük hızlarda çalışan İSA'ların akım çizgili formda tasarlanmaları zorunlu değildir.

Referanslar

Apaçoğlu, B. (2010), Silindir Üzerindeki Laminer ve Türbülanslı Akışın Kontrollü ve Kontrolsüz HAD Analizleri, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, <http://earsiv.etu.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/20.500.11851/298/TZ00102.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Du X., Wang H., Hao C., Li X., Analysis of hydrodynamic characteristics of unmanned underwater vehicle moving close to the sea bottom, *Defence Technology*, c. 10, sy 1, ss. 76-81, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.dt.2014.01.007.

Javanmard E. A Computational Fluid Dynamics Investigation on the Drag Coefficient Measurement of an AUV in a Towing Tank, *JAFM*, c. 12, sy 3, ss. 947-959, May. 2019, doi: 10.29252/jafm.12.03.29525.

Karasu İ., Silindir Etrafındaki Kararsız Akışın Farklı Türbülans Modelleri ile Sayısal Olarak İncelenmesi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 6, sy 1, Haz. 2019, doi: 10.35193/bseufbd.560925

Kaya F., Karagöz İ., Investigation into the Suitability of Turbulence Models in Swirling Flows, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 12, Sayı 1 s. 12, 2007.

Malavasi S. Guadagnini A. Interactions between a rectangular cylinder and a free-surface flow, *Journal of Fluids and Structures*, **23**(8), 1137-1148, 2007.

Mansoorzadeh Sh., Javanmard E., An investigation of free surface effects on drag and lift coefficients of an autonomous underwater vehicle (AUV) using computational and experimental fluid dynamics methods, *Journal of Fluids and Structures*, c. 51, ss. 161-171, Kas. 2014, doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2014.09.001.

Mitra A., Panda J. P., Warrior H. V., Experimental and numerical investigation of the hydrodynamic characteristics of Autonomous Underwater Vehicles over sea-beds with complex topography, *arXiv:1904.13305 [physics]*, Nis. 2019, Erişim: Şub. 14, 2021. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://arxiv.org/abs/1904.13305>.

Novais M., The Effect of Depth on Drag During the Streamlined Glide: A Three-Dimensional CFD Analysis, *Journal of Human Kinetics*, c. 33, sy 1, ss. 55-62, Haz. 2012, doi: 10.2478/v10078-012-0044-2.

Öztop H. F., Dış Akışlar Kaldırma ve Direnç, Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Ders notu, 2014, Erişim: <http://hakanfoztop.com/wp-content/uploads/2019/02/11-D%C4%B1%C5%9F-ak%C4%B1%C5%9F-lar-diren%C3%A7-ve-kald%C4%B1rma.pdf>

Salari M. Rava A. Numerical investigation of hydrodynamic flow over an AUV moving in the water-surface vicinity considering the laminar-turbulent transition, *J. Marine. Sci. Appl.*, c. 16, sy 3, ss. 298-304, Eyl. 2017, doi: 10.1007/s11804-017-1422-x

Shao WY. Zhang YP. Zhu DZ. Zhang TQ. Drag force on a free surface-piercing yawed circular cylinder in steady flow, *Journal of Fluids and Structures*, 43, 145-163, 2013.

Vorus WS, Paulling JR., *The Principles of Naval Architecture*, 2010 Series.

Yakut M., Yılmaz S., İnce S., Otcu M., Aygün E., Derinlik ve Yön Kontrol Uygulamaları için Sualtı Aracı Tasarımı, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım Ve Teknoloji GU J Sci Part:C* 3(1):343-355, 2015

Yang R., Clement B., Mansour A., Li M., Wu N., Modeling of a Complex-Shaped Underwater Vehicle for Robust Control Scheme, *J Intell Robot Syst*, c. 80, sy 3-4, ss. 491-506, Ara. 2015, doi: 10.1007/s10846-015-0186-2.

Zhang H., Xu Y., Cai H., Using CFD software to calculate hydrodynamic coefficients, *J. Marine. Sci. Appl.*, c. 9, sy 2, ss. 149-155, Haz. 2010, doi: 10.1007/s11804-010-9009-9.

Zhao M., Cheng L. Zhou T. Direct numerical simulation of three-dimensional flow past a yawed circular cylinder of infinite length. *Journal of Fluids and Structures*, 25(5), 831-847, 2009.



Correlation Between Surface, Thermal, Mechanical and Morphological Properties of Polylactic Acid/Polypropylene and Polylactic Acid/Polyamide 6 Blends

Sibel Tuna ^{1,2} , Meral Akkoyun ^{*1} 

¹ Bursa Technical University, Polymer Materials Engineering, 16310, Bursa, TURKEY

² Bursa Technical University, Central Research Laboratory, 16310, Bursa, TURKEY

Başvuru/Received: 09/06/2021

Kabul / Accepted: 23/07/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Abstract

In the automotive sector, which is one of the sectors where polymers are mostly used, their behaviour and compatibility in secondary processes such as painting and coating applications are important in the preference of polymers according to their usage areas as well as mechanical and thermal properties. In this context, it is known that surface wettability of a polymer material is of great importance for different application areas and it can be stated that wetting and non-wetting behaviours play an important role in the selection of polymers and their industrial applications. In this study, the contact angle properties of polypropylene (PP) and polyamide 6 (PA6), which are the most used polymers in the automotive sector and their polymer blends prepared by using polylactic acid (PLA) were examined. When PLA/PP and PLA/PA6 mixtures were compared, it was observed that there were significant differences in contact angle measurements and these properties detected in water contact angle measurements were attributed to changes in chemical structures, functional groups and morphology of related polymers. Surface analysis was supported by thermal, mechanical and morphological analysis and differences in static contact angle measurement results were explained.

Key Words

“Bio-based polymer blends, Wettability, Thermal properties, Mechanical properties, Morphological properties”

1. Introduction

PP and PA6 are well-known engineering plastics in automotive industry with interesting properties. PP is one of the lightest thermoplastics among all automotive plastics with excellent properties such as good processability, high chemical resistance, good stiffness, good impact resistance and low cost. Bumpers, dashboards, door panels, grills, cable insulators are among the plastic parts where PP is mostly used in automobiles. PA6 is also a well-known polymer with its good mechanical properties and wear resistance and this polymer is frequently used when high mechanical strength, good abrasion, rigid and stable material is required. PA6 is mostly used in door handles and support parts due to its mechanical strength and wear resistance and under the engine hood due to its resistance to oil (Pradeep et al. 2017, Mallick 2021). Although their excellent performance and processability capabilities make engineering plastics a frequently preferred option, the vast majority of polymers which are produced from fossil fuels and treated with secondary processes such as painting, coating and plating, become waste in the environment where they do not degrade after the end of their service life and similar processes are repeated in terms of both environmental damage and consumption of limited fossil fuel resources in each new raw material production process. This vicious cycle has caused that given rise to the investigations of environmental, bio-based and biodegradable polymers from renewable sources in recent years. Innovative and environmentally friendly production approaches, reducing fuel consumption of products and CO₂ emissions are among the most important issues of recent years without compromising the performance of engineering plastics that have been used for years. Precisely at this point biopolymers have started to be considered as an alternative to petroleum-based polymers in long-term automotive applications due to their physical and mechanical behaviours, which have been better understood in recent years (Karimpour-Motlagh et al. 2020).

PLA is an aliphatic polyester which has been investigated in many applications in recent years with high tensile strength, high hardness and easy processability and has comparable properties with conventional petroleum-based polymers. In addition to its advantages, PLA has a number of limiting properties such as high cost, low toughness, low thermal resistance and low crystallization rate. However, it has been found in the studies that these limitations can be solved by preparing mixtures of different polymers, reinforcing fibers, micro and/or nanofillers and selected additives (Nampoothiri et al. 2010, Auras et al. 2003, Kawashima et al. 2005). Blending PLA with engineering plastics such as PP and PA6 has been considered to be a suitable solution to develop a new class of materials with improved mechanical properties and hydrolysis resistance, lower price and high degradability (Ployetchara et al. 2014, Reddy et al. 2008, Ebadi-Dehaghani et al. 2015).

While blending polymers is a simple technique used to enhance the poor properties of pure polymers, in some cases even more advanced properties can be obtained than the properties of pure polymers. There might be also situations where the obtained blends can be a solution to some needs in the current processes. It has been revealed that the use of PP/PA6 blends, which are among the most used polymers in the automotive industry for years, together with PLA brings out advanced features in surface properties as well as the thermal and mechanical properties, and the usage processes of these polymers can be affected by this situation.

The contact angle (CA) is a characterization of the surface properties expressed as wetting at a solid/liquid interface of polymers. Wetting is the interaction between a liquid and a solid, with the detection of a contact angle as a result of spreading of a liquid over a solid surface. Wetting and non-wetting properties have been among the outstanding studies in nature for years and the effects of this situation in industrial applications has started to be investigated in recent years. A great deal of industrial applications, such as textile finishing, plating, coating, printing processes, and microfluidic applications affect the wetting of solids by liquids (Grundke et al. 2015). To the best of our knowledge no studies exist concerning the surface properties examination of PLA/PP and PLA/PA6 polymer blends.

For a complete wetting, the equilibrium contact angle between a liquid and a solid surface is zero with the formation of a thin film by the liquid on the solid surface. When the contact angle value is greater than 90° the solid surface is called as hydrophobic whereas the solid surface is considered as hydrophilic when the contact angle is less than 90° (Figure 1). Whether the polymers are hydrophobic or hydrophilic is important for the finishing processes to be applied after their production. Preparing the polymers for the finishing process by blending without any intermediate process will create an advantage in terms of both time and cost.

In this work PLA/PP and PLA/PA6 blends with different content were prepared in order to observe changes in contact angle values. Thermal, mechanical and morphological analyses were performed to explain the results.

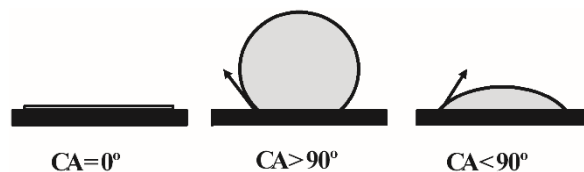


Figure 1. Different wetting situations of a solid surface.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

Polypropylene (BUPLEN) was supplied from Lukoil Petrochemical Company, Russia. The density and melt flow index of PP are 0.91 g/cm³ and 7 g/10 min (230°C, 2.16 kg), respectively. Polyamide 6 (Domamid 27) was provided from Ultra Polymers, Germany. The density of PA6 is 1.14 g/cm³. Polylactic acid (Luminy L175) was purchased from Total Corbion, China. The density and melt flow index of PLA are 1.24 g/cm³ and 8 g/10 min (210°C, 2.16 kg), respectively. All materials were used as received.

2.2. Preparation of Polymer Blends

PLA/PP and PLA/PA6 mixtures were prepared with a Polmak Plastik twin-screw extruder (co-rotating, 18 mm). The temperatures were set at 90-190-195-200-205-210-210-210-210°C for PLA/PP blends and 90-215-220-225-230-235-235-235-235°C for PLA/PA6 blends, between the feeding part and the exit die. Before the extruder processing, PLA, PP and PA6 granules were dried in an oven at 80°C for 2 hours to remove moisture content. Then, dried PLA, PP and PA6 granules were premixed according to the formulation ratios given in Table 1 and fed into a hopper for extrusion process.

Table 1. Formulations of PLA/PP and PLA/PA6 polymer blends

Samples	PLA (wt.%)	PP (wt.%)	PA6 (wt.%)
Neat PLA	100	-	-
Neat PP	-	100	-
Neat PA6	-	-	100
PLA/PP (20:80)	20	80	-
PLA/PP (30:70)	30	70	-
PLA/PP (40:60)	40	60	-
PLA/PP (70:30)	70	30	-
PLA/PA6 (20:80)	20	-	80
PLA/PA6 (30:70)	30	-	70
PLA/PA6 (40:60)	40	-	60
PLA/PA6 (70:30)	70	-	30

Homogenously mixed blends were shaped in a filament form through the die, cooled in a water bath and cut into granules. Then, for each composition, the obtained pellets were dried in an oven at 80°C for 2 hours to remove moisture content and were molded to obtain 250 x 250 x 4 mm plates using a CARVER/12–12 compression molding machine under a pressure of 4 bars and at 200°C and 225°C for PLA/PP and PLA/PA6 blends, respectively.

2.3. Characterization Methods

2.3.1. FT-IR analysis

Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy measurements were performed using a Thermoscientific/Nicolet-IS50 spectrophotometer. The interactions between the polymers were evaluated at a wavelength range of 4000-600 cm⁻¹.

2.3.2. Mechanical analysis

Tensile test measurements of polymer blends were performed at room temperature using a universal testing machine (Shimadzu/AGS-X) and Young's modulus, tensile strength, and elongation at break parameters were examined according to ASTM D638. Crosshead speed and load cell were fixed at 5 mm/min and 10 kN, respectively. The average values of at least five measurements were reported.

2.3.3. Thermal analysis

These measurements were carried out using a differential scanning calorimeter (TA Instrument/DSC25). For the purpose of determination of glass transition temperature (T_g), melting temperature (T_m) and cold crystallization temperature (T_c), heat-cool-heat method was applied. The specimens were heated from 20°C to 250°C at 5°C/min and held at that temperature for 2 minutes. Then, the samples were cooled to 20°C at a cooling rate of 5°C/min and heated again to 250°C at 5°C/min under constant nitrogen flow.

2.3.4. Morphological analysis

The morphology of polymer blends was evaluated using a Carl Zeiss (Gemini 300) scanning electron microscopy (SEM) at 5 kV and different magnification rates. Prior to imaging, the blends were all coated with 15 nm Au/Pd alloy (Leica/ACE600) to avoid charging artefacts by ion sputtering method device.

2.3.5. Surface properties analysis

Static water contact angles of polymer blends were detected using a Biolin Scientific (ThetaFlex) optical tensiometer and the sessile drop technique was applied. 5 μL of distilled water droplet was introduced on the sample surface through an automatic pipet. Then, photographs were taken after stabilization of the drop. Measurements were performed on three different surface areas and average contact angle values were calculated.

3. Results and Discussions

3.1. Chemical Structure of Polymer Blends

The FT-IR spectrum of pure polymers (PLA, PP and PA6) and polymer blends (PLA/PP and PLA/PA6) were shown in Figure 2. The characteristic peaks of neat PP at 2950-2838 cm^{-1} , 1455-1453 cm^{-1} and 1376 cm^{-1} were connected to C-H stretching, C-H bending and $-\text{CH}_3$ bending, respectively (as seen in Figure 2(a)). When the FT-IR spectrum of the neat PLA is evaluated, the C=O stretching peak at the wavelength 1750 cm^{-1} , the symmetrical C-O-C stretching peak at the wavelength 1180 cm^{-1} and the asymmetric CH_3 peak at the wavelength 1080 cm^{-1} can be observed. Figure 2(a) also indicated the PLA and PP interactions and the change in the peak intensity around the wavelengths 1750 cm^{-1} , 1180 cm^{-1} and 1080 cm^{-1} significantly.

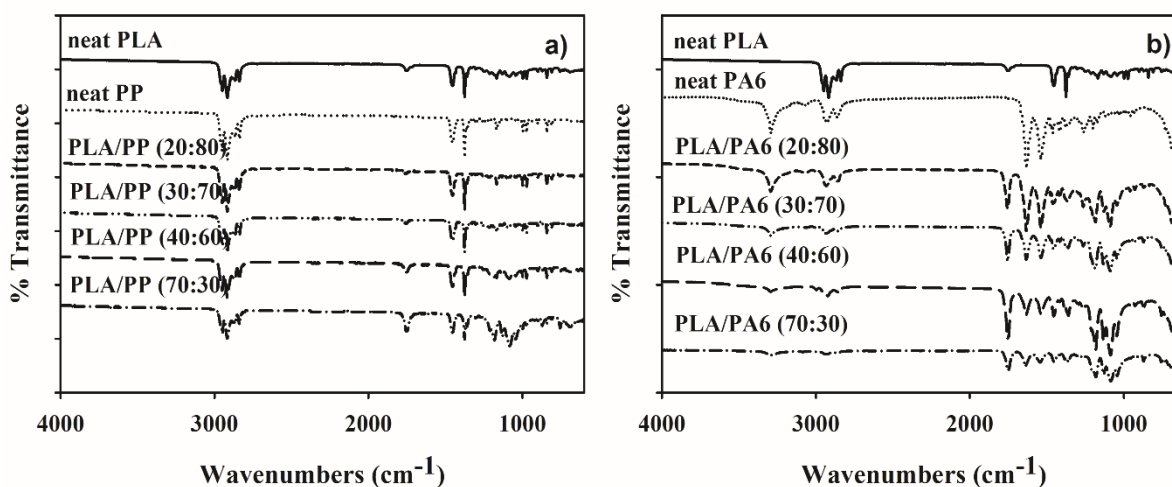


Figure 2. FT-IR spectra of a) PLA/PP and b) PLA/PA6 polymer blends.

On the other hand, Figure 2(b) represents the FT-IR spectrum of neat PLA, neat PA6 and PLA/PA6 polymer blends. The characteristic peaks of neat PA6 at 3300 cm^{-1} , 2931-2865 cm^{-1} and 1632 cm^{-1} were connected to N-H stretching, C-H stretching and C=O stretching, respectively. The specific transmittance bands of PLA/PA6 polymer blends were observed around the wavelengths 3300 cm^{-1} and 1757 cm^{-1} related to N-H stretching peak of the amide group of PA6 and C=O stretching peak of the carbonyl group of PLA, respectively (Figure 3). It can be also stated that the shift observed in the stretching peak of the carbonyl group in polymer blends is related to the hydrogen bond interactions occurring between PLA and PA6 molecules (Feng and Ye 2010).

It can be also observed that the intensity of the C=O stretching in the 1750 cm^{-1} band of the PLA, the C-O-C stretching in the 1180 cm^{-1} band and the asymmetric CH_3 peaks in the 1080 cm^{-1} band vary depending on the PLA ratio in the PLA/PA6 polymer blends. These FT-IR spectrums reveal that PLA, PP and PA6 polymers continue to show their own characteristic properties in polymer blends and do not form a very compatible structure in the mixtures (Pivsa-Art et al. 2016).

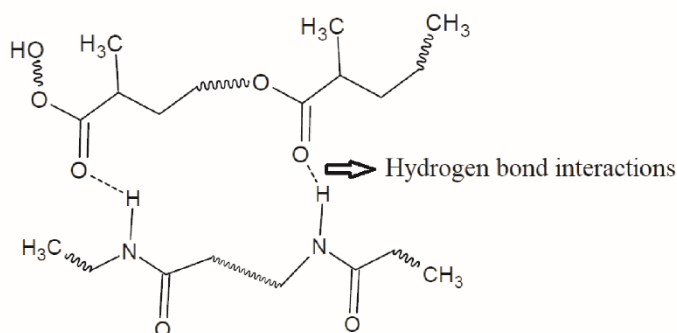


Figure 3. Schematic representation of hydrogen bond interaction between PLA and PA6 polymers.

3.2. Mechanical Properties of Polymer Blends

Table 2 displays the effect of PLA content on the mechanical properties of PLA/PP and PLA/PA6 polymer blends. It can be observed that as PP ratio increases and PLA ratio decreases in polymer blends, the elastic modulus and tensile strength values decrease. It can be concluded that the structure of the polymer blend passes from a ductile form to a brittle one. From the tensile test results of PLA/PA6 blends, it can be observed that as the PLA ratio rises and the PA6 ratio decreases in the polymer blends, the elastic modulus increases while a depletion of the tensile strength and elongation at break values is obtained. Among PLA/PA6 polymer blends for which mechanical properties are weakened by increasing PLA ratio, it can be stated that the formulation with the lowest PLA content has the highest tensile strength and elongation at break values. All these results are in correlation with the literature (Feng and Ye 2010).

Table 2. Tensile test results of PLA/PP and PLA/PA6 polymer blends

Samples	Elastic Modulus (N/mm ²)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)
Neat PLA	2714.9 ± 40.869	31.3 ± 1.29	1.40 ± 0.06
Neat PP	1511.5 ± 15.464	33.3 ± 0.78	7.42 ± 0.01
Neat PA6	1111.6 ± 16.674	25.7 ± 0.38	6.15 ± 0.01
PLA/PP (20:80)	1690.0 ± 35.169	18.1 ± 2.17	1.32 ± 0.23
PLA/PP (30:70)	1926.1 ± 30.285	25.2 ± 0.34	2.51 ± 0.53
PLA/PP (40:60)	1928.4 ± 25.018	21.2 ± 0.67	1.41 ± 0.13
PLA/PP (70:30)	2330.8 ± 54.079	26.8 ± 4.91	1.35 ± 0.22
PLA/PA6 (20:80)	1164.0 ± 42.263	30.7 ± 5.70	6.97 ± 1.84
PLA/PA6 (30:70)	1306.5 ± 49.853	22.7 ± 1.92	2.71 ± 0.79
PLA/PA6 (40:60)	1109.3 ± 46.779	18.8 ± 5.50	2.18 ± 0.72
PLA/PA6 (70:30)	1759.9 ± 47.644	16.8 ± 3.05	1.10 ± 0.28

3.3. Thermal Properties of Polymer Blends

Thermal properties of PLA/PP and PLA/PA6 polymer blends were evaluated through the glass transition temperatures (T_g) (1st heating), melting temperatures (T_{m1} and T_{m2}) (1st and 2nd heating) and crystallization temperatures (T_c) (1st cooling) detected from DSC thermograms. All results were gathered in Figure 4-5 and Table 3.

As shown in Table 3 and Figure 4, it is observed that there is no significant change for T_g and T_m of PLA/PP polymer blends with increasing the PLA content. This situation shows that the polymer ratios of semi-crystalline PLA and semi-crystalline PP do not affect the crystal structure formation in blends consisting of incompatible polymers as observed in the literature (Ployetchara et al. 2014). Therefore, T_c values of the blends are similar to those of the neat components.

Figure 5 and Table 3 displays thermal transitions of PLA/PA6 polymer blends and it can be seen that T_g values are similar to that of neat PLA and PA6 polymers. When the melting peaks that occur during the first and second heating in DSC thermograms are evaluated, it can be observed that a secondary shoulder melting peak is formed especially in the case of the second heating. Such a result is probably due to the interactions of the semi-crystalline structure of PLA with the PA6 (Di et al. 2005, Stoclet et al. 2011, He et al. 2008). Accordingly, it can be stated that the presence of α -form pseudo-orthorhombic crystal structures which display melting behaviour at high temperatures and β -form orthorhombic crystal structures displaying melting behaviour at lower temperatures cause this shouldering in the melting peaks of PLA (Pan and Inoue 2009).

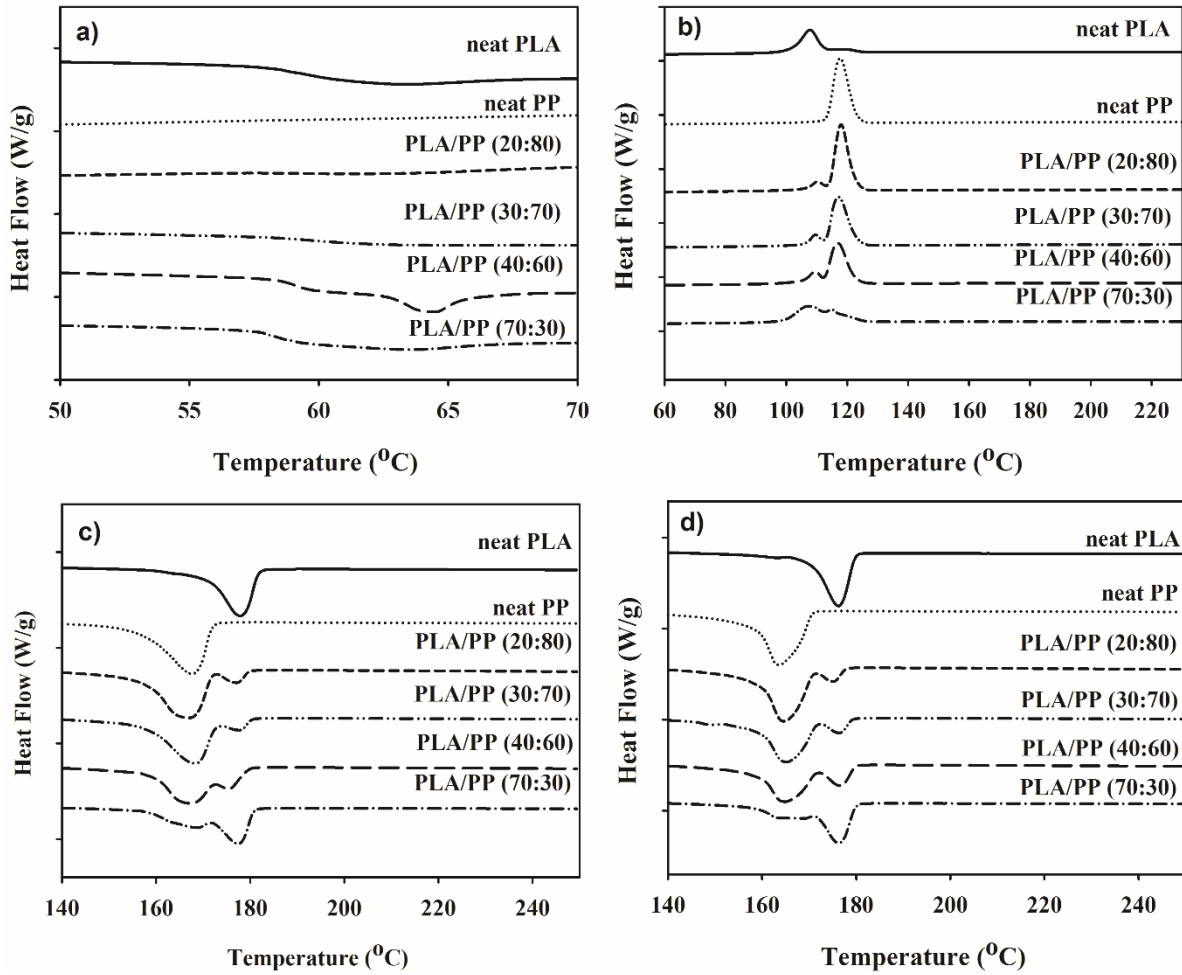


Figure 4. DSC thermograms of PLA/PP blends (a) glass transition (b) cold crystallization (c) first melting transition and (d) second melting transition

On the other hand, the crystallization peaks of PLA/PA6 polymer blends show that, the peak at 190°C caused by the crystallization of the PA6 polymer can be clearly seen, while, the crystallization peak of PLA cannot be observed clearly. By increasing PLA ratio there is another exothermic peak around 90°C that can be seen in DSC thermograms.

Considering that the crystallization temperature of PLA in its neat form is around 107°C, it can be stated that this decrease is caused by hydrogen bonds interactions formed between the amide groups (N-H) of PA6 and the carbonyl groups (C=O) of the PLA (Khankruea et al. 2014).

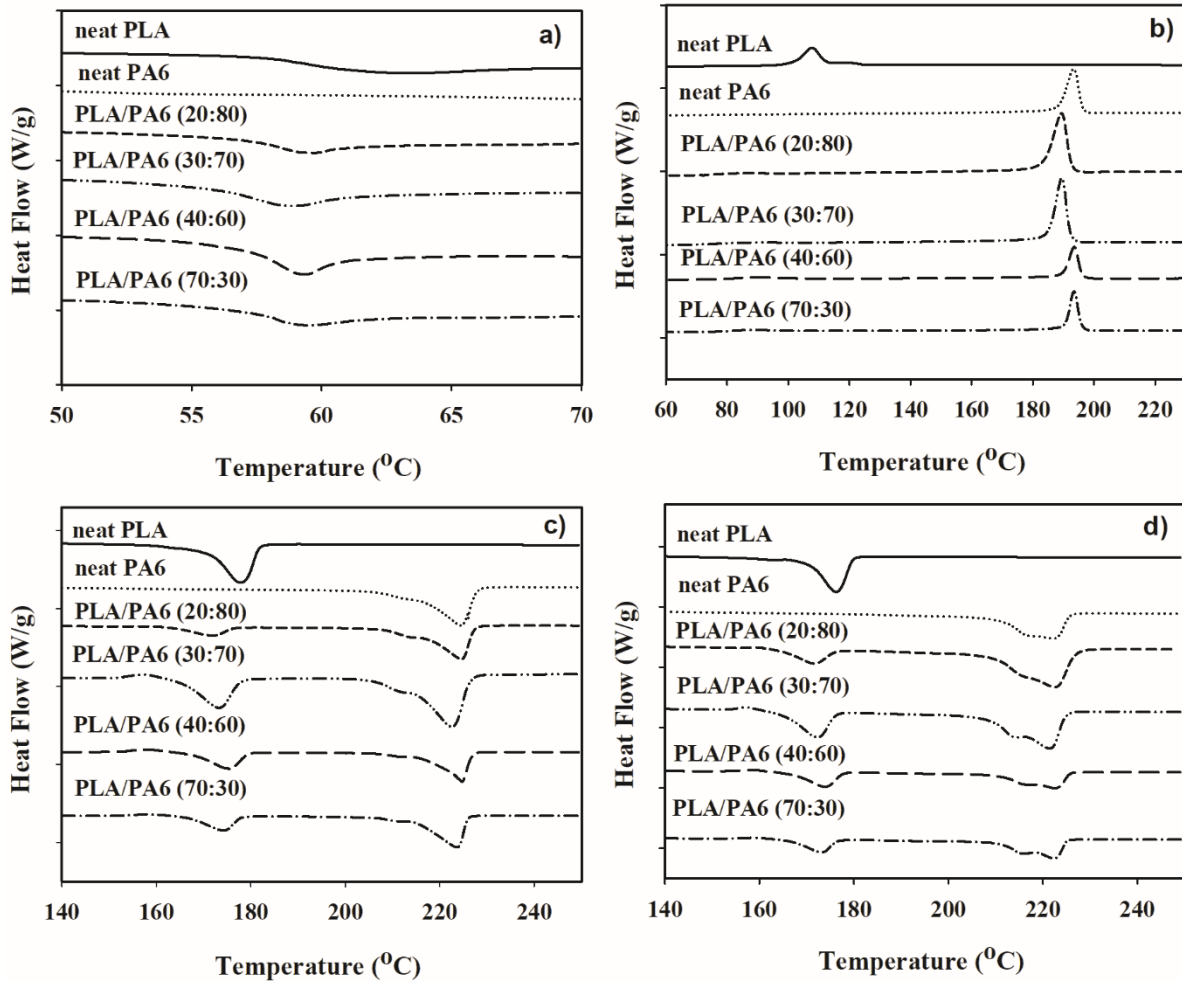


Figure 5. DSC thermograms of PLA/PA6 blends (a) glass transition (b) cold crystallization (c) first melting transition and d) second melting transition

3.4. Morphology of Polymer Blends

The morphology of polymer blends can vary according to several parameters such as the polymer ratios in the mixture, the elasticity and compatibility of the phases and the viscosity ratios. Figure 6 shows SEM images of PLA/PP and PLA/PA6 polymer blends.

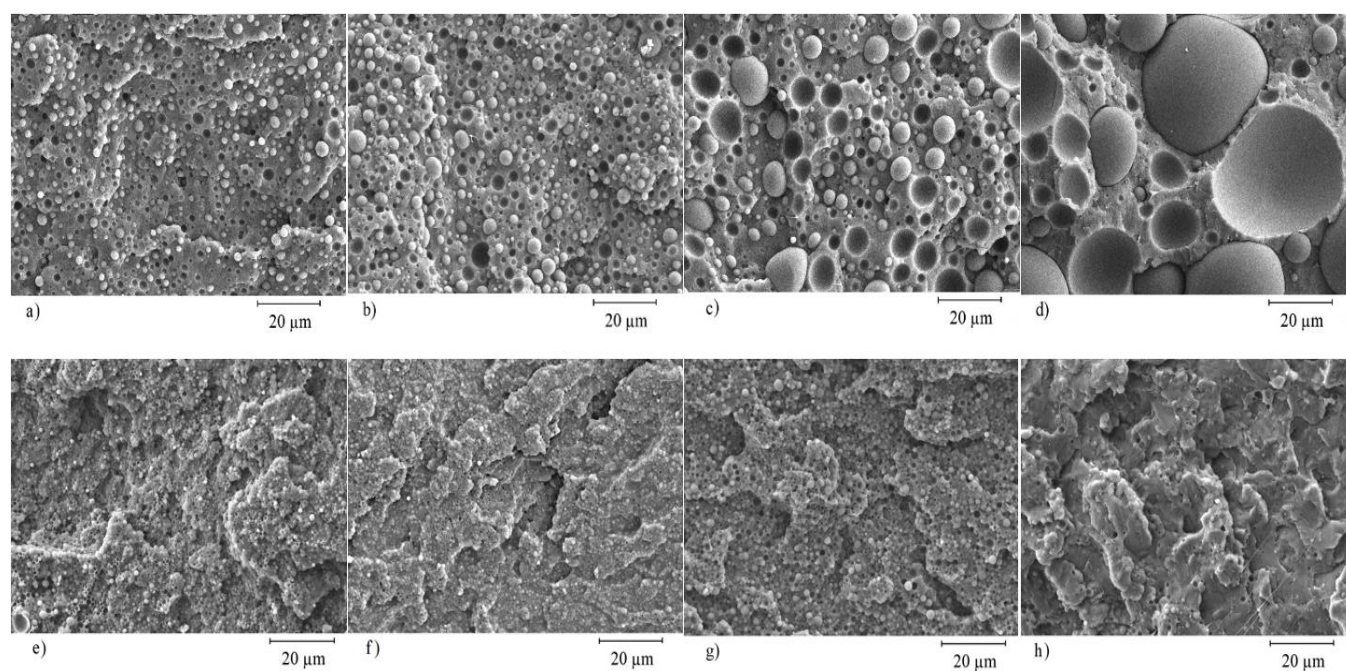
From this Figure 6, in the case of PLA/PP compositions, due to the distinct viscosities of polymers ($\eta_{PP}/\eta_{PLA} > 1$) and using these polymers in different ratios, a droplet-matrix morphology can be observed. In this sense, the polymer in lower amount in the blend is dispersed by forming spherical droplets in the polymer used at higher rates (Hamad et al. 2018, Sui et al. 2018, Bhasney et al. 2020). On the other hand, from SEM images of PLA/PA6 polymer mixtures, the small dimensions of polymer spheres observed in the structure and the homogeneous distribution in the matrix can be interpreted as the compatibility between PLA and PA6 polymers, and thus the low interface energy. This situation can be explained by the hydrogen bond interactions expected to form between the amide groups (N-H) of PA6 and the carbonyl groups (C=O) of PLA (Stoclet et al. 2011).

Table 3. Thermal analysis results of neat polymers (PLA, PP and PA6) and polymer blends (PLA/PP and PLA/PA6)

Samples	Glass Transition Temperature	Melting Temperature		Melting Temperature		Crystallization Temperature	
	Tg (°C)	Tm ₁ (°C)		Tm ₂ (°C)		1 st cooling	
	1 st heating	1 st heating	2 nd heating	1 st heating	2 nd heating	Tc ₁ (°C)	Tc ₂ (°C)
Neat PLA	59.22	177.9	176.2	-	-	107.7	-
Neat PP	-	-	-	167.9	163.6	-	117.6
Neat PA6	-	224.6	222.4	-	-	193.3	-

Table 3 (cont.). Thermal analysis results of neat polymers (PLA, PP and PA6) and polymer blends (PLA/PP and PLA/PA6)

Samples	Glass Transition Temperature	Melting Temperature		Melting Temperature		Crystallization Temperature	
	T _g (°C)	T _{m1} (°C)		T _{m2} (°C)		1 st cooling	
	1 st heating	1 st heating	2 nd heating	1 st heating	2 nd heating	T _{c1} (°C)	T _{c2} (°C)
PLA/PP (20:80)	59.53	177.2	175.2	167.1	164.7	110.2	118.0
PLA/PP (30:70)	60.07	177.7	176.5	168.4	165.2	109.5	117.0
PLA/PP (40:60)	60.19	175.6	176.7	167.6	164.8	109.4	116.8
PLA/PP (70:30)	58.54	177.6	176.4	169.0	170.4	107.0	114.7
PLA/PA6 (20:80)	57.74	171.9	171.5	224.6	222.5	-	193.6
PLA/PA6 (30:70)	58.89	173.3	172.2	222.6	221.5	-	189.4
PLA/PA6 (40:60)	57.98	175.2	173.8	222.7	222.7	-	193.6
PLA/PA6 (70:30)	58.12	174.3	173.2	223.8	222.5	-	193.4

**Figure 6.** SEM images of a) PLA/PP (20:80), b) PLA/PP (30:70), c) PLA/PP (40:60), d) PLA/PP (70:30), e) PLA/PA6 (20:80), f) PLA/PA6 (30:70), g) PLA/PA6 (40:60) and h) PLA/PA6 (70:30) obtained at a magnification of $\times 1000$

3.5. Surface Properties of Polymer Blends

Figure 7- 8 and Table 4 present the contact angle analysis results of neat polymers (PLA, PP and PA6) and polymer blends (PLA/PP and PLA/PA6). According to these results, it can be clearly seen that the contact angle value of the neat PP is higher than the contact angle value of the neat PLA. In other words, it can be stated that PP is more hydrophobic than PLA. As a result, depending on the polymer ratio used in the PLA/PP polymer blends, it can be observed that there are expected differences between contact angle values of these polymer blends. While no major differences were detected in the contact angle values of PLA/PP polymer blends, it can be seen that the contact angle values of PLA/PA6 blends significantly decreased compared to the neat PLA and PA6 polymer. This decrease in the contact angle values of PLA/PA6 polymer blends is thought to increase the hydrophilic properties of the structures due to the expected hydrogen bond interactions between the amide groups (N-H) in the PA6 and the carbonyl groups (C=O) in the PLA.

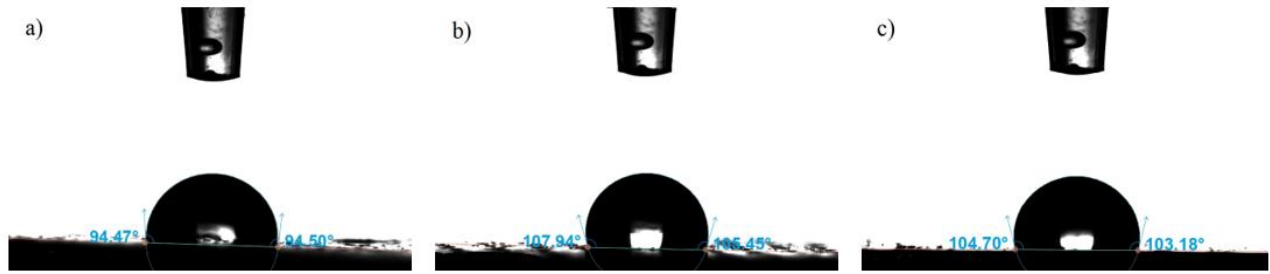


Figure 7. Contact angle images of a) neat PLA, b) neat PP and c) neat PA6

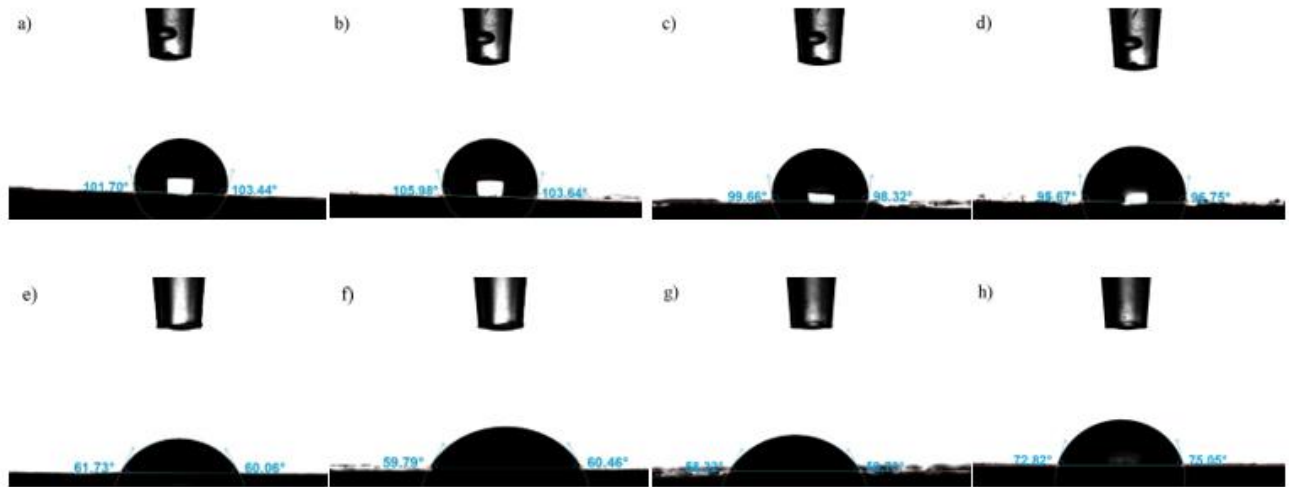


Figure 8. Contact angle images of a) PLA/PP (20:80), b) PLA/PP (30:70), c) PLA/PP (40:60), d) PLA/PP (70:30), e) PLA/PA6 (20:80), f) PLA/PA6 (30:70), g) PLA/PA6 (40:60) and h) PLA/PA6 (70:30)

Table 4. Contact angle values of neat polymers (PLA, PP and PA6) and polymer blends (PLA/PP and PLA/PA6)

Samples	Contact angle (°)
Neat PLA	94.50 ± 2.450
Neat PP	106.7 ± 2.872
Neat PA6	103.9 ± 3.186
PLA/PP (20:80)	102.6 ± 4.351
PLA/PP (30:70)	104.8 ± 3.876
PLA/PP (40:60)	99.00 ± 3.410
PLA/PP (70:30)	96.20 ± 4.160
PLA/PA6 (20:80)	60.90 ± 3.980
PLA/PA6 (30:70)	60.10 ± 4.070
PLA/PA6 (40:60)	59.00 ± 4.570
PLA/PA6 (70:30)	73.90 ± 3.430

4. Conclusions

PLA/PP and PLA/PA6 polymer blends were prepared by extrusion and molded by compression molding processes. As a result of this work, it was seen that the thermal and mechanical properties of PLA/PP and PLA/PA6 mixtures were improved compared to pure PLA. On the other hand, SEM results showed that a very compatible interface interaction and structure did not occur between PLA and PP, while a much more compatible structure was formed between PLA and PA6 mainly due to the interactions between amide groups (N-

H) of PA6 and the carbonyl groups (C=O) of PLA. It was observed that the interactions that caused this compatible structure also affected the contact angle results. In this sense, no significant differences were observed in the contact angle values of PLA/PP mixtures whereas the contact angle values of PLA/PA6 blends decreased remarkably and hydrophilic structures appeared. Considering the surface treatments applied to parts in the automotive sector, it can be foreseen that this hydrophilic property gained by PLA/PA6 polymer blends can be transformed into an advantage in various processes such as painting, coating, plating and it is aimed to detail the studies to be carried out in this regard.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the Scientific Research Projects Unit of Bursa Technical University (under the contract number of 190D001) and Bursa Technical University Central Research Laboratory for providing facilities for this research.

References

Auras, R. A., Harte, B., Selke, S., & Hernandez, R. (2003). Mechanical, physical, and barrier properties of poly (lactide) films. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 19(2), 123-135. doi:10.1177/8756087903039702

Bhasney, S. M., Kumar, A., & Katiyar, V. (2020). Microcrystalline cellulose, polylactic acid and polypropylene biocomposites and its morphological, mechanical, thermal and rheological properties. *Composites Part B: Engineering*, 184, 107717. doi:10.1016/j.compositesb.2019.107717

Di, Y., Iannace, S., Di Maio, E., & Nicolais, L. (2005). Reactively modified poly (lactic acid): properties and foam processing,” *Macromolecular Materials and Engineering*, 290(11), 1083-1090. doi:10.1002/mame.200500115

Ebadi-Dehaghani, H., Khonakdar, H. A., Barikani, M., & Jafari, S. H. (2015). Experimental and theoretical analyses of mechanical properties of PP/PLA/clay nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 69, 133-144. doi:10.1016/j.compositesb.2014.09.006

Feng, F., & Ye, L. (2010). Structure and property of polylactide/polyamide blends. *Journal of Macromolecular Science, Part B Physics*, 49(6), 1117-1127. doi:10.1080/00222341003609179

Grundke, K., Pöschel, K., Synytska, A., Frenzel, R., Drechsler, A., Nitschke, M., Cordeiro, A. L., Uhlmann, P., & Welzel, P. B. (2015). Experimental studies of contact angle hysteresis phenomena on polymer surfaces-Toward the understanding and control of wettability for different applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 222, 350-376. doi:10.1016/j.cis.2014.10.012

Hamad, K., Kaseem, M., Ayyoob, M., Joo, J., & Deri, F. (2018). Polylactic acid blends: The future of green, light and tough. *Progress in Polymer Science*, 85, 83-127. doi:10.1016/j.progpolymsci.2018.07.001

He, Y., Xu, Y., Wei, J., Fan, Z., & Li, S. (2008). Unique crystallization behavior of poly (L-lactide)/poly (D-lactide) stereocomplex depending on initial melt states. *Polymer*, 49(26), 5670-5675. doi:10.1016/j.polymer.2008.10.028

Karimpour-Motlagh, N., Khonakdar, H. A., Jafari, S. M. A., Mahjub, A., Panahi-Sarmad, M., Kasbi, S. F., Shojaei, S., Goodarzi, V., & Arjmand, M. (2020). Influence of polypropylene and nanoclay on thermal and thermo-oxidative degradation of poly (lactide acid): TG-FTIR, TG-DSC studies and kinetic analysis. *Thermochimica Acta*, 691, 178709. doi:10.1016/j.tca.2020.178709

Kawashima, N., Ogawa, S., Obuchi, S., Matsuo, M., & Yagi, T. (2005). Polylactic acid ‘LACEA’. *Biopolymer Online*, 4. doi:10.1002/3527600035.bpol4009

Khankruea, R., Pivsa-Art, S., Hiroyuki, H., & Suttiruengwong, S. (2014). Effect of chain extenders on thermal and mechanical properties of poly (lactic acid) at high processing temperatures: Potential application in PLA/Polyamide 6 blend. *Polymer Degradation and Stability*, 108, 232-240. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2014.04.019

Mallick, P. K. (2021). *Thermoplastics and thermoplastic–matrix composites for lightweight automotive structures. Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles*. MA: Woodhead Publishing.

Nampoothiri, K. M., Nair, N. R., & John, R. P. (2010). An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research. *Bioresource Technology*, 101(22), 8493-8501. doi:10.1016/j.biortech.2010.05.092

Pan, P., & Inoue, Y. (2009). Polymorphism and isomorphism in biodegradable polyesters. *Progress in Polymer Science*, 34(7), 605-640. doi:10.1016/j.progpolymsci.2009.01.003

Pivsa-Art, S., Kord-Sa-Ard, J., Pivsa-Art, W., Wongpajan, R., O-Charoen, N., Pavasupree, S., & Hamada, H. (2016). Effect of compatibilizer on PLA/PP blend for injection molding. *Energy Procedia*, 89, 353-360. doi:10.1016/j.egypro.2016.05.046

Ployetchara, N., Suppakul, P., Atong, D., & Pechyen, C. (2014). Blend of polypropylene/poly (lactic acid) for medical packaging application: physicochemical, thermal, mechanical, and barrier properties. *Energy Procedia*, 56, 201-210. doi:10.1016/j.egypro.2014.07.150

Pradeep, S. A., Iyer, R. K., Kazan, H., & Pilla, S. (2017). Automotive applications of plastics: past, present, and future. *Applied Plastics Engineering Handbook* (2nd ed.). MA: William Andrew.

Reddy, N., Nama, D., & Yang, Y. (2008). Polylactic acid/polypropylene polyblend fibers for better resistance to degradation. *Polymer Degradation and Stability*, 93(1), 233-241. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2007.09.005

Stoclet, G., Seguela, R., & Lefebvre, J.-M. (2011). Morphology, thermal behavior and mechanical properties of binary blends of compatible biosourced polymers: Polylactide/polyamide11. *Polymer*, 52(6), 1417-1425. doi:10.1016/j.polymer.2011.02.002

Sui, G., Jing, M., Zhao, J., Wang, K., Zhang, Q., & Fu, Q. (2018). A comparison study of high shear force and compatibilizer on the phase morphologies and properties of polypropylene/polylactide (PP/PLA) blends. *Polymer*, 154, 119-127. doi:10.1016/j.polymer.2018.09.005



Cam Lifi Uzunluğu ve Oranının Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi

Effect of Glass Fiber Length and Ratio on Mechanical Properties of Cement Mortars

Kenan Toklu¹ , Yunus Emre Avcı¹ , Mehmet Timur Cihan¹ , Engin Bıçakçı¹ 

¹Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 21/06/2021

Kabul / Accepted: 01/09/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Çimento harcının mühendislik özelliklerinde iyileştirmeler yapabilmek için farklı lif türleri harç üretiminde kullanılmaktadır. Fakat lif türü, narinlik gibi değişkenler üretilecek olan harcın özellikleri üzerinde farklı etkilere sahiptir. Bu çalışma kapsamında, farklı uzunluklardaki (3 mm, 6 mm ve 12 mm) cam lifleri, karışıma hacimce % 0.3, % 0.4 ve % 0.5 oranlarında ilave edilerek üretilen harçların yayılma değeri, basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve ultrasonik dalga hızı (UPV) incelendi. Elde edilen sonuçlara göre, karışım içerisindeki cam lif miktarının artmasıyla genel olarak karışımın yayılma değeri, basınç dayanımı ve ultrasonik dalga hızında azalmalar meydana gelirken, eğilmede çekme dayanımında ise iyileşmeler meydana geldiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Cam lifi, lif uzunluğu, basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, ultrasonik dalga hızı, lif oranı”

Abstract

Different fiber types are used in the production of the mortar in order to make improvements in the engineering properties of cement mortar. However, properties such as the type of fibers and the slenderness have different effects on the properties of the mortar to be produced. In this study, glass fibers of 3 mm, 6 mm and 12 mm in length were added to mixtures of 0.3%, 0.4% and 0.5% by volume, and the workability, compressive strength, flexural strength and ultrasonic pulse velocity (UPV) of the produced mortars were investigated. According to the results obtained, it was determined that with the increase of the amount of glass fiber in the mixture, there were decreases in the workability, compressive strength and ultrasonic pulse velocity of the mixture and improvements in the flexural strength in general.

Key Words

“Glass fiber, fiber length, compressive strength, flexural strength, ultrasonic pulse velocity, fiber ratio”

1. Giriş

Dünya genelinde en çok tercih edilen yapı malzemesi betondur (Şimşek vd., 2007; Gökçe & Şimşek 2021). Beton, ince/iri agrega, çimento, su ve ihtiyaca göre mineral, kimyasal katkı maddeleri ve lif kullanılarak üretilen kompozit bir yapı malzemesidir (Şimşek 2015; Toklu & Yazıcıoğlu 2020). Beton, genel olarak hacimce %60-80 agrega, %10-15 çimento, %15-20 su, %2-5 mineral katkı ve %0.2-0.5 kimyasal katkıdan oluşmaktadır (Gökçe 2020). Betonun sahip olduğu zayıf mekanik özelliklerini iyileştirebilmek için geleneksel beton üretiminde kullanılan malzemelere farklı malzemeler ilave edilerek betonun bu zayıf özellikleri iyileştirilebilmektedir (Topçu & Boğa 2005). Beton üretiminde betonun sahip olduğu zayıf özelliklerini iyileştirmek için kullanılan malzemelerin belirlenerek karışım hesaplarının yapılması ve en uygun dozajın bulunması gereklidir (Topçu & Boğa 2005).

Betonun sahip olduğu mekanik özellikleri geliştirmek için beton karışımına farklı oranlarda ve türlerde lifler (cam, polipropilen, çelik lifler gibi) eklenerek lifli beton olarak anılan yeni tip beton türü meydana gelmiştir (Şimşek vd., 2021; Demir vd., 2021; Er vd., 2017). Liflerin beton içerisinde kullanılması ve homojen olarak dağılması sonucunda beton çatlakları önenebilmekte ve bu sayede betonun eğilme ve çekme dayanımları gibi özellikleri iyileştirilebilmektedir (Kozak 2013). Beton karışımında kullanılan liflerin miktarı ve narinlik oranı (boy/çap) üretilen betonun özelliklerini en çok etkileyen faktörlerdir (Yaprak vd., 2004).

Camın, 1940'lerde bir yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği fark edilmiş olup, camın sahip olduğu düşük alkali direnci ile alkali olan betonun karıştırılmasını sağlamak amacıyla 1960 yıllarda yüksek zirkonyum dioksit içeren, alkaliye dayanıklı camlar üretilmiştir (İskender & Karasu 2018). Cam lifler, sıcaklığı 1200-1500 °C'de olan elektrikli fırında eritilen camların istenilen çaplarda binlerce deliklerden geçirildikten sonra sertleşmesi ile üretilmektedir (Ali vd., 2019). Cam lifler yüksek dayanımlı olmaları, alev almamaları, ısı iletkenlik değerlerinin düşük olması ve kimyasallara karşı çok dayanıklı olmaları nedeniyle tercih edilmektedir (Çelikkanat 2002).

Literatür taraması

Karakurt ve Varlı (2019) yaptıkları çalışmada, %0.5 ve %1 oranında polipropilen ve polimer lif kullanılarak üretilen çimento harçları ile standart çimento harcını karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, hem polipropilen hemde polimer lif içeren harçların eğilme dayanımlarında iyileşmelerin meydana geldiği belirtilmiştir.

Kurt (2006) yaptığı çalışmada, s/ç (0.34 ve 0.36) ve cam lifi (%0, %2, %4 ve %6) ilave oranlarını değiştirerek 8 farklı beton üretmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, cam liflerin, 0.34 s/ç oranına sahip lifsiz betonun kırılma enerjisinde 109 kata kadar, 0.36 s/ç oranına sahip lifsiz betonun kırılma enerjisinde ise 66 kata kadar iyileşme sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, cam lifi içeren betonlar lifsiz betonlardan daha sünek davranış gösterdiği ve daha yüksek tokluğa sahip olduğu da vurgulanmıştır.

Yıldız ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada, beton sınıfı C30/37 olan, sabit s/ç oranına sahip 1 metreküp beton içerisine 0, 5, 10, 15 ve 20 kg cam lifi ilave ederek toplam 10 adet, 300 kg ve 350 kg dozlu beton numuneler üretmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, 300 dozajlı beton grubunda 5, 10 ve 15 kg/m³ cam lifi içeren betonların referans betonun basınç dayanımı sırasıyla %2.29, %5.85 ve %0.79 arttırdığını fakat 20 kg/m³ lif içeren betonların referans betonun basınç dayanımını %15.26 düşürdüğünü belirtmişlerdir. 350 dozajlı beton grubunda ise, 5 ve 10 kg/m³ cam lifi içeren betonların referans betonun basınç dayanımından daha düşük olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, cam lifler ile üretilen bütün numunelerin ultrasonik dalga hızının referans betonlara göre azaldığını da belirtmişlerdir.

Qureshi ve Ahmed (2013) yaptıkları çalışmada, s/ç oranını 0.60 olacak şekilde sabit tutarak beton karışımına sırasıyla çimento ağırlığının %0, %0.5, %1, %1.5, %2, %2.5, %3 ve %3.5 oranlarında cam lifi ekleyerek toplamda 8 farklı beton karışımı üretmişlerdir. Sonuçlara göre, lif miktarının artmasıyla betonun işlenebilirliğinin azaldığını belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, farklı uzunluklardaki (3 mm, 6 mm ve 12 mm) cam lifleri, karışıma hacimce % 0.3, % 0.4 ve % 0.5 oranlarında ilave edilmiş ve üretilen harçların yayılma değeri, basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve ultrasonik dalga hızı (UPV) incelenmiştir.

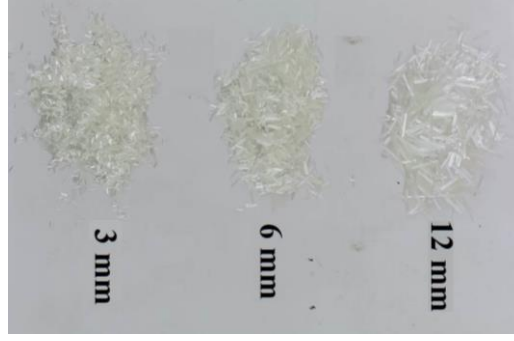
2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Çalışma kapsamında lif katkılı harç üretiminde CEM I 42.5 R tipi çimento (Çizelge 1), TS EN 196-1 (2016) standardına uygun CEN standart kum ve distile su kullanıldı. Ayrıca cam lifi olarak çekme dayanımı 3400 MPa, elastisite modülü 77 GPa, uygulama sıcaklık limitleri -60°C - +650°C arasında, ergime sıcaklığı 1120°C, özgül ağırlığı 2.60 g/cm³ ve elyaf çapı 13-15 mikron olan 3 mm, 6 mm ve 12 mm boyutlarına sahip cam lifleri kullanıldı (Şekil 1).

Çizelge 1. CEM I 42.5 R'ye ait kimyasal oksitler

Oksitler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
Değer (%)	20.32	5.91	3.07	63.45	1.88	2.70	0.59	0.88



Şekil 1. Çalışmada kullanılan cam lifleri

2.2. Metot

Lif katkılı harç numuneleri, TS EN 196-1'e (2016) uygun olarak 40x40x160 mm boyutlarında toplam 60 adet üretildi.

Çalışma kapsamında, cam lifi katkılı harç numunelerinin üretiminde dikkate alınan değişkenler, değişim aralıkları ve 6 adet numune üretimi için kullanılan malzeme miktarları Çizelge 2'de görülmektedir.

Çizelge 2. Harç üretiminde dikkate alınan değişkenler ve bileşen malzeme miktarları

Numune kodu*	Hacimce lif oranı	Çimento	Standard kum	Su	Lif miktarı	Lif uzunluğu
-	%	g	g	g	g	mm
L12-%0.3	0.3	450	1350	225	7.00	12
L12-%0.4	0.4	450	1350	225	9.34	12
L12-%0.5	0.5	450	1350	225	11.67	12
L6-%0.3	0.3	450	1350	225	7.00	6
L6-%0.4	0.4	450	1350	225	9.34	6
L6-%0.5	0.5	450	1350	225	11.67	6
L3-%0.3	0.3	450	1350	225	7.00	3
L3-%0.4	0.4	450	1350	225	9.34	3
L3-%0.5	0.5	450	1350	225	11.67	3
Ref	0	450	1350	225	0	0

*Ref: Referans harç, L: Lif; 12, 6 ve 3:Lif uzunluğu (mm); %0.3, %0.4 ve %0.5: Hacimce lif oranı.

Lif katkılı harçlar üzerinde yayılma tablası deneyi, ultrasonik dalga hızı deneyi, eğilmede çekme deneyi ve basınç deneyleri gerçekleştirildi. Yayılma tablası deneyi (Şekil 2) TS EN 11015-3 (2000) standardına, ultrasonik dalga hızı deneyi (Şekil 3) TS EN 12504-4 (2012) standardına, eğilmede çekme (Şekil 4) ve basınç dayanım (Şekil 5) deneyleri TS EN 196-1 (2016) standardına göre gerçekleştirildi.



Şekil 2. Yayılma tablası deney aleti



Şekil 3. Ultrasonik dalga hızı deneyi



Şekil 4. Eğilmeye çekme deneyi (3 noktadan yükleme)

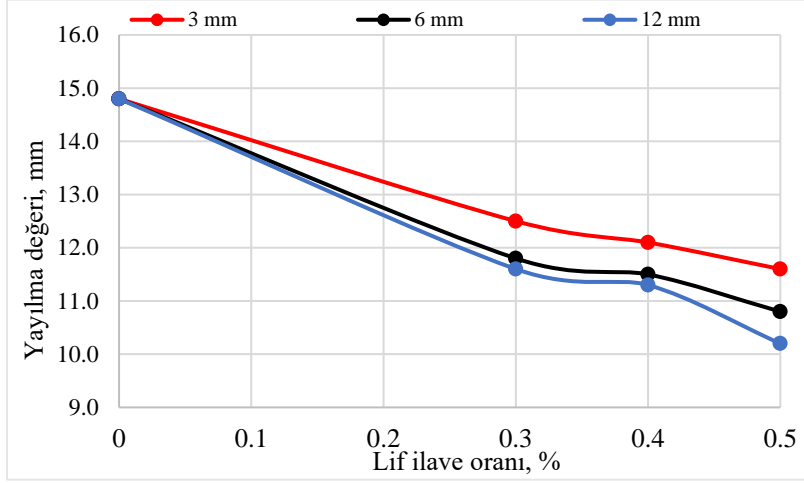


Şekil 5. Basınç deneyi

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Yayılma Tablası Deneyi

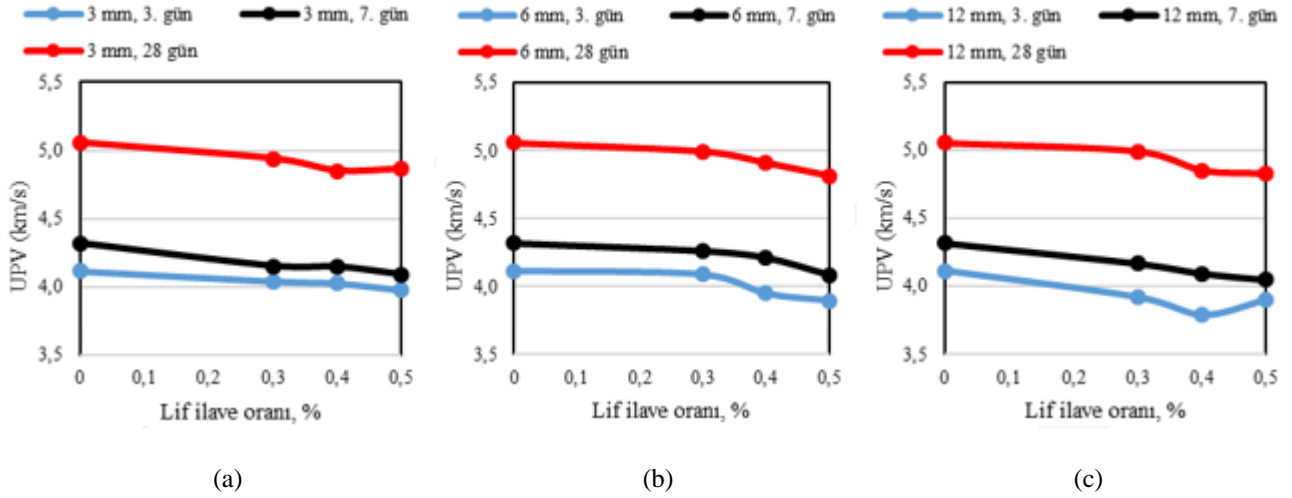
3, 7 ve 28 günlük deneyler için numuneler aynı harman kullanılarak üretildiği için numune yaşına göre yayılma değeri değişmemektedir. Elde edilen yayılma tablası deney sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde, genel olarak lif ilavesinin yayılma değerini düşürdüğü görülmektedir. Ayrıca, lif uzunluğunun artması da yayılma değerinde azalmaya neden olmaktadır. Bu sonuçlara göre, literatürde de belirtildiği gibi (Qureshi ve Ahmed 2013) karışımdaki lif miktarı ve lif boyu arttıkça karışımın işlenebilirliği azalmaktadır. Yayılma değerindeki azalmanın, lif ilave oranının ve lif uzunluğunun artması ile liflerin topaklanma eğiliminin artması (Erkek 2020) ve karışıma eklenen suyun bir miktarının da ilave edilen liflerin ıslatma suyu olarak kullanılmasından kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 6. Yayılma tablası deney sonuçları

3.2. Ultrasonik Dalga Hızı

Herhangi bir ortamda ölçülen sismik dalga hızları, o ortamın doluluğu veya bir diğer adıyla kompasitesi hakkında bilgi vermektedir. Bir beton numuneden geçirilen sesin geçiş hızının yüksek olması o beton ortamının kompasitesinin yüksek olduğunu gösterirken, ses hızının düşük olması ise kompasitesinin daha düşük olduğunu göstermektedir (Topçu vd., 2017; Erdoğan 2003; Kaçar 2018). Çalışma kapsamında üretilen lif katkılı harçların UPV deney sonuçları Şekil 7'de görülmektedir.

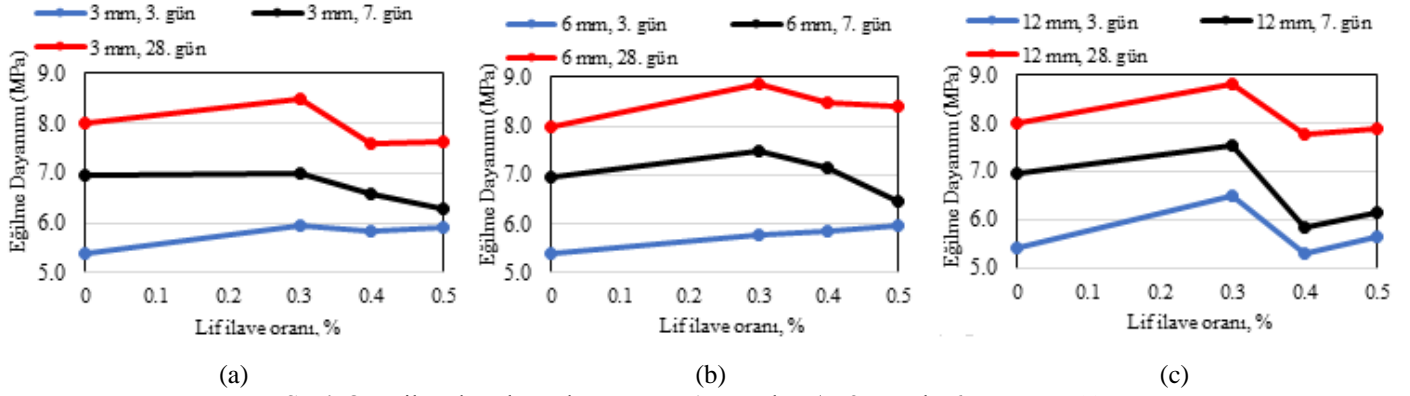


Şekil 7. UPV sonuçları (a: 3 mm, b: 6 mm ve c: 12 mm)

Şekil 7a analiz edildiğinde, lif miktarına bağlı olarak her yaşta genel olarak UPV' de azalmalar meydana geldiği görülmektedir. En yüksek UPV değeri 5.06 km/s (28 günlük) olarak referans numunelerden elde edilirken, en düşük UPV değeri ise 3.79 km/s (3 günlük) olarak 12 mm uzunluğunda %0.4 lif ilave oranına sahip numunelerden elde edilmiştir (Şekil 7c). Şekil 7b ve 7c incelendiğinde, 6 mm ve 12 mm lif uzunluğuna sahip numunelerden elde edilen UPV sonuçlarının 3 mm lif uzunluğuna sahip numunelerle benzer davranış gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, Şekil 7a, 7b ve 7c beraber dikkate alındığında, genel olarak en yüksek UPV' nin sırasıyla 3 mm, 6 mm ve 12 mm uzunluğunda liflerin kullanıldığı harçlarda elde edilmektedir. Genel olarak lif ilave oranının artması ile liflerin numune içerisinde toplanması sonucu oluşan boşluklar nedeniyle UPV' nin azaldığı söylenebilir (Topçu vd., 2017).

3.3. Eğilmede Çekme Dayanımı

Lif katkılı harç numuneleri üzerinde gerçekleştirilen eğilmede çekme deney sonucu elde edilen eğilmede çekme dayanımlarının lif ilave oranına göre değişimi Şekil 8'de görülmektedir.

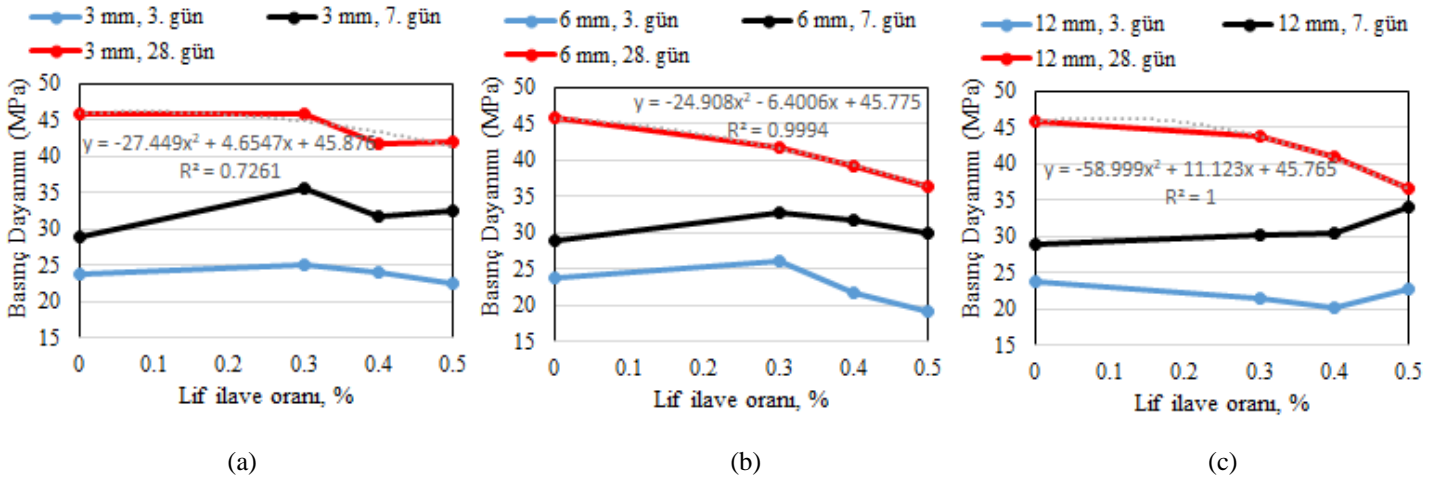


Şekil 8. Eğilmede çekme dayanım testi sonuçları (a: 3 mm, b: 6 mm ve c: 12 mm)

3 mm cam lifi ilaveli harçlarda (Şekil 8a), tüm yaşlarda en iyi sonuç %0.3 lif ilave oranına sahip numunelerde elde edildi. Fakat 7 ve 28 günlük, %0.3 lif oranına sahip numuneler hariç diğer lif oranlarına sahip numunelerin eğilmede çekme dayanımları referans numunelerine göre daha düşük değerler vermektedir. 6 mm cam lifi ilaveli harçlarda (Şekil 8b) 7 günlük %0.5 lif oranına sahip numunelerin eğilmede çekme dayanım sonuçları hariç, diğer tüm numunelerin eğilmede çekme dayanım değeri referans numunelerine göre daha yüksektir. 3 günlük numunelerde eğilmede çekme dayanım değeri lif ilave oranı arttıkça artan bir eğilim göstermektedir. 7 ve 28 günlük numunelerde ise eğilmede çekme dayanım değeri %0.3 lif oranına kadar artma eğilimi gösterirken %0.4 ve %0.5 lif ilave oranlarında azalma gerçekleşmektedir. Şekil 8c incelendiğinde, 3, 7 ve 28 günlük numunelerde %0.3 lif ilave oranına sahip numunelerin eğilmede çekme dayanım değeri artmaktadır. %0.4 ve %0.5 lif ilave oranlarına sahip numunelerin eğilmede çekme dayanım sonuçları ise referans numune sonuçları ile benzer değerler almaktadır fakat %0.3 lif oranına sahip numune sonuçlarına göre azalma gerçekleşmektedir. Literatürde (Alani & Beckett 2013; Hsie vd., 2008; Topçu vd., 2017), çok gevrek davranış gösteren betonun sünekliliğini arttırmak için beton karışımında lif kullanılması önerilmektedir. Ayrıca, literatürde (Mastali vd., 2017; Li vd., 2021), lif uzunluğu arttığında, eğilme dayanımının arttığını gösteren çalışmalar mevcuttur. 28 günlük 3, 6 ve 12 mm lif uzunluğuna sahip numunelerin eğilmede çekme dayanım değerleri karşılaştırıldığında lif uzunluğuna bağlı olarak eğilmede çekme dayanım değerlerinin arttığı görülmektedir (Şekil 8, a, b, c). Tüm lif ilaveli harç numunelerinde %0.3 lif ilave oranında en yüksek eğilmede çekme dayanım değerlerinin elde edilmesi kritik lif ilave oranının %0.3 olduğunu göstermektedir. Ayrıca lif katkılı harçların mekanik özelliklerini etkileyen diğer değişkenlerinde dikkate alınarak optimum değişim aralıklarının bulunması tahmin doğruluğunu arttıracaktır.

3.4. Basınç Dayanımı

Lif katkılı harç numuneleri üzerinde gerçekleştirilen basınç deney sonuçları Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9. Basınç dayanım sonuçları (a: 3 mm, b: 6 mm ve c: 12 mm)

Şekil 9a incelendiğinde, hacimce %0.3 (3 mm uzunluğunda) lif içeren numuneler tüm yaşlarda referans ve diğer numunelere göre daha iyi basınç dayanımı verdiği görülmektedir. Ayrıca, 3 ve 28 günlük %0.5 lif oranına sahip numunelerin basınç dayanımları ise referans numunelerine göre azalmaktadır. Şekil 9b analiz edildiğinde, 3 ve 7 günlük numunelerde en yüksek basınç dayanımı hacimce %0.3 lif içeren numuneler vermektedir. 28 günlük numunelerde ise en yüksek basınç dayanımını referans numunesi vermektedir. Ayrıca, tüm yaşlarda genel olarak en düşük basınç dayanımı hacimce %0.5 lif içeren numunelerde elde edildiği görülmektedir. 28 günlük numunelerde ise karışıma eklenen lif miktarı arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır. Şekil 9c incelendiğinde, 3 ve 28 günlük numunelerde genel olarak karışımdaki lif miktarı arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır. Fakat 7 günlük numunelerde, diğer günlerin tersine lif miktarı arttıkça basınç dayanımı artmaktadır. Şekil 9a, 9b ve 9c beraber incelendiğinde, genel olarak 3 mm lif uzunluğuna

sahip hacimce %0.3 lif içeren numunelerde en yüksek basınç dayanımı, 6 mm uzunluğunda %0.5 lif içeren numunelerde en düşük basınç dayanımı elde edildiği görülmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar göre, cam lifli katkılı harçlarda, cam liflerinin karışım içerisinde topaklanmasından dolayı işlenebilirliklerinde referans numuneye göre azalmalar meydana gelmiştir. Ayrıca, cam liflerinin topaklanması ve boşluk meydana getirmesinden dolayı genel olarak basınç dayanımlarında ve ultrasonik dalga hızlarında azalmalar meydana gelmiştir. Cam liflerinin karışım içerisindeki oranının artmasıyla, genel olarak eğilmede çekme dayanımlarında iyileşmeler meydana geldiği tespit edilmiştir.

%0.3 lif ilave oranı tüm tepki değişkenlerinde (UPV, eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı) en yüksek değerleri vermektedir. Cam lifli katkılı harçlarda optimum lif ilave oranının yaklaşık olarak %0.3 olduğu söylenebilir. Fakat lif katkılı harçların mekanik özelliklerini etkileyen değişkenlerin çok daha fazla olması ve seçilen değişim aralıklarında farklı etki düzeylerine sahip olmaları nedeniyle tepki değişken sayısının artırılarak etki değişkenlerinin aralıklarının ana ve etkileşimli terimlerinin de tepki değişkenleri üzerindeki etki düzeyleri de dikkate alınarak optimum değerlerin belirlenmesi gerekmektedir.

Referanslar

Alani, A.M., Beckett, D. (2013). Mechanical properties of a large scale synthetic fibre reinforced concrete ground slab. *Construction and Building Materials*, 41, 335-344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.043>

Ali, A.M., Arslan, M.H., & Altın, M. (2019). Cam lif takviyeli betonun yangın dayanımlarının çeşitli parametreler açısından irdelenmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 5(2), 198-213. DOI: 10.21324/dacd.458094

Çelikkanat, A.B. (2002). Teknik Tekstiller, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Er, Ş., Sıcacık, E. A., Çetin, S., Demir, İ., & Sevim, Ö (8-10 May 2017). The effect of fiber type and ratio to mechanical properties of cement mortar. *ICOCEE-CAPPADOCIA*, Nevşehir, Turkey, pp. 3436.

Erdoğan, T.Y. (2003). Beton. Ankara, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayn. ve İletişim Şti, 130-160

Erkek, O. (2020). Lifli betonların davranışının deneysel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yapı Deprem Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maltepe Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Demir, I., Sevim, O., Ogdu, M. K., Dogan, O., & Demir, S. (2021). Mechanical and physical properties of autoclaved aerated concrete reinforced using carbon fibre of different lengths. *Tehnički vjesnik*, 28(2), 503-508.

Hsie, M., Tu, C., & Song, P.S. (2008). Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 494(1-2), 153-157. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.05.037>

Gökçe, M. (2020). Determining the physical properties of polymer in different admixtures used for self-compacting cement paste by ESEM. *Micron*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2020.102953>

Gökçe, M., & Şimşek, O. (2021). The effect of calcite and blast furnace slag on the rheology properties of self-compacting concrete in meso and macro scales. *Revista de la construcción*, 20(1), 190-204. <http://dx.doi.org/10.7764/rdlc.20.1.190>

İskender, M., & Karasu, B. (2018). Glass fibre reinforced concrete (GFRC). *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(1), 136-162.

Karakurt, C., & Varlı, M. (23-25th October 2019). Effect of Polymer and Polypropylene Fibers on Cement Mortar and Epoxy Resin. *I CivilTech (International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology)*, Afyonkarahisar-Turkey, pp. 134-141.

Kozak, M. (2013). Çelik lifli betonlar ve kullanım alanlarının araştırılması. *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 3(1), 26-35.

Kurt, G. (2006). Lif içeriği ve su/çimento oranının fibrobetonun mekanik davranışına etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Yapı Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Li, Y.F., Lee, K.F., Ramanathan, G.K., Cheng, T.W., Huang, C.H., & Tsai, Y.K. (2021). Static and Dynamic Performances of Chopped Carbon-Fiber-Reinforced Mortar and Concrete Incorporated with Disparate Lengths. *Materials*, 14(4), 972. <https://doi.org/10.3390/ma14040972>

Mastali, M., Dalvand, A., Sattarifard, A. (2017). The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self-compacting concrete incorporating recycled CFRP fiber with different lengths and dosages. *Composites Part B: Engineering*, 112, 74–92. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.029>

Qureshi, L.A., Ahmed, A. (2013). An investigation on strength properties of glass fiber reinforced concrete. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2(4), 2567-2572

Şimşek O. (2015). *Beton ve Beton Teknolojisi*. 5. Baskı, Ankara, Türkiye: Seçkin Yayınları

Şimşek, O., Aruntaş, H.Y., Demir, İ. (2007). Beton üretiminde süper akışkanlaştırıcı çeşiti ve oranının belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(4), 829-835

Şimşek, O., Toklu, K., & Ünal, M.T. (2021). Çelik Liflerin Geometrik Şeklinin ve Oranının Beton Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 24(2), 409-415

Kaçar, A. (2018). Atık kâğıt katkılı çimento harçlarının bazı mekanik özellikleri. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(1), 1-6.

Toklu, K., Yazicioğlu, S. (2020). The Effect of aggregate size and cure conditions on the engineering properties of concrete. *Turkish Journal of Science and Technology*, 15(2), 127-137

Topçu, İ.B., Boğa, A.R. (2005). Uçucu kül ve çelik liflerin beton ve beton borularda kullanımı. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(2), 1-14

Topçu, İ.B., Demirel, O.E., & Uygunoğlu, T. (2017). Polipropilen lif katkılı harçların fiziksel ve mekanik özellikleri. *Politeknik Dergisi*, 20(1), 91-96

TS EN 196-1. (2016). Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

TS EN 1015-3. (2000). Kağıt Harcı- Deney Metotları- Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (yayılma tablası ile). Türk Standartları Enstitüsü. Ankara

TS EN 12504-4. (2012). Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara

Yaprak, H., Şimşek, O., & Öneş, A. (2004). Cam ve çelik liflerin bazı beton özelliklerine etkisi. *Politeknik Dergisi*, 7(4), 353-358

Yıldız, S., Bölükbaş, Y., & Keleştemur, O. (2010). Cam Elyaf Katkısının Betonun Basınç ve Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 13(3), 239-243



Atık Mermerlerin Parke Taşlarında İnce Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi

Investigation of Usability of Waste Marble as Fine Aggregate in Paving Stones

Melih Naci Ağaoğlu¹, Ezgi Çeviren¹, * Erdinç Halis Alakara¹

¹Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 60000 Tokat, Türkiye

Başvuru/Received: 22/06/2021

Kabul / Accepted: 16/09/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Bu çalışmada, Tokat ili mermer işleme fabrikalarında oluşan atık mermerlerin beton parke taşlarında ince agrega olarak kullanımının uygunluğu araştırılmıştır. Karışımlarda bağlayıcı olarak CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Agrega olarak en büyük tane çapı 8 mm olan kalker kökenli kırmataş agrega ile en büyük tane çapı 4 mm olan atık mermer agregası kullanılmıştır. Karışımlarda şebeke suyu kullanılmış olup herhangi bir kimyasal katkı malzemesi kullanılmamıştır. Çalışma kapsamında Karayolları Teknik Şartnamesi (2013) beton parke taşları özelliklerine uygun olarak doğal agrega gradasyonu hazırlanmıştır. Bu gradasyon sabit tutularak atık mermerler agrega karışımının ince agrega grubuna kütlece %25, %50, %75 ve %100 oranında ikame edilmiştir. Beş ayrı deneye tabi tutulan beş farklı (%0 (katkısız), %25, %50, %75 ve %100) karışım oranına sahip numune gruplarında her bir deney için 3 adet numune olmak üzere toplamda 75 adet (5x5x3) beton parke taşı numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin deney sonuçları incelendiğinde, boyut-görünüş, su emme oranı, donma-çözünme direnci ve aşınma direnci bakımından şartname limitlerinin sağlandığı görülmüştür. Yarmada çekme dayanımı özellikleri incelendiğinde ise %25 ve %50 oranında ikame edilen mermer agregası ile hazırlanan numunelerin yeterli dayanım gösterdiği; buna karşın %75 ve %100 oranında ikame edilen mermer agregası ile hazırlanan numunelerin ise yeterli dayanımı sağlamadığı görülmüştür. Sonuç olarak atık mermerlerin beton parke taşlarında ince agrega olarak %50 oranına kadar kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Atık mermer, Parke taşı, Geri dönüşüm, Yarmada çekme dayanımı, Aşınma kaybı, Donma-çözünme direnci”

Abstract

In this study, the suitability of the use of waste marbles formed in marble processing factories in Tokat province as fine aggregate in concrete paving stones was investigated. CEM I 42.5 R type cement was used as binder in the mixtures. As aggregate, limestone-based crushed stone aggregate and waste marble aggregate were used. Tap water was used in the mixtures and no chemical additives were used. Within the scope of the study, natural aggregate gradation was prepared in accordance with the specifications of the Highways Technical Specification (2013) concrete paving stones. By keeping this gradation constant, waste marbles were substituted for the fine aggregate group of the aggregate mixture at the rate of 25%, 50%, 75% and 100%. In the sample groups with five different mixing ratios, which were subjected to five different tests, a total of 75 (5x5x3) concrete paving stone samples were prepared, 3 for each test. When the test results of the prepared samples were examined, it was seen that the specification limits were met in terms of size-appearance, water absorption rate, freeze-thaw resistance and abrasion resistance. When the split tensile strength properties are examined, it is seen that the samples prepared with 25% and 50% substituted marble aggregate show sufficient strength; On the other hand, it was observed that the samples prepared with 75% and 100% substituted marble aggregate did not provide sufficient strength. As a result, it has been determined that waste marbles can be used up to 50% as fine aggregate in concrete paving stones.

Key Words

“Waste marble, Paving stone, Recycling, Splitting tensile strength, Abrasion loss, Freeze-thaw resistance”

1. Giriş

Beton, temel olarak agrega, su, bağlayıcı malzeme ve katkılarından oluşan kompozit bir yapı malzemesidir. Yüksek mukavemet, çevresel koşullara karşı dayanıklılık, diğer inşaat malzemelerine kıyasla daha ekonomik olması gibi özelliklere sahiptir. Tüm bu özelliklerinden dolayı beton, günümüzde en yaygın kullanılan yapı malzemesi olmuştur. Betonun oluşturan bileşenler arasında agrega, toplam beton hacminin yaklaşık %60-%75' ini oluşturmaktadır. Bu sebeple agrega, betonun performansını etkileyen en önemli malzemelerden birisi olmaktadır (Behera vd., 2014). Agregalar, inşaat sektöründe hemen her alanda kullanılan yapı malzemeleridir. Beton karışımlarında, yol kaplamalarında, demiryolu inşaatında, drenaj sistemlerinde vs. pek çok kullanım alanı vardır. Agregalar doğal ve yapay olmak üzere farklı şekillerde elde edilebilmektedirler (Baradan vd., 2015).

Son yıllarda sanayileşme ve kentleşme hızındaki büyük artış, betonun yüksek miktarda doğal kaynak tüketmesine neden olmaktadır. Her yıl yaklaşık 20 milyar ton hammadde (kaba agrega) kullanılmaktadır. Bu nedenle beton endüstrisi; hammaddenin %50' sini, toplam enerjinin %40' ını ve toplam atıkların %50' sini oluşturduğu için çevre, enerji ve ekonomi alanlarında önemli kayıplara neden olmaktadır ve büyük miktarlarda doğal kaynak tüketmektedir (Oikonomou, 2005). Böylece, inşaatta kullanılacak betonun; çevresel etki, enerji tüketimi ve CO₂ yoğunluğunun en aza indirilmesi ile ilgili çalışmalar inşaat sektörü için oldukça önemli bir hale gelmiştir. (Anitha vd., 2021; Saloni vd., 2021; Binici, 2007; Demir, 2009)

Parke kaplamalar, Romalılardan beri kullanıla gelmiş bir üst yapı tipidir. Parke taş kaplamalar; temiz, dayanıklı ve tekerlek yuvarlanmasına elverişli bir yüzey oluşturması açısından oldukça avantajlı bir kaplama çeşididir. Parke taşlar, ağır taşıt trafiğinin olmadığı yollarda ulaşım ve peyzaj amaçlı olarak kullanımı her geçen gün artan, doğal veya yapay olarak elde edilen zemin kaplama malzemeleridir. (Filiz vd., 2010). Şehir içi yollar, park alanları, meydanlar, endüstriyel sahalar, kaldırımlar ve benzeri birçok yerde çok eskiden beri doğal taşlardan veya betondan imal edilen parkeler kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda doğal taşların yerini prefabrik üretim olan beton parkeler almaktadır. Bunun nedeni olarak; istenilen şekillerde ve renklerde üretilmesi, her mevsimde uygulanabilmesi, döşeme ve sökme işlerinin kolay olması, çatlama ve kırılma olayının daha az olması, istenilen dayanımda üretilebilmesi gibi özelliklerinin olması söylenebilir (Yüksel vd., 2007; Kaya & Karakurt 2016).

Mermer, hemen her yerde kullanım alanı bulan ve dünyada oldukça fazla miktarda bulunan madenlerden biridir. Dünyadaki kaliteli ve en zengin mermer yataklarının büyük bölümünün Akdeniz ülkelerinde yer aldığı bilinmektedir. Türkiye, dünyada mermer üretiminde ve ihracatında ilk sıralarda yer alan ülkeler arasındadır. Mermerin ocaktan çıkarılması ve tesislerde işlenmesi sırasında oldukça büyük miktarlarda atıklar oluşmaktadır. Bu atıklar büyük parçalar şeklinde veya toz halinde olmaktadır. Mermer işleme tesislerinin yoğun olarak bulunduğu bölgelerde bu atıklar çevreyi olumsuz etkilemektedir. Ayrıca bu atıkların sebep olduğu tozlar yakın çevresindeki bitki örtüsüne de ciddi zararlar vermektedir (Öztürk, 2018; Filiz vd., 2010).

Son yıllarda atık malzemelerin betonda kullanımıyla ilgili birçok çalışma yapılmıştır (Miraldo vd., 2021; Kim & Lee 2011; Patra & Mukharjee, 2017; Coppola vd., 2016). Beton parke taşlarında atık malzeme kullanımıyla ilgili çalışmalardan bazıları ise aşağıda verilmiştir.

Kırılmış tuğla atıklarının parke taşlarında kullanımının araştırıldığı çalışmada; tuğla kırıkları doğal agrega yerine %100, %65, %60, %50, %32.5 ve %25 oranlarında kullanılmıştır. Tuğla agregasının yüzdesi arttıkça betonun yoğunluğu azalmış, su emme oranı yükselmiş, basınç ve yarmada çekme mukavemeti değerleri azalmıştır. Tüm karışımların su emme değeri maksimum %6 sınırını aşmıştır. Donma-çözülme testi sonrası kütle kaybı ise tüm karışımlar için maksimum 1kg/m² değerinin altında kalmış ve en iyi hava koşullarına dayanıklılık sınıfının gereksinimlerini karşılanmıştır. Tuğla agregasının yüzdesi arttıkça numunelerin aşınma direnci azalmıştır. Ancak tüm karışımlar standardın belirlemiş olduğu minimum gereksinimleri karşılamıştır. Çalışma sonucunda standardın gerekliliklerini karşılayan beton parke taşlarını hazırlamak için agrega olarak %32.5 oranına kadar geri dönüştürülmüş tuğla agregası kullanmanın mümkün olduğu görülmüştür (Jankovic vd., 2012).

Hindistan'da yapılan bir çalışmada, doğal agrega ile farklı yüzdelerde atık mermer agregası ikame edilmiştir. Su emme, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri yapıldığında elde edilen sonuçlara göre; geleneksel agreganın, %70 oranına kadar mermer atığı agregası ile değiştirilmesinin optimum sonuçlar için yeterli olduğu görülmüştür. Atık malzeme kullanımı ile maliyetin düştüğü ve inşaat atıklarının bertaraf edilmesi sorununun çözülmesi ile çevrenin korunmasına yardımcı olduğu sonucuna varılmıştır (Khandve & Rathi, 2015).

Geri dönüştürülmüş atık lastiklerin beton parke taş üretiminde, kum yerine hacimce %0, %10, %20 ve %30 oranlarında kullanıldığı çalışmada; yoğunluk, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kayma direnci gibi fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. %10 oranında atık lastik eklenmesi ile basınç dayanımı katkısız numunelerine kıyasla artmıştır. Ancak %20 ve %30 oranında atık lastik kullanılması durumunda numunelerde büyük gözeneklilik gözlenmiş ve bu durum önemli derecede dayanım kaybına neden olmuştur. Ayrıca, atık lastik kullanımı betonun gevrek davranışını azaltarak daha sünek bir yapının elde edilmesini sağlamıştır (Ling, 2012).

Silva vd. (2013) farklı oranlarda ince agrega içeren taze ve sertleşmiş betonun mekanik özelliklerini incelemiştir. Karışımlarda atık mermerler %0, %20, %50 ve %100 oranlarında agrega olarak kullanılmıştır. %60' a varan ikame oranlarında betonun mekanik

özelliklerinde iyileşmeler gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, mermer ocaklarından elde edilen atıkların beton üretiminde ve özellikle %60'a varan oranlarda kullanılmasının yeterli olduğu tespit edilmiştir.

Durmuş & Şimşek (2008) yapmış oldukları çalışmada çimentoya %10, %20, %30 ve %40 oranında uçucu kül (UK) ikame ederek parke taşı hazırlamışlardır. Üretilen parke taşlarına standart ve tuzlu su kürü uygulanmıştır. Beton parke taşlarının yarmada çekme, su emme ve aşınma özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak tuzlu su küründe, erken yaşlarda, yarmada çekme dayanımını artırırken, ileriki yaşlarda düşürmüştür. Ayrıca, beton parke taşında UK ikame oranının artıkça aşınma kaybı değerinin arttığı ve su emme oranının ise azaldığı tespit edilmiştir.

Mermer tozunun parke taşlar üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmada, iki farklı çimento tipi ve iki farklı su/çimento oranı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, mermer tozu kullanımı ile betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin katkısız numunesine göre yükseltilebildiği (basınç dayanımını %32.3, yarmada çekme dayanımını %13.5 ve elastisite modülü değerlerini %15.2 artırılabilen, su emme oranını %25.8, aşınma kaybını %8.4 ve donma çözülme sonrası mukavemet kaybını %87.7 azaltılabilmektedir) görülmüştür (Filiz vd., 2010).

Atık çay külünün beton parke taşlarına olan etkisinin incelendiği çalışmada, atık çay külü çimentoya %10, %20, %30, %40 ve %60 oranında ikame edilmiştir. İşlenebilirlik, yoğunluk, basınç ve eğilme dayanımı, su emme, asit saldırılarına karşı direnci ve çeşitli mikro yapı testlerinin uygulandığı çalışmada fiziksel ve mekanik özellikler incelenmiştir. Atık çay külünün gözenekli olmasından dolayı, parke taşlarının boşluğu artmış ve atık çay külü ikamesi parke taşlarının kalitesini düşürmüştür. Ancak %20 ve %40 atık çay külü içeren parke taşlarının sırasıyla C sınıfı (yaya alanları) ve D sınıfı (bahçe alanları) için Endonezya Ulusal Standardı tarafından belirlenen minimum koşulları sağladığı tespit edilmiştir. Bu nedenle, atık çay külünün çimentoya ikame edilmesinin sürdürülebilirlik ve düşük maliyet açısından önemli katkılar sağlayacağı düşünülmüştür (Djamaluddin vd., 2020).

Bu çalışmada, Tokat ili mermer işleme tesislerinde ortaya çıkan atık mermer parçalarının beton parke taşlarında ince agregalar olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında, öncelikle atık mermer parçaları laboratuvar tipi konkasörde kırılarak ince agregalar boyutuna getirilmiştir. Sonrasında, atık mermerler, agregalar karışımının ince agregalar grubuna kütlece %25, %50, %75 ve %100 oranlarında ikame edilmiştir. Katkısız numuneleri ile farklı oranlarda atık mermer agregası içeren beton parke taşı numunelerine boyut-görünüş analizi, aşınma direnci tayini, yarmada çekme deneyi, su emme deneyi ve donma-çözülme deneyleri uygulanarak sonuçlar birbiriyle kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara bakılarak, üretilen numunelerin dahil olduğu sınıflar Tablo 1' de gösterilen Karayolu Teknik Şartnamesi' ne göre belirlenmiştir.

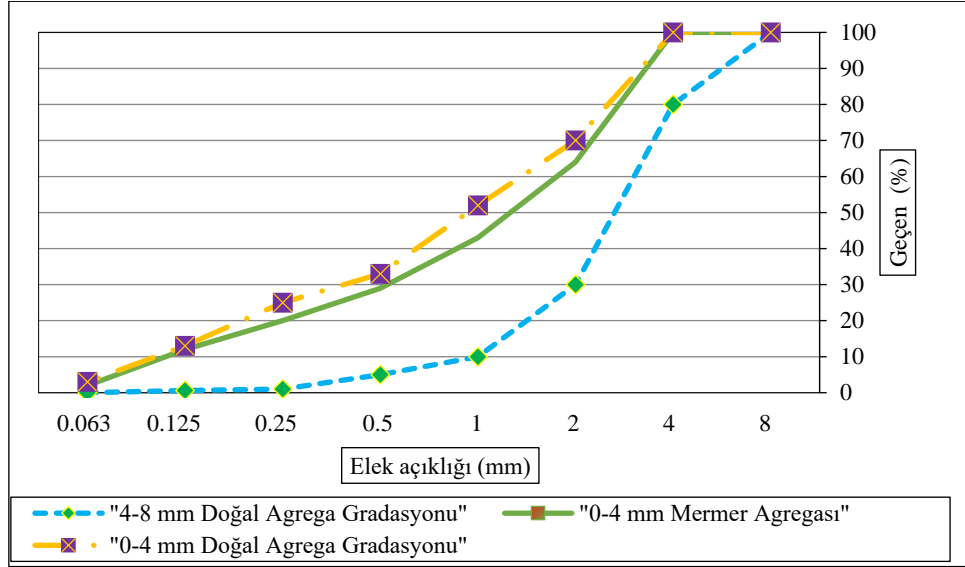
Tablo 1. Prefabrik beton parke numunelerine yapılacak deneyler ve uygunluk kriterleri (Karayolu Teknik Şartnamesi 2013)

Deney	Uygunluk kriteri
Fiziksel Görünüş	Parke taşlarının yüzeyinde çatlak, kırık, çukur, döküntü, pullanma veya soyulma bulunmamalı ve yüzleri düzgün ve köşeleri muntazam olmalı, simetri ve biçim bozuklukları bulunmamalıdır.
Malzeme Özellikleri	Üretimlerde kullanılacak agregalar, çimento, su, kimyasal katkıları ve boya katkıları Kısım 316.01.02'de belirtilen kriterlere uygun olacaktır.
Boyutlar Yönünden Uygunluk	Kısım 316.01.03'e uygun olmalıdır.
Su Emme Oranı	1.Sınıf parkelerde performans ölçümü gerekmez. 2.Sınıf parkelerde kütlece ortalama olarak %6'dan fazla olmayacaktır.
Aşınma Dayanımı	1.Sınıf parkelerde performans ölçümü gerekmez. 2. ve 3.Sınıf parkelerde Geniş Diskli Aşınma deneyi metodu kullanılarak ölçülen değer 23 mm' den fazla olmayacaktır, alternatif olarak Böhme deneyi metodu kullanılarak ölçülen deney sonuçlarından hiçbirisi 20.000 mm ³ /5.000 mm ² 'den fazla olmayacaktır.
Mukavemet	Mukavemet tayini; TS 2824 EN 1338 standardına göre Yarmada-çekme deneyi yapılarak belirlenecek olup, Kısım 316.01.06.01'de belirtilen kriterlere uygun olacaktır.
Donma ve Çözülme Dayanımı	1.Sınıf parkelerde performans ölçümü gerekmez. 3.Sınıf parkelerde donma çözülme deneyinden sonra metrekaredeki kilogram kütle kaybı ortalama olarak %1,0'dan büyük olmamalıdır. Tek numune sonuçlarından hiçbirisi %1,5'ten büyük olmamalıdır.

2. Deneysel Program

2.1. Materyal

Deneyler kapsamında TS EN 197-1 standardına uygun normal Portland çimentosu (CEM I 42.5 R) kullanılmıştır. Çimentoya ait kimyasal özellikler Tablo 2’ de verilmiştir. Çalışmada agrega olarak; kalker kökenli “0-4 mm” ve “4-8 mm” boyutuna sahip doğal agrega (D) ile atık mermer parçalarından elde edilen “0-4 mm” boyutuna sahip mermer agregaları (M) kullanılmıştır. Agregalara ait granülometri eğrileri Şekil 1’de gösterilmiştir. Doğal agregalar, Tokat ilinde beton parke taşlarının imalatında, hali hazırda kullanılmakta olan agregalardan elde edilmiştir. Atık mermer agregaları ise Tokat ili mermer işleme tesislerinde ortaya çıkan ve Şekil 2’de görüldüğü gibi büyük bir çevre kirliliğine sebep olan atık mermer sahasından alınan parçaların, laboratuvar tipi çeneli kırıcı ile öğütülmesinden elde edilmiştir. Katkılı numuneler için hazırlanan karışımlarda atık mermer agregaları agrega karışımının ince agrega grubuna kütlece %25, %50, %75 ve %100 oranlarında ikame edilerek kullanılmıştır. Kaba ve ince agrega için özgül ağırlık ve su emme oranı değerleri TS 2824 EN 1338’ e uygun olarak yapılmıştır. Agregalara ait fiziksel özellikler Tablo 3’ te gösterilmiştir. Tablo 4’te ise beton parke taşlarının sağlaması gereken şartname limit değerleri gösterilmiştir.



Şekil 1. Agregalara ait granülometri eğrileri

Tablo 2. Çimentoya ait kimyasal özellikler

Oksit	Çimento (%)
SiO ₂	18.87
CaO	62.78
Na ₂ O	0.4
K ₂ O	0.9
Al ₂ O ₃	5.62
SO ₃	2.82
MgO	2.63
Fe ₂ O ₃	2.54
MnO	-
Diğerleri	3.44



Şekil 2. Atık mermer sahası

Tablo 3. Doğal ve mermer agregalarının fiziksel özellikleri

Agrega Grubu	Su Emme (%)		Özgül Ağırlık (gr/cm ³)		Şartname Limiti (TS 2824 EN 1338)
	Doğal	Mermer	Doğal	Mermer	
Kaba Agregası (4-8 mm)	0.44	-	2.71	-	Su emme max. %2 Özgül ağırlık min. 2.60 gr/cm ³
İnce Agregası (0-4 mm)	0.66	1.30	2.68	2.63	Su emme max. %2 Özgül ağırlık min. 2.50 gr/cm ³

Tablo 4. TS 2824 EN 1338 beton parke taşına ait dayanım özellikleri

Gereklilikler	Şartname Limiti (TS 2824 EN 1338)
Basınç Dayanımı (MPa)	-
Çekme Dayanımı (MPa)	Ortalama $\geq 3,6$ MPa Tek sonuç $> 2,9$ MPa Min. kırılma yükü 250 N/mm
Su Emme (%)	A sınıfı için yok B sınıfı (2.sınıf) için ≤ 6
Aşınma Dayanımı	F sınıfı (1.sınıf) için yok H sınıfı (3.sınıf) için ≤ 20 cm ³ /50 cm ² I sınıfı (4.sınıf) için ≤ 18 cm ³ /50 cm ²

2.2. Metot

Çalışma kapsamında, beton parke taşları vibrasyonlu ve metal kalıplı parke makinesinde TS 2824 EN 1338'de belirtilen koşullara uygun olarak üretilmiştir. Ayrıca beton karışım hesabında TS 802 dikkate alınmıştır (TS 2824 EN 1338, 2009; TS 802, 2016). Yapılan deneylerde, biri katkısız grup olmak üzere toplamda 5 farklı agrega karışım grubu kullanılmıştır. Tüm karışımlarda su/çimento oranı sabit tutulup bu değer 0.66 olarak alınmıştır. Numuneler üretilirken beton karıştırma işlemi elle yapıldığından ve üretimde kimyasal katkı malzemesi kullanılmadığından su/çimento oranı yüksek tutulmuştur. Karışım gruplarına ait miktarlar Tablo 5' te gösterilmiştir. Beton parke taşlarına; TS 2824 EN 1338' e uygun olarak boyut-görünüş analizi, yarmada çekme deneyi, su emme deneyi, donma-çözülme deneyi ve aşınma direnci deneyi olmak üzere 5 farklı deney yapılmıştır. Bu deneylerin her biri için 3 adet olmak üzere her bir agrega karışım grubu için 15 adet (3x5) ve toplam 5 farklı karışım grubu için 75 adet (3x5x5) numune üretilmiştir. Üretilen numuneler 28 gün kür havuzunda bekletilmiştir. 28 günlük kür sonrası numunelere ait fiziksel ve mekanik özellikler deneyler yardımıyla belirlenmiştir. Şekil 3 ve Şekil 4'te beton parke taşının üretimi gösterilmiştir.

Tablo 5. 1 m³ parke betonu için karışım oranları

Grup Adı	Kaba Agregası (kg)		İnce Agregası (kg)		Çimento (kg)	Su (kg)	Su/Çimento Oranı
	Doğal	Doğal	Doğal	Mermer			
D			1310	0			
D75M25			983	327			
D50M50	615		655	655	288	192	0.66
D25M75			327	983			
M			0	1310			

Karışım içerikleri şu şekilde oluşturulmuştur:

- D: Kaba ve ince agregaların tamamı doğal agregalardan alınmıştır.
- D75M25: Kaba agreganın tamamı doğal agrega, ince agreganın %75' i doğal agregadan, %25' i ise mermer agregasından alınmıştır.
- D50M50: Kaba agreganın tamamı doğal agrega, ince agreganın %50'si doğal - %50'si de mermer agregasından alınmıştır.
- D25M75: Kaba agreganın tamamı doğal agrega, ince agreganın %25'i doğal - %75'i de mermer agregasından alınmıştır.
- M: Kaba agreganın tamamı doğal agrega, ince agreganın tamamı mermer agregasından alınmıştır.



Şekil 3. Beton parke makinasına betonun yerleştirilmesi



Şekil 4. Beton parke taşların makineden çıkmış hali

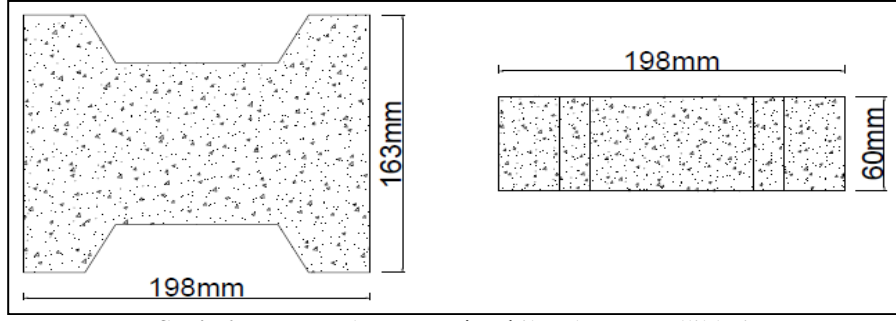
3. Deneysel Bulgular

3.1. Beton parke taşlarının boyut ve görünüş analizi sonuçları

İnce agrega olarak %25, %50, %75 ve %100 oranlarında mermer atığı içeren beton parke numunelerine yapılan gözle muayene sonucu; blokların yüzeylerinde kırık, çatlak, pullanma, döküntü, soyulma veya çukurlaşma olmadığı ve yüzeylerinin düzgün, köşelerinin muntazam olduğu, biçimsel bozukluklarının olmadığı görülmüştür. Boyut ölçümü sonucunda ise; atık mermer ince agregasının beton parke bloklarının en, boy, kalınlık ve pah ölçülerinde bir değişikliğe yol açmadığı tespit edilmiştir. Şekil 5'te numunelerin boyut ölçümü gösterilmiştir. 60 mm kalınlıktaki numunelerde 5 mm pah olup, numune uzunluğu 198 mm ve numune genişliği 163 mm'dir. Şekil 6'da üretilen numunelere ait şekil ve boyut uzunlukları gösterilmiştir.



Şekil 5. Numunelerin en, boy, pah ve kalınlık ölçümü



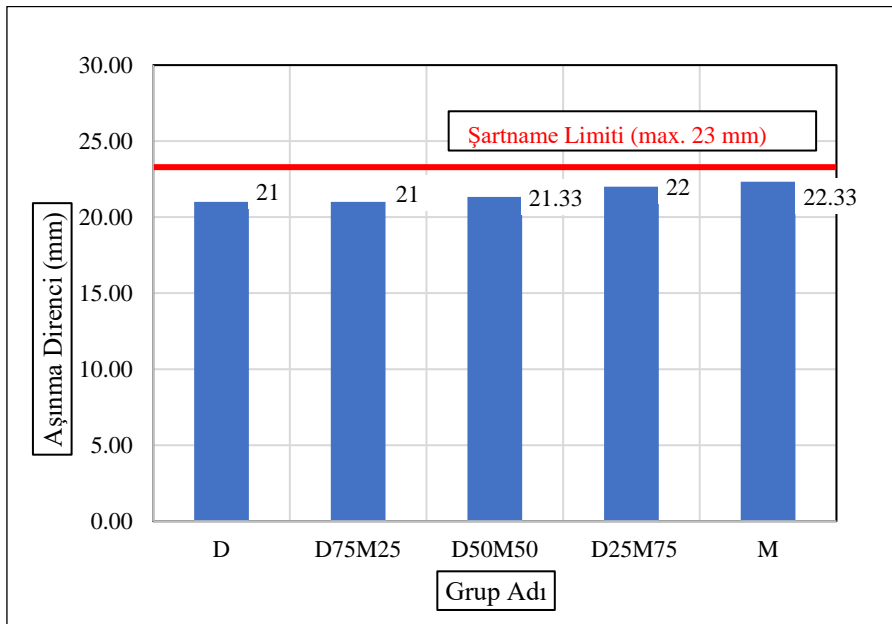
Şekil 6. Beton parke taşına ait şekil ve boyut özellikleri

3.2. Beton parke taşlarının aşınma direnci deneyi sonuçları

Şekil 7’de gösterilen aşındırma cihazı ile tüm numunelerin aşınma direnci ölçülmüştür. Sürtünme ile aşınma kaybını ölçmek için aşındırma tozu olarak alüminyum oksit kullanılır. Geniş aşındırma diski 60 ± 3 saniyede 75 dönüş yapacak şekilde çalıştırılır. Aşındırma tozunun akma debisi deney boyunca gözlemlenerek diskin 75 dönüş yapması ile aşındırma tozunun akışı ve diskin dönüşü durdurulur. Kumpas ile ölçüm yapılır. Numunelere uygulanan aşınma direnci deneyi sonuçlarına göre, deneye tabi tutulan tüm numunelerin standartta belirtilen sınır değeri aşmadığı görülmüştür. Beton parke bloklarında aşınmaya maruz kalan 4 mm kalınlıktaki kum tabakasının aşılmayışından dolayı yakın değerler elde edildiği düşünülmektedir. Şekil 8’de numunelere ait aşınma direnci değerleri verilmiştir.



Şekil 7. Aşınma direnci deney düzeneği



Şekil 8. Aşınma direnci deney sonuçları

3.3. Beton parke taşlarının yarmada çekme dayanımı deney sonuçları

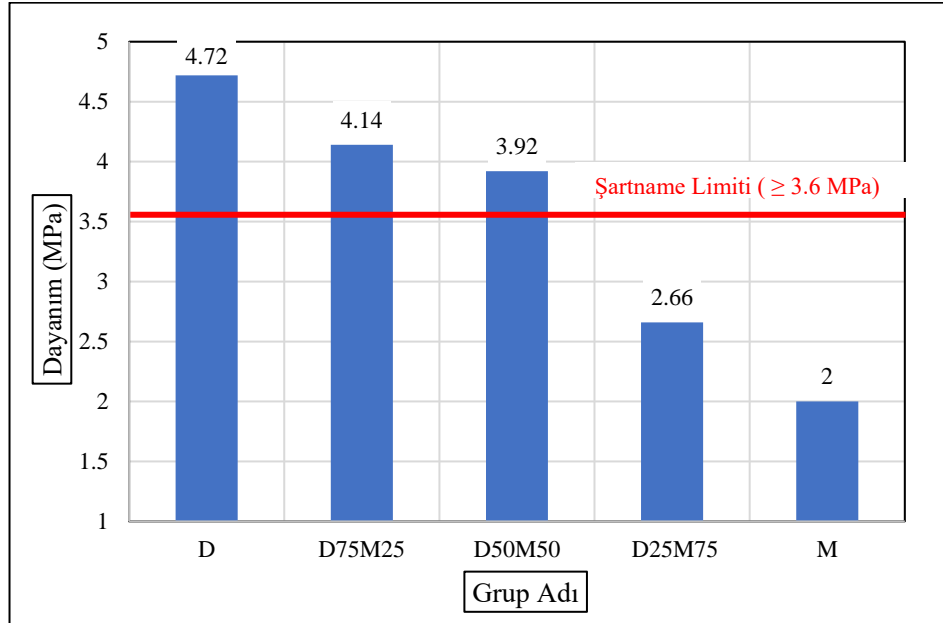
Yarmada çekme dayanımı deneyine tabi tutulacak numuneler 1 gün boyunca 20 ± 5 °C sıcaklıktaki suda bekletilerek sudan çıktığında temiz bir bez ile kurularak deneye hazır hale getirilir. Numunelerin en uzun yarma kesiti boyunca Şekil 9'da gösterilen deney düzeneğinde yükleme başlıklarına değmesi sağlanır. Daha sonra, yerleştirme parçaları ile yükleme başlığı ekseni numunelerin yarıma kesitiyle aynı çizgi üzerinde olacak şekilde cihaza konur. Kırılma yükü (P), yükleme hızı 0.05 ± 0.01 N olacak şekilde kesintisiz ve düzgün bir biçimde artırılarak uygulanır. Kırılmanın meydana geldiği yük, kırılma yükü olarak kaydedilir. Şekil 10'da yarmada çekme deneyi sonrası kırılan numunelere ait görüntü verilmiştir. Şekil 11'de görüldüğü gibi katkısız numuneleri ile %25 ve %50 oranında ince mermer agregası içeren numune gruplarının mukavemet değeri standartta belirtilen sınırlar içerisinde olup, %75 ve %100 atık mermer ince agregası içeren numunelerin yarmada çekme dayanım sonuçları standartta verilen değeri sağlayamamıştır.



Şekil 9. Yarmada çekme deneyi



Şekil 10. Yarmada çekme deneyi sonucu kırılmış numune



Şekil 11. Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları

3.4. Beton parke taşlarının su emme oranı tayini deney sonuçları

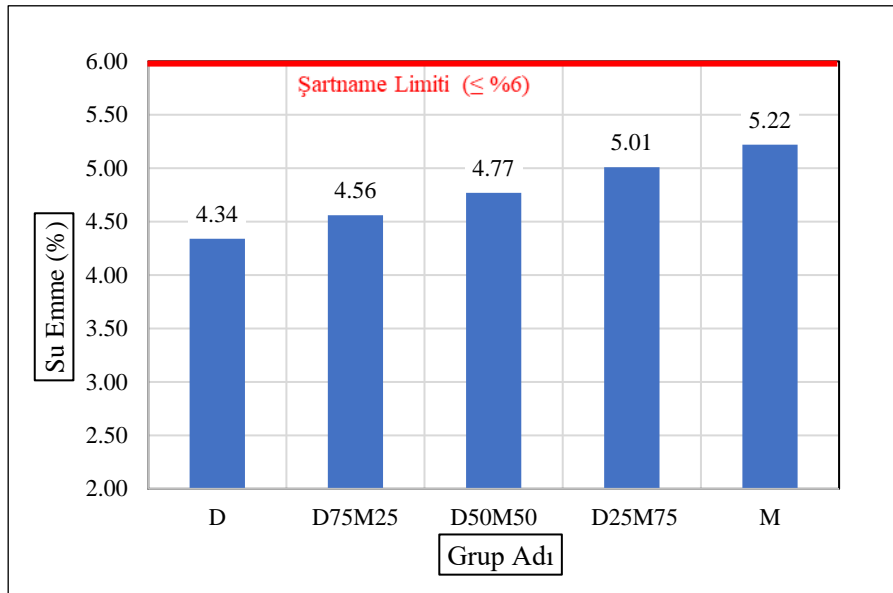
Deneye tabi tutulan numuneler, üzerindeki gevşek malzemelerden temizlenip 20°C sıcaklıktaki suya konularak sabit kütleye (M1) ulaşıncaya kadar 72 saat süre ile su dolu havuzda bekletilir. 72. saatten sonra 1 gün ara ile oda sıcaklığındaki numuneye yapılan 2 tartım arası kütle farkı %0.1'den az olduğunda sabit doygun kütleye ulaşıldığı kabul edilir. Tartım öncesinde numune temiz bir bez ile kurularak tartılan numune 105°C sıcaklıkta sabit kuru kütleye (M2) ulaşıncaya kadar 72 saat kurutulur ve 1 gün aralıklarla yapılan 2 tartım arası kütle farkı %0.1'den az olunca sabit kütleye ulaşıldığı kabul edilir. Deney sonucunda numunelerin su emme oranı (Wa), aşağıdaki bağıntı ile kütlece % cinsinden bulunur. Şekil 12'de su havuzunda bekletilen numuneler gösterilmiştir.

$$W_a = 100 \times (M_1 - M_2) / M_2$$



Şekil 12. 20 °C sıcaklıktaki su havuzunda bekletilen numuneler

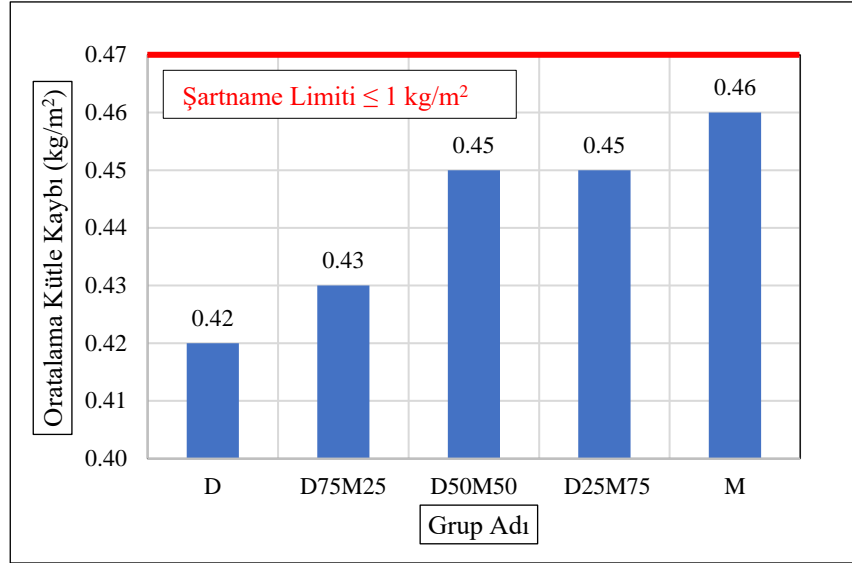
Şekil 13'te gösterildiği gibi tüm numune gruplarının su emme değeri standartta belirtilen sınır değeri (\leq %6) aşmamıştır.



Şekil 13. Su emme deneyi sonuçları

3.5. Beton parke taşlarının donma-çözünme direnci tayini deney sonuçları

Donma-çözünme deneyi yapılırken ilk olarak, deneye tabi tutulacak numuneler 91 mm' lik küp biçiminde olacak şekilde elmas kesici yardımıyla kesilir. Numuneler 28 gün boyunca, kütlece %97 su ve %3 NaCl içeren çözeltiyle kaplanarak, 20°C sıcaklıkta, %65 bağıl nemde ve buharlaşmanın 200 gr/m² olduğu iklim kabininde 7 gün bekletilir. Deneyin uygulanacağı yüzey dışındaki tüm yüzeyler plastik tabakayla kaplanır. Numune yüzeyine 20°C sıcaklıkta ve 5 mm derinlikte 72 saat boyunca su doldurularak yüzey ve plastik tabaka arasındaki yalıtımın uygunluğu gözlemlenir. Numunelerin üzerindeki su, %3 NaCl çözeltisiyle değiştirilerek 30 dk sonra donma kabinine yerleştirilir. 28 gün donma-çözünme çevrimine maruz kalan numunelerin deney sonucunda yüzeyinde oluşan pullanma ile kalkan malzeme, su püskürtülerek kap içerisine doğru yıkanıp fırçalanarak toplanır. Toplanan malzeme süzgeç kağıdına dökülüp NaCl çözeltisinden arındırılarak 1 lt suyla yıkanıp 24 saat süreyle 105°C sıcaklıkta kurutulur. Kütle kaybı belirlenir. Şekil 14'te gösterildiği gibi numuneler üzerinde yapılan donma-çözünme direnci deney sonuçlarına göre; tüm numune gruplarının şartnamede belirtilen sınır değeri (\leq 1 kg/m²) aşmadığı görülmektedir. Katkısız numunesi ile kıyas yapıldığında, numunelerde mermer ince agregası oranı arttıkça donma-çözünme deneyi sonundaki kütle kaybının da arttığı görülmüştür. Ancak sınır değer aşılmadığından, deneye tabi tutulan tüm beton parke taşı numune gruplarının kullanılabilir olduğu görülmüştür.



Şekil 14. Donma-çözünme direnci sonuçları

4. Sonuçlar

Elde edilen veriler atık mermer ince agregasının değişim oranına göre incelenmiş olup ilgili standarda göre (TS 2824 EN 1338) değerlendirme yapılmıştır.

İnce agregada doğal agrega yerine atık mermer kullanılarak hazırlanan numunelerde katkısız numunesine göre;

- ✓ Boyut ve görünüş bakımından bir farklılık görülmemiştir.
- ✓ Aşınma deneyi yapıldığında, numunelerin benzer aşınma direncine sahip olduğu görülmüştür.
- ✓ Yarmada çekme deneyine tabi tutulan numunelerde, ince agregaya %25 ve %50 oranında atık mermer ikame edilmesi durumunda şartnamede belirtilen minimum dayanım değeri sağlanırken, ince agrega olarak %75 ve %100 oranında atık mermer kullanılarak hazırlanan numunelerin standartta belirtilen minimum dayanım değerini sağlamadığı görülmüştür.
- ✓ Su emme oranı deney sonuçlarına göre tüm numune grupları maksimum su emme oranı (%6) değerini aşmamıştır.
- ✓ Donma-çözünme deneyi sonuçlarına göre katkısız grubu ile atık mermer içeren numune grupları benzer sonuçlar göstermiş ve şartname limit değerlerini sağlamıştır.

Numunelere uygulanan su emme deneyine göre, elde edilen beton parke taşları 2. sınıf olarak tanımlanabilmektedir. Aşınma dayanımı değerlerine göre 2. ve 3. sınıf parke grubuna dahil edilirken, donma-çözünme dayanımı bakımından 3.Sınıf parke olarak tanımlanmaktadır.

Deney sonuçları incelendiğinde beton parke taşlarında ince agrega olarak %50 oranına kadar atık mermer agregası kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Böylece atık mermerler kullanılarak istenilen mekanik ve fiziksel özelliklere sahip beton parke bloklarının elde edilebileceği görülmüştür. Bu sayede depolanması ve taşınması problem teşkil eden atık mermerler değerlendirilerek hem çevreye verilen tahribat azaltılacak hem de alternatif bir agrega kaynağı sağlanmış olacaktır.

İleride yapılacak olan çalışmalarda beton parke taşı üretilirken beton santralinden alınacak betona, katkı malzemeleri ilave edilerek Su/Çimento oranının düşürülmesi önerilmektedir. Böylece mekanik özelliklerin daha da artırılacağı düşünülmektedir. Ayrıca mermer agregasının karışımlarda farklı oranlarda ve farklı agrega grupları içerisinde kullanılacağı önerilmektedir.

Referanslar

Anitha Selvasofia S. D., Dinesh A.&Sarath Babu V. (2021).Investigation of waste marble powder in the development of sustainable concrete. Materialstoday: proceedings, 44 (6), 4223-4226. doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.536

Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Tosun Felekoğlu, K., Aydın, S., Yardımcı, M. Y., Topal, A. & Öztürk, A. U., 2015, Beton, İzmir, Birleşik Matbaacılık.

Behera M., Bhattacharyya S.K., Minocha A. K., Deoliya R., &Maiti S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A break through towards sustainability in construction sector: A review. Construction and building materials, 68, 501-516. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003

- Binici, H., (2007). Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties. *Construction and building materials*, 21 (6), 1191-1197. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.002
- Coppola, L., Buoso, A., Coffetti, D., Kara, P. & Lorenzi, S. (2016). Electric arc furnace granulated slag for sustainable concrete. *Construction and building materials*, 123 (2016), 115-119. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.142
- Demir, İ. (2009). Investigation of mechanical properties of concrete produced with waste granites aggregates. *Scientific Research and Essay* 4 (4), 267-274.
- Djamaluddin, A. R., Caronge, M. A., Tjaronge, M. W., Lando, A. T. & Irmawaty, R. (2020). Evaluation of sustainable concrete paving blocks incorporating processed waste tea ash. *Case Studies in Construction Materials*, 12 (2020), doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00325
- Durmuş, G & Şimşek, O. (2008). Uçucu küllerin beton kilitli parke taşı üretiminde kullanımının araştırılması. *TUBAV Bilim Dergisi*, 1(1), 1-6.
- Filiz, M., Özel, C., Soykan, O. & Ekiz, Y. (2010). Atık mermer tozunun parke taşlarında kullanılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(2) 57-72.
- Jankovic, K., Nikolic, D. & Bojovic, D. (2012). Concrete paving block sand flags made with crushed brick as aggregate. *Construction and building materials*, 28(1), 659-663. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.036
- Karayolu Teknik Şartnamesi (Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller, Üstyapı ve Çeşitli İşler), (2013). Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Kaya, T. & Karakurt, C. (2016). Uygulamadaki Beton Parke Taşlarının Mühendislik Özelliklerinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2016), 469-474.
- Khandve, P. V. & Rathi, A. S., (2015). Concrete paving block using marble stone industry waste. *International Journal of Research in Engineering, Science and Technologies (IJRESTs)*, 1 (8), 86-91.
- Kim, H. K. & Lee, H.K. (2011). Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete. *Construction and building materials*, 25(2011), 1115-1122. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.065
- Ling, T-C, (2012). Effects of compaction method and rubber content on the properties of concrete paving blocks. *Construction and building materials*, 28(1), 164-175. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.069
- Miraldo, S., Lopes, S., Pacheco-Torgal, F. & Lopes, A. (2021). Advantages and short comings of the utilization of recycled wastes as aggregates in structural concretes. *Construction and building materials*, 298 (2021), 123729. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123729
- Oikonomou N. D. (2005). Recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 27 (2), 315-318. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.020
- Öztürk, M., (2018). Mermer Kesiminden Kaynaklanan Çevre Kirliliği ve Önlemleri. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, http://www.cevrehirkituphanesi.com/assets/files/slider_pdf/5mgT7FNMcjwz.pdf.
- Patra, R. K. & Mukharjee, B. B. (2017). Influence of incorporation of granulated blast furnace slag as replacement of fine aggregate on properties of concrete. *Journal of cleaner production*. 165 (2017), 468-476. doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.125
- Saloni, Parveen, Lim, Y. Y., Pham T. M., , Jatin & Kumar J. (2021). Sustainable alkali activated concrete with fly ash and waste marble aggregates: Strength and Durability studies. *Construction and building materials*, 283, 122795, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122795
- Silva, D., Gameiro, F., de Brito, J., (2013). Mechanical properties of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by the marble quarrying industry. *J. Mater. Civ. Eng. (ASCE)* 26 (6), 04014008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000948](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000948)
- TS 2824 EN 1338, (2006). Concrete paving blocks - Requirements and test methods. Turkish Standard Institution, Ankara, 2012.

TS EN 197-1. (2012). Cement–Part 1: compositions and conformity criteria for common cements. Turkish Standard Institution, Ankara, 2012.

TS 802, (2016). Beton karışım tasarımı hesap esasları. Ankara, 2016.

Yüksel, İ., Özkan, Ö. & Bilir, T. (2007). Yüksek Fırın Cürufu İkameli Parke ve Bordür Üretimi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(2), 289-296.



Hareketli Bir Plakadan Olan Isı Transferinin farklı Nanoakışkanlar ve Çarpan Jetle İncelenmesi

Heat Transfer Analysis of a Moving Plate with different Nanofluids and Impinging Jet

Mustafa Kilic¹, Mine Efeoğlu¹

¹Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 01250, Adana, TÜRKİYE.

Başvuru/Received: 28/06/2021

Kabul / Accepted: 01/08/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Bu çalışmada, nanoakışkanların çarpan akışkan jet tekniği ile oluşturduğu müşterek etkinin, yüksek ısı akılı hareketli bakır bir plakadan olan ısı transferine etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, literatürdeki mevcut çalışmalarını doğrulamak amacıyla temel akışkan olarak Cu-H₂O nanoakışkanın hareketsiz bir plakada farklı Reynolds sayılarında ısı transfer analizi yapılmıştır. Model sonuçları literatürdeki mevcut deneysel çalışmalarla karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. İkinci aşamasında ise hem hareketli hem de hareketsiz bir plakada Al₂O₃-H₂O nanoakışkanı kullanılarak farklı parçacık çaplarında, farklı plaka hızlarında, ısı transfer analizi yapılmıştır. Ayrıca hareketli bakır plakada, farklı tip nanoakışkan kullanılması durumunda ısı transferine olan etki de incelenmiştir. Sayısal çalışmada PHOENICS HAD programının düşük Reynolds sayılı k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak; nanoparçacık çapı D_p=40nm'den 10nm'ye azaltıldığında ortalama Nusselt sayısında %9,1'lik artış sağlandığı tespit edilmiştir. Plaka hızı V_{plaka}=0-6 m/s aralığında artırıldığında ortalama Nusselt sayısında %88,9 oranında artış sağlandığı, farklı nanoakışkanların karşılaştırılması durumunda ise, en iyi ısı transfer performansının Cu-H₂O nanoakışkanın gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Çarpan akışkan jet, Hareketli plaka, HAD, Isı transferi, Nanoakışkan.”

Abstract

In this study, the common effect of impinging fluid jet technique of nanofluids on heat transfer from a high heat flux moving copper plate was examined numerically. In the first phase of the study, heat transfer was analyzed for the basic fluid Cu-H₂O nanofluids in different Reynolds numbers on a stationary plate to confirm the current studies in the literature. The model results were compared and verified with existing experimental studies in the literature. In the second phase, heat transfer analysis was performed at different particle diameters, different plate velocities, and different volume ratios using Al₂O₃-H₂O nanofluid on both a moving and stationary plate. Furthermore, the effect of heat transfer was examined using different types of nanofluids in the moving copper plate. In the numerical study, the low Re numbered k-ε turbulence model of the PHOENICS CFD program was used. According to the study results, if the nanoparticle diameter is reduced from D_p=40 nm to 10 nm, the average Nusselt number increases by 9.1%. When the plate velocity was raised in the range of V_{plate}=0-6 m/s, the average Nusselt number increases by 88.9%. In the case of comparing different nanofluids, it is obtained that the best heat transfer performance was determined by Cu-H₂O nanofluid.

Key Words

“Impinging fluid jet, Moving plate, CFD, Heat transfer, Nanofluid.”

1. Giriş

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesi endüstriyel uygulamalarda kullanılan sistemlerin daha karmaşık yapıda olmasına sebep olmaktadır. Bu durum, sistemlerin ısı yükünü arttırmakta olup sistem arızalarına sebep olmaktadır. Bu uygulamalarda sistemin verimli ve güvenli çalışabilmesi için ısı yükünü sistemden uzaklaştırılması gerekir. Bu nedenle, yüksek ısı ve kütle transferine sahip uygulamalarda ısı transferi oldukça önemlidir (Sun vd., 2019). Isı transferi artırma yöntemlerinden biri olan nanoakışkanlar, temel akışkana (su, etilen glikol endüstriyel yağlar gibi) nano parçacıklar ilave edilerek oluşturulur. Nanopartikül kullanmanın önemli noktalarından biri, nanopartiküllerin, tek fazlı sıvının yoğunluk, viskozite ve termal iletkenlik gibi fiziksel özelliklerinde değişiklikler meydana getirmekte ve tek fazlı sıvınınkinden daha yüksek bir termal iletkenliğe sahip olmasıdır. Bu sebeple, nanoakışkanların gelecekte, endüstrinin birçok alanında kullanılabileceği öngörülebilmektedir (Kakaç ve Pramuanjaroenkij, 2009).

Isı transferini arttırmak için kullanılan ve endüstride yüksek soğutma sağlayan önemli yöntemlerden birisi de çarpan jet tekniğidir. Çarpan jetler, akışkanın türbülans yoğunluğunu belirli bir bölgede yoğunlaştırarak, o bölgedeki ısı sınır tabakayı azaltır ve yüksek ısı transferi sağlar. Çarpan jet tekniği tekstil ve kâğıt ürünlerinin kurutulmasında, elektronik devre elemanlarının soğutulmasında, imalatta dokunun dondurulmasında, cam levhaların temperlenmesinde, kriyocerrahide, metallerin ısı işlemlerinde, uçak endüstrisinde buzlanmayı önlemede, türbin kanatlarının soğutulmasında kullanılmaktadır. Bununla birlikte çok sayıda endüstriyel uygulama (kâğıt ve tekstil ürünlerinin kurutulması, temperleme, metallerin ısı işlemi vb.) yüksek ısı ve kütle transferine sahip hareketli plaka ile ilgilidir (Buonomo vd., 2019). Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde nanoakışkan özelliklerinin belirlenmesine ve çarpan jetlerle ilgili akış özelliklerinin tespitine yönelik ayrı ayrı çalışmalar mevcut olmasına rağmen bu iki etkinin birlikte kullanıldığı ve ısı transferi ve akış özelliklerinin incelendiği çalışma sayısı oldukça azdır.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; nanoakışkan fikri ilk olarak Choi (1995) tarafından ortaya atılmış ve ısı transferini iyileştirdiği belirtilmiştir. Sarkar vd., (2015) ve Kasaeian vd., (2015) nanoakışkanların fiziksel ve ısı özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapmıştır. Suresh vd., (2011) ve Assef vd., (2014) tarafından nanoakışkanların ilk mühendislik uygulamaları yapılmıştır. Selvakumar ve Suresh (2012) elektronik sistemlerin soğutulması, Devdatta vd., (2009) bina ısıtma ve soğutma sistemleri, Ho vd., (2010) kaynama sürecinde nanoakışkanların ısı transferini iyileştirmesine yönelik araştırmalar yapmışlardır. Peyghambarzadeh vd., (2011) araç radyatöründe baz akışkan olarak saf su ve saf etilen glikole (EG) Al_2O_3 nanoartikülü eklenmesi durumunda ısı transferine olan etkiyi deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak, nanoakışkan kullanılması durumunda, baz akışkanına kıyasla yaklaşık %40'lık bir artış sağladığı ifade edilmiştir.

Lahari vd., (2018) çalışmalarında TiO_2 -ZnO/su hibrit nanoakışkanlarının farklı hacimsel oranlarının (% 0,5, %1,5, %2,0) ısı transferine etkisini bir ısı değiştiricide deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak, TiO_2 nanoakışkanının ısı iletkenliği temel akışkana kıyasla %1,5 hacimsel konsantrasyonda %14,8'lik bir artış, hacimsel konsantrasyon %2 olması durumunda %27,9'luk bir artış görülmüştür. ZnO nanoakışkanının ısı iletkenliği baz sıvısına kıyasla %1,5 hacimsel konsantrasyonda %11,5'luk bir artış, hacimsel konsantrasyon %2 olması durumunda %18,1'lik bir artış görülmüştür. Aynı hacimsel oranlarda hem ısı transfer hızında hem de ısı değiştirici etkinliğinde önemli gelişme göstermiştir. Isı değiştiricisinin termal iletkenliği ve etkinliği, TiO_2 ve ZnO hibrit nanoakışkanlarının %1,5 hacim konsantrasyonlarında sırasıyla % 40,9 ve % 13,5'lik artış sağladığı tespit edilmiştir.

Xuan ve Li (2000) Cu- su nanoakışkanı için nanopartikül hacim değişiminin, partikül çapının ve partikül geometrisinin ısı transferine olan etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak; hacimsel oran %2,5'ten %7,5'e artırılması durumunda nanoakışkan ısı iletkenlik katsayısı 1,24'ten 1,78'e arttığı tespit edilmiştir.

Khan vd., (2021) TiO_2 /su mono nanoakışkanı ile TiO_2 -Ag/su hibrit nanoakışkanın ısı iletkenliğini deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Çalışmada incelenen parametreler; farklı hacimsel konsantrasyonlar (0,1, 0,2, 0,3, 0,4) ve farklı akışkan sıcaklıkları (35°C, 40°C, 50°C, 60°C) dir. Sonuç olarak hem mono hem de hibrit nanoakışkanın, nanoakışkan sıcaklığı ve nanopartikül hacimsel konsantrasyonu artmasıyla termal iletkenliği arttığı ancak nanokompozit akışkanın ısı iletkenlik artışının, mono nanoakışkandan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. TiO_2 /su nanoakışkanı için % 4 hacimsel konsantrasyonda ve 60°C' de %18,4'lik maksimum iyileşme sağlanmıştır. Nanokompozit akışkanın 40°C'deki ısı iletkenliği, 60°C'deki mono nanoakışkanın iletkenliğiyle aynı değere sahip olduğu tespit edilmiştir.

Çarpan akışkan jetlerle ilgili çalışmalar incelendiğinde; Sharif ve Banerjee (2008) ısıtılmış hareketli bir plakaya çarpan jetin ısı transferine etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Jet çıkış Reynolds sayısı ($Re=5000-20000$), farklı plaka hızları ($U_{plaka}=0-2$ m/s) ve jet-çarpma plakası mesafesi ($H/W=6-8$) çalışmada incelenen parametrelerdir. Sayısal analiz için standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak, plakada hareket olmadığında jet plakaya çarptığında jetin her iki tarafında iki ters yönde dönen birincil girdapların oluştuğu, ancak plaka hareket ettiğinde akış çizgileri sağa doğru eğildiği belirlenmiştir. Jet Reynolds sayısı ve plaka hızının artması ortalama Nusselt sayısında önemli bir artış sağladığı tespit edilmiştir. Kilic vd., (2017) sabit ısı akıllı düz bir plakanın çarpan akışkan hava jeti yardımı ile soğutulmasını farklı parametreler için incelemiştir. $Re=4000-10000$ aralığında artırılması ortalama Nusselt sayısında % 49,5'lik bir artış sağlandığı, $H/D_h=4-10$ aralığında artırılmasında ise %17,9'luk artış sağlandığı belirlenmiştir. Kilic ve Başkaya (2017) soğutucu olarak çarpan akışkan jet kullanılan sabit ısı akıllı bir yüzeyde ısı transferinin farklı geometride akış yönlendiriciler kullanılarak iyileştirilmesini sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak; ısı transferinde akış yönlendirici kullanılmamasının, akış yönlendirici kullanılmaması durumuna göre %28'e oranında bir artış sağlayabildiği görülmüştür.

Nanoakışkan ve çarpan jetlerin müşterek etkisini inceleyen çalışmalar incelendiğinde; Buonomo vd., (2019) nanoakışkanın ısıtılmış hareketli bir yüzeye çarpıtılmasıyla oluşan ortak etkinin akış ve ısı transfer analizini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışma sıvısı olarak su ve Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanılmıştır. Sayısal model için ANSYS FLUENT paket programının k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Çalışmada, jet-hedef yüzey mesafesinin ($H/W=6-10$) iki değeri için iki geometrik yapı oluşturulmuştur. Nanopartikül konsantrasyonu $\phi=0\%-6\%$ aralığında, Reynolds sayısı $Re=5000,20000$ değerlerinde, plaka hızı $U_p=0$ m/s, 0,8 m/s, 2 m/s aralığında çalışılmıştır. Sonuç olarak; hareketli plaka çarpma noktasında yerel Nusselt sayısını önemli ölçüde azaltmıştır. Reynolds değeri ve plaka hızı arttıkça ortalama Nusselt sayısı artmıştır. Hacimsel oran ve jet-hedef yüzey mesafe oranı arttıkça yerel Nusselt sayısı da artmıştır. Nanoakışkanın kullanılması durumunda viskozitede artış meydana gelmiştir bu da hareketli plakanın daha fazla sürüklenmesine ve hareketli yüzeyden daha fazla kütle akış oranının olduğu belirlenmiştir.

Barewar vd., (2019) ZnO-su nanoakışkanının ısıtılmış bakır levha yüzeyine çarpıtılması ile ısı transfer özelliklerini farklı jet-plaka yüzey mesafesi (2-7,5) ve farklı hacim konsantrasyonunda ($\phi =\% 0,02 -\% 0,1$) deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak; ZnO nanoakışkanı için partikül konsantrasyonu arttıkça ısı transferinde artış meydana geldiği, hacimsel konsantrasyon $\phi =\% 0.1$ olması durumunda saf su ile karşılaştırıldığında ısı transferinde %51'lik bir artış görülmüştür. Jet-plaka (H/D) mesafesinin jet çarpma soğutma işleminde önemli olduğu ve ZnO nanoakışkanı $\phi =\% 0,1$ hacimsel konsantrasyonda jet-plaka mesafesi $H/D=3,5$ olması durumunda ısı transferinde maksimum iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Kilic ve Ali (2019) çalışmalarında nanoakışkanlar ve çoklu jetler kullanılması durumunda ısı transferi ve akış özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak; nanoakışkan hacim oranının $\phi =\% 2-\% 4$ aralığında artırıldığında ortalama Nusselt sayısının %10,4 arttığı, en iyi ısı transferi performansının Cu-su nanoakışkanı ile elde edildiği ve çoklu jetlerin konumlarının ısı transferinde önemli bir belirleyici olduğunu tespit etmişlerdir. Ersayın ve Selimefendigil (2013) hareketli bir plakaya Al_2O_3 -su nanoakışkanı için oluşturulan çarpan jetin, titreşimli ve titreşimli olmayan akışın ısı transferi ve akış özellikleri sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmada nanopartikül hacim oranı ($\phi=0, 2, 4, 6$), plaka hızı ($U_{plaka}=0,25, 0,5, 1,2$) Reynolds sayısı ($Re=100, 200, 400$), nanopartikül titreşim frekansı (1Hz, 2Hz, 4Hz, 8Hz) değerlerinde çalışılmıştır. Plaka hızı değişirken nanopartikül hacimsel konsantrasyonu $\phi =\% 4$ ve Reynolds değeri $Re=100$ alınmıştır. Sonuç olarak; plaka hareketsiz durumdayken çarpan jet plakanın sağ ve sol bölümlerinde simetrik iki girdap oluşturduğu ancak plaka + x yönünde hareket ettiğinde termal ve hız akım çizgilerinin sağa doğru eğildiği tespit edilmiştir. Düşük plaka hızlarında, jet akışının durma noktaları daha belirgin olduğu ve bu noktalarda Nusselt sayısının maksimum değere ulaştığı ancak artan plaka hızları için bu belirginliğin azaldığı tespit edilmiştir. Nanopartikül hacimsel konsantrasyonu arttıkça toplam ısı transfer oranının arttığı belirlenmiştir. Titreşimli jet çarpması için frekansın artması toplam ısı aktarım hızını arttırdığı tespit edilmiştir.

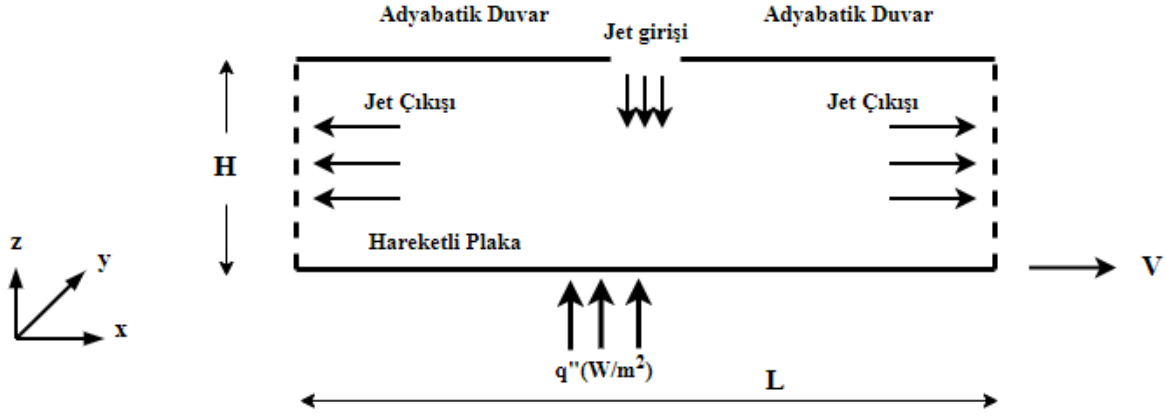
Başaran ve Selimefendigil (2013) laminar bir akış için ısıtılmış, hareketli bir plakaya çift çarpan jetlerin dikdörtgen bir kanalda ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışma sıvısı olarak su ve Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanılmıştır. Jet çıkışı Reynolds sayısı ($Re=50-200$), plaka hızı ($U_p=0,0,5,1,2$ m/s) ve nanoakışkan hacimsel oran ($\phi=0\%-6\%$) etkisi araştırılmıştır. Sayısal analiz için FLUENT paket programı kullanılmıştır. Sonuç olarak, plaka hızı arttıkça Nusselt sayısı artmıştır. Nusselt sayısındaki maksimum artış sabit plakada çarpma bölgesinin yakınında, hareketli plakada ise çıkışta elde edilmiştir. Re sayısı arttıkça, ısıl sınır tabaka incelmeye ve böylece ısı transferi artmıştır. Nanopartikül hacimsel oranın artması Nusselt sayısını arttırdığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, farklı tipte nanoakışkanların, ısı transferini artırma yöntemlerinden biri olan çarpan akışkan jet tekniği ile kullanılmasıyla, hareketli bir yüzeyden olan ısı transferi artırılmaya çalışılmıştır. Literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak nanoakışkanlar, çarpan jet tekniği ile kullanılmış ve bu durumda oluşan müşterek etkinin ısı transferine etkisi, farklı parametreler için incelenmiş ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Bu çalışmadaki temel amaç; son derece karmaşık olan nanoarçacıkların temel akışkan içindeki davranışlarının belirlenmesi, nanoakışkanların çarpan jet tekniğinde kullanılması ile oluşan yoğun türbülans etkilerinin ortaya konması ve bunun ısı transferine olan etkisinin modellenmesi ve bu modelin literatürde yer alan deneysel sonuçlarla doğrulanmasıdır.

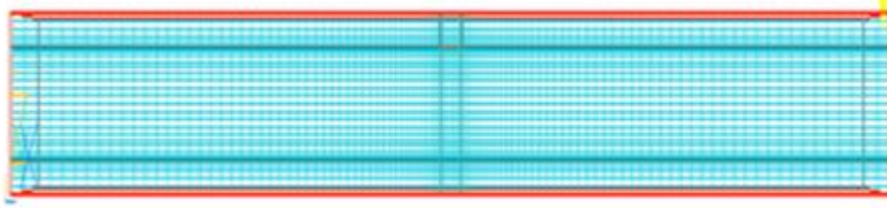
2. Materyal ve Metot

2.1 Model Geometrisi

Bu çalışmada, nanoakışkanlar kullanılarak hareketli bir plakadan olan ısı transferinin iyileştirilmesi sayısal olarak incelenmiştir. Problem zamandan bağımsız olarak çözülmüştür. Çalışmada, hedef plaka boyutları 110x40x32 cm olarak modellenmiştir. Kanal boyunca yerleştirilmiş plakanın yüzeyinde sabit ısı akısı ($q''= 222000$ W/m²) olduğu kabul edilmiştir. Sayısal analiz için farklı türbülans modelleri denenmiş ve uygulanan Reynolds değerinde deney sonuçları ile uyumlu sonuçlar elde edildiğinden, PHOENICS HAD programının düşük Re sayılı k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Kütle korunumu, momentum ve enerji denklemlerine uygun sınır şartları verilerek oluşturulan modelde ışınlama olan ısı transferi ihmal edilmiş ve sadece türbülanslı, zorlanmış taşınım olan ısı transferi dikkate alınmıştır. Şekil 1'de problemin HAD model geometrisi ve Şekil 2'de hücre yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1. HAD model geometrisi



Şekil 2. Hücre yapısı

Korunum denklemleri:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho U_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right] \quad (2)$$

$$\rho c_p U_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho c_p \overline{u_i T} \right] \quad (3)$$

Modelin taşıma denklemleri:

$$\rho U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\rho U_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + f_1 C_1 \mu_t \frac{\epsilon}{k} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - f_2 C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

Türbülanslı kinetik viskozite:

$$\mu_t = f_\mu C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

$$\sigma_k = 1.00; \quad \sigma_\varepsilon = 1.314; \quad C_1 = 1.44; \quad C_2 = 1.92; \quad C_\mu = 0.09 \quad (7)$$

Lam-Bramhorst düşük Reynolds sayısı k-ε modelinin sönmleme fonksiyonları aşağıdaki denklemlerde sunulmuştur.

$$f_\mu = [1 - \exp(-0.0165 Re_z)]^2 \left(1 + \frac{20.5}{Re_t} \right) \quad (8)$$

$$f_1 = \left(1 + \frac{0.05}{f_\mu} \right)^3 \quad (9)$$

$$f_2 = 1 - \exp(-Re_t^2) \quad (10)$$

Burada,

$$Re_t = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon} \quad (11)$$

$$Re_z = \frac{\rho k^{1/2} z}{\mu} \quad (12)$$

Bu çalışmada kullanılan sınır şartları Tablo 1'de gösterilmiştir. Bu çalışmada; kanal çıkışında x yönündeki U,V,W hızları ile türbülans kinetik enerjisi ve yayılma oranının değişmediği, kanal çıkışından kanal içerisine bir ters akışın olmadığı ve deney düzeneğinde kanal uzunluğunun daha uzun olduğu ve çıkışın daha ileriki bir bölgeden meydana geldiği kabulü yapılmıştır.

Tablo 1. Sınır şartları.

	U(m/s)	V(m/s)	W(m/s)	T (K)	k	ε
Jet	U=0	V=0	W= W _{giriş}	T=T _{giriş}	(T ₁ W _{jet}) ²	(C _μ C _d) ^{3/4} $\frac{k^{3/2}}{L}$
Plaka	U=U _{plaka}	V=0	W=0	q"=q"yüzey	k = 0	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0$
Çıkış	$\frac{\partial U}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial V}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial W}{\partial x} = 0$	T=T _{çıkış}	$\frac{\partial k}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$
Ön ve Arka Duvar	U=0	V=0	W=0	$\frac{\partial T}{\partial y} = 0$	--	--
Üst Duvar	U=0	V=0	W=0	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$	--	--

2.2 Matematiksel Formülasyon

Bu çalışmada iletimle ve ışınımla olan ısı kayıpları ihmal edilmiş ve yüzeyde tanımlanan ısı akısının tamamının taşınım ile akışkana geçtiği kabulü yapılmıştır.

Yüzeyden taşınım ile olan ısı transferi;

$$Q_{taşınım} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (13)$$

Burada $Q_{tasımın}$ hedef plaka yüzeyindeki ısı değeri, h ısı taşınım katsayısı, A taşınım yüzey alanı, ΔT ($\Delta T = T_{yüzey} - T_{yığın}$) ölçülen yüzey sıcaklığı ile akışkan ortalama sıcaklığı arasındaki farktır.

Nusselt sayısı (Nu);

$$Nu = \frac{(Q_{tasımın} \cdot D_h)}{(T_{yüzey} - T_{yığın}) \cdot k_{nf}} \quad (14)$$

Burada T_s ölçülen yüzey sıcaklığı, D_h hidrolik çap ve k_{nf} ise nanoakışkan ısı iletkenlik katsayısıdır.

Ortalama Nusselt sayısı ise;

$$Nu_{ort} = \frac{h_{ort} \cdot D_h}{k_{nf}} \quad (15)$$

Reynolds sayısı (Re); akış karakteristiğinin belirlenmesinde (akışın laminar veya türbülanslı olup olmadığını belirlemek için) kullanılmaktadır. Reynolds sayısı;

$$Re = \frac{(\rho_{nf} \cdot V_{jet} \cdot D_h)}{(\mu_{nf})} \quad (16)$$

Burada ρ_{nf} nanoakışkan yoğunluğu, V_{jet} jet çıkış hızı ve μ_{nf} nanoakışkan dinamik viskozitesidir.

Nanoakışkan yoğunluğu ise (Pak ve Cho 1998) eşitliği ile hesaplanmıştır;

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi) \cdot \rho_{bf} + \varphi \cdot \rho_p \quad (17)$$

Burada ρ_{bf} temel akışkan (su) yoğunluğu, φ nanoakışkan hacimsel oranı, ρ_p ise nanoakışkan içerisindeki katı parçacıkların yoğunluğudur.

Nanoakışkan hacimsel oranı ise;

$$\varphi = \frac{1}{(1/\omega) \cdot (\rho_p - \rho_{bf})} \quad (18)$$

Burada ω nanoakışkan ile temel akışkanın yoğunlukları arasındaki farktır (Pak ve Cho 1998).

Nanoakışkan özgül ısısı ise (Wang vd., 2006);

$$C_{p_{nf}} = \frac{\varphi \cdot (\rho \cdot C_p)_p + (1 - \varphi) \cdot (\rho \cdot C_p)_f}{(\rho_{nf})} \quad (19)$$

Burada ρ_{nf} nanoakışkanın yoğunluğu, $C_{p(p)}$ parçacığın özgül ısısı, $C_{p(f)}$ temel akışkanın özgül ısısıdır.

Nanoakışkanın ısı iletim katsayısı ise (Corcione, 2011);

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1 + 4,4 Re^{0,4} Pr_{bf}^{0,66} \left[\frac{T}{T_{fr}} \right]^{10} \left[\frac{k_p}{k_{bf}} \right]^{0,03} \varphi^{0,66} \quad (20)$$

Burada Re_p nanoparçacık Reynolds sayısı ($Re_p = \frac{2\rho_{bf}k_{bf}T}{\pi\mu_{bf}^2d_p}$), φ parçacık hacimsel oranı, Pr_{bf} temel akışkan Prandtl sayısı, T nanoparçacık sıcaklığı, T_{fr} temel akışkan donma sıcaklığı, k_{bf} temel akışkanın iletim katsayısı, k_p ise nanoparçacıkların ısı iletim katsayısıdır.

Nanoakışkanın dinamik viskozitesi ise şu şekilde hesaplanmıştır (Batchelor, 1977).

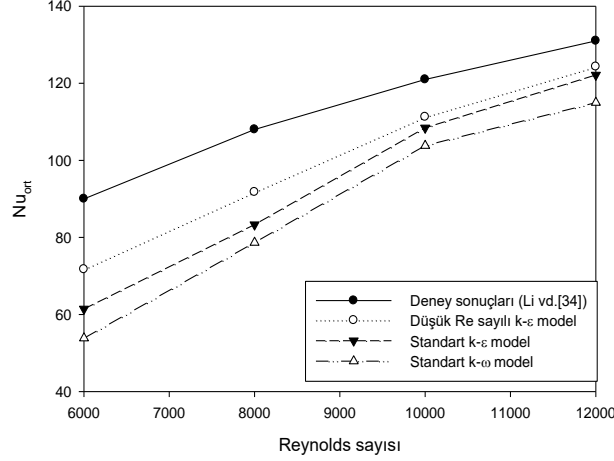
$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 + 2,5 \varphi + 4,698 \varphi^2) \quad (21)$$

Burada φ nanoakışkan hacimsel oranı, μ_{bf} ise temel akışkanın dinamik viskozitesidir.

2.3 Sayısal Sonuçların Doğrulanması

Bu çalışmada; yüzeylere yakın bölgelerde hidrodinamik sınır tabakada meydana gelebilecek değişimlerin daha iyi modellenmesi amacıyla hücre yapısı jet girişi ve bakır plakanın yüzeyinde yoğunlaştırılmıştır. Öncelikle sayısal sonuçların iterasyon sayısından ve

hücre sayısından bağımsızlaştırılması sağlanmıştır. Buna göre; iterasyon sayısı 1000 ile 5000 arasında, hücre sayısı 25 ve 34 aralığında (z yönünde) çalışılmıştır. Sonuç olarak; hücre sayısı 110x40x32 ve iterasyon sayısı 3000 olduğunda sonuçların hücre sayısından ve iterasyon sayısından bağımsız olduğu görülmüştür. Çalışmada Reynolds değerleri $Re=16000$ olarak alınmıştır. Bu sebeple, düşük Re sayılı k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar, deneysel sonuçlar (Li vd., 2012) ile karşılaştırılmış ve arasındaki farkın $Re=12000$ için %5'in altında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Düşük Re sayılı k- ϵ türbülans modeli, standart k- ϵ türbülans modeli ve standart k- ω türbülans modeli ile karşılaştırılmış ve deney sonuçlarını daha iyi bir şekilde temsil edebildiği görülmüştür. Farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sayısal sonuçların deney sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 3'te sunulmuştur.



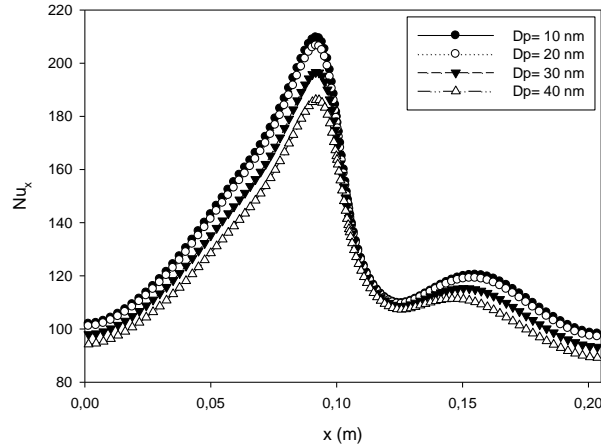
Şekil 3. Cu-H₂O nanoakışkanı için model sonuçlarının deney sonuçları ile ($\phi=1,5\%$) karşılaştırılması (Li vd., 2012).

3. Bulgular ve Tartışma

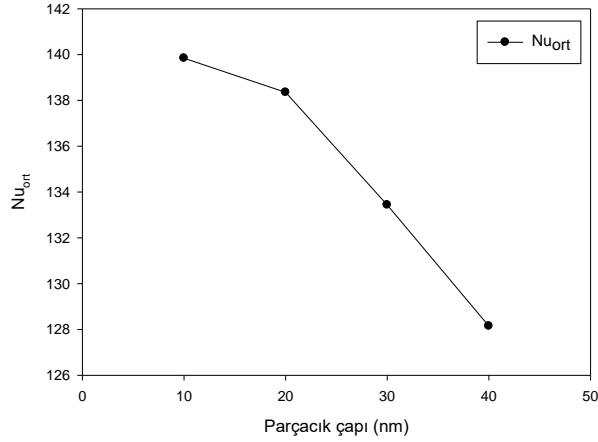
Bu bölümde sayısal sonuçlar 3 farklı parametre için incelenmiştir. Çalışmada incelenen parametrelerin sonuçları aşağıda sunulmuştur.

3.1 Al₂O₃-H₂O Nanoakışkanın Farklı Parçacık Çaplarında Isı Transferine Etkisi ($V_{plaka}=2$ m/s)

Bu parametrede Al₂O₃-H₂O nanoakışkanı kullanılarak oluşturulan bir çarpan jet için, farklı parçacık çaplarının ($D_p=10$ nm, 20 nm, 30 nm, 40 nm) ısı transferine etkisi incelenmiştir. Jet giriş sıcaklığı $T_{giriş}=20$ °C, $Re=16000$ ve plaka hızı $V_{plaka}=2$ m/s'dir. Şekil 4'te yerel Nusselt sayısını, farklı nanoparçacık çapları için değişimi gösterilmiştir. Şekil 5'te ise ortalama Nusselt sayısının değişimi sunulmuştur.

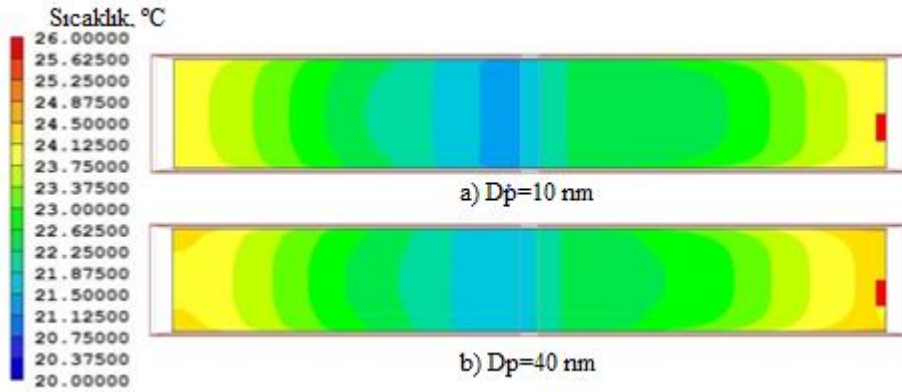


Şekil 4. Farklı parçacık çaplarının yerel Nusselt sayısına etkisi.



Şekil 5. Farklı parçacık çaplarının ortalama Nusselt sayısına etkisi.

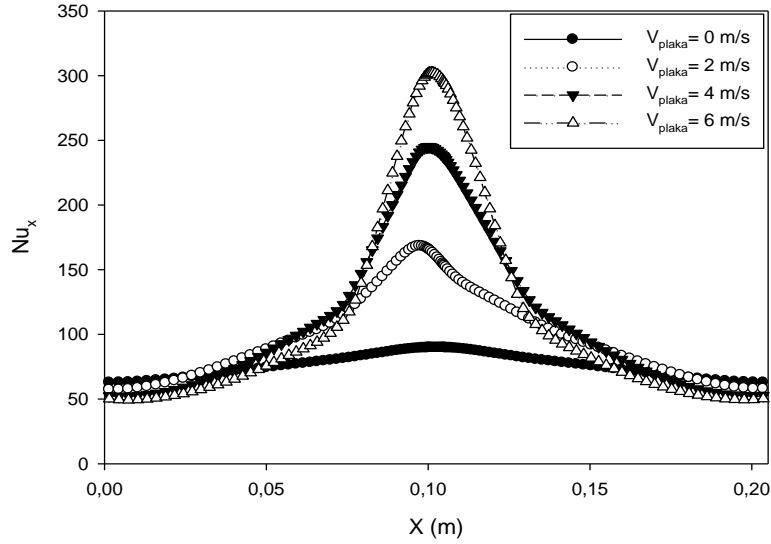
Nanoakışkan parçacık çapı azaldıkça (katı parçacık yüzey alanının artışına bağlı olarak) ortalama Nusselt sayısının arttığı ve yüzey sıcaklığının düştüğü belirlenmiştir. Ancak ortalama Nusselt sayısındaki bu artışın, azalan parçacık çapları için azalarak devam ettiği tespit edilmiştir. Parçacık çapı $D_p=40-30$ nm aralığında azaltıldığında ortalama Nusselt sayısında % 4,1'lik bir artış olduğu, $D_p=30-20$ nm aralığında azaltıldığında % 3,7'lik bir artış olduğu, $D_p=20-10$ nm aralığında azaltıldığında ise ısı transferinde % 1,1'lik bir artış olduğu belirlenmiştir. En yüksek ısı transfer artışının, $D_p=40-10$ nm aralığında azaltıldığında, ortalama Nusselt sayısında % 9,1 olarak meydana geldiği belirlenmiştir. Şekil 6'da plaka yüzeyinde oluşan sıcaklık konturları $D_p=10$ nm ve $D_p=40$ nm değerleri için gösterilmiştir.



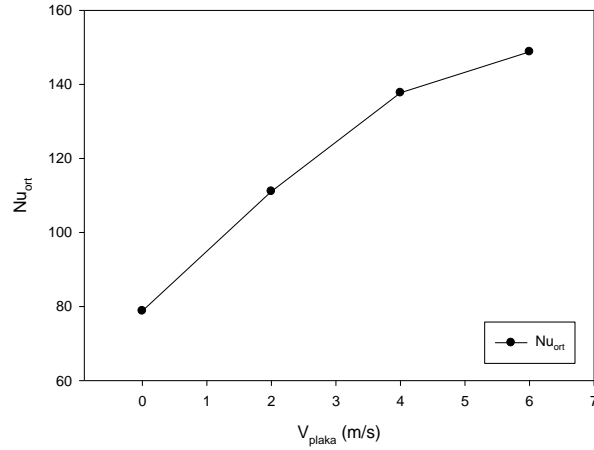
Şekil 6. Plaka Sıcaklık konturları (a) $D_p=10$ nm (b) $D_p=40$ nm

3.2 $Al_2O_3-H_2O$ Nanakışkanının Farklı Plaka Hızlarında Isı Transferine Etkisi ($V_{plaka}=0$ m/s, 2m/s, 4m/s, 6m/s)

Bu parametrede $Al_2O_3-H_2O$ nanoakışkanı kullanılarak oluşturulan bir çarpan jet için, farklı plaka hızlarının ($V_{plaka}=0$ m/s, 2m/s, 4m/s, 6m/s) ısı transferine etkisi incelenmiştir. Nanoakışkanlar $\phi=2,0$ hacimsel orandadır. Jet giriş sıcaklığı $T_{giriş}=20^\circ C$, ve Reynolds sayısı $Re=16000$ 'dir. Şekil 7'de farklı plaka hızları için elde edilen yerel Nusselt sayısının değişimi, Şekil 8'de ortalama Nusselt sayısının değişimi verilmiştir.



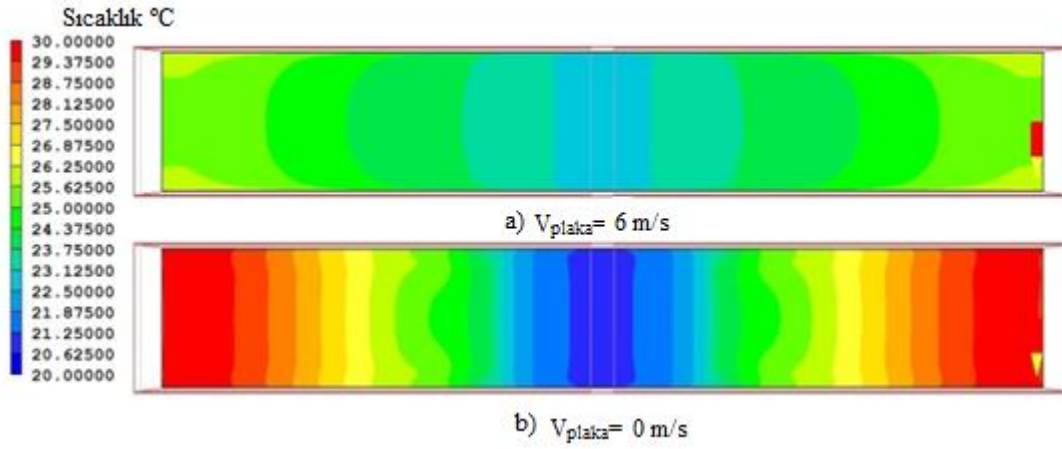
Şekil 7. Farklı plaka hızlarının yerel Nusselt sayısına etkisi.



Şekil 8. Farklı plaka hızlarının ortalama Nusselt sayısına etkisi.

Plaka hızı arttıkça özellikle çarpma bölgesinde yerel Nusselt sayısının arttığı, çarpma bölgesinde sağlanan yüksek ısı transfer etkisinin plaka hareket yönünün aksi yönünde yer değiştirdiği tespit edilmiştir. Plaka hızının artışına bağlı olarak Ortalama Nusselt sayısının (Nu_{ort}) değerinin de arttığı, ancak bu artışın azalarak devam ettiği tespit edilmiştir. Plaka hareketinin yönünde akan akışkan için, düşük hızlarda oluşan yerel Nusselt sayıları daha düşük, ters yönde oluşan yerel Nusselt sayılarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi; akışın plaka hareketine bağlı olarak hızının aynı yönde olması ve ters yönde olduğu bölgede hidrodinamik sınır tabakanın azalması ve ısı sınır tabakanın artmasından dolayı olduğu söylenebilir.

Plaka hızı arttıkça hidrodinamik sınır tabakanın arttığı dolayısıyla ısı sınır tabakanın azaldığı ve ısı taşınım katsayısının arttığı görülmüştür. Plaka hızı, $V_{plaka} = 0-2$ m/s aralığında artırıldığında Ortalama Nusselt sayısındaki artış (Nu_{ort}) % 40,9, $V_{plaka} = 2-4$ m/s aralığında artırıldığında Ortalama Nusselt sayısındaki artış (Nu_{ort}) %23,9, $V_{plaka} = 4-6$ m/s aralığında artırıldığında Ortalama Nusselt sayısındaki artış (Nu_{ort}) %8,1 olarak belirlenmiştir. Şekil 9'da farklı plaka hızları için çarpma plakası üzerinde oluşan sıcaklık konturları görülmektedir.



Şekil 9. Plaka Sıcaklık konturları a) $V_{plaka}=6$ m/s b) $V_{plaka}=0$ m/s.

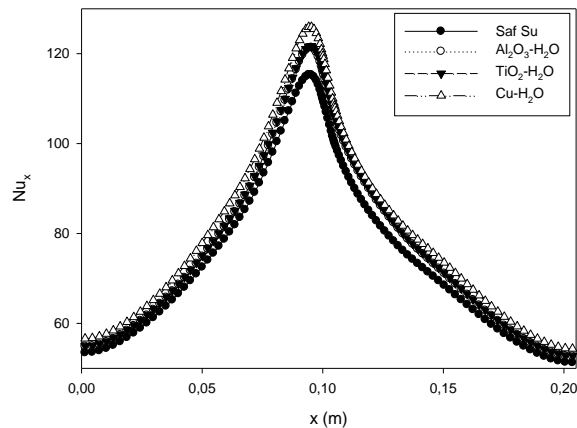
3.3 Farklı Tip Nanoakışkanların Isı Transferine Etkisi ($V_{plaka}=2$ m/s)

Bu parametrede farklı tip nanoakışkanlar kullanılarak (Cu-H₂O, Al₂O₃-H₂O, TiO₂-su ve saf su) bir çarpan jetin ısı transferine olan etkisi incelenmiştir. Nanoakışkanlar $\phi=2,0$ hacimsel orandadır. Jet giriş sıcaklığı $T_{giriş}=20^{\circ}\text{C}$, $Re=16000$ ve plaka hızı $V_{plaka}=2$ m/s'dir. Tablo 2'de 20°C 'deki nanoakışkanların termofiziksel özellikleri verilmiştir.

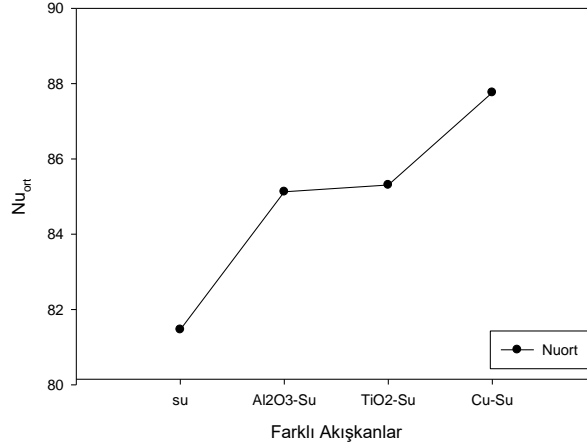
Tablo 2. 20°C 'deki nanoakışkanların termofiziksel özellikleri.

Nanoakışkan	Yoğunluk, $\rho(\text{kg/m}^3)$	Özgül ısı, $C_p, (\text{J/kgK})$	Dinamik Viskozite, $\mu(\text{Pa.s})$	Kinematik Viskozite, (m^2/s)	Isı İletim Katsayısı, $\lambda (\text{W/mK})$	Isıl Genleşme Katsayısı, $\beta (\text{m}^2/\text{s})$
Cu-H ₂ O	1316.672	3148.451	0.001099	0.000000835	0.6684	0.000161
Al ₂ O ₃ -H ₂ O	1055.836	3931.451	0.001044	0.000000989	0.6391	0.000154
TiO ₂ -H ₂ O	1063.236	3902.513	0.001044	0.000000982	0.6378	0.000153
Saf su	998.2	4182.0	0.000993	0.00000099	0.597	0.000143

Şekil 10'da farklı tip nanoakışkanlar için yerel Nusselt sayıları, Şekil 11'de farklı tip nanoakışkanların ortalama Nusselt sayısının değişimi verilmiştir.

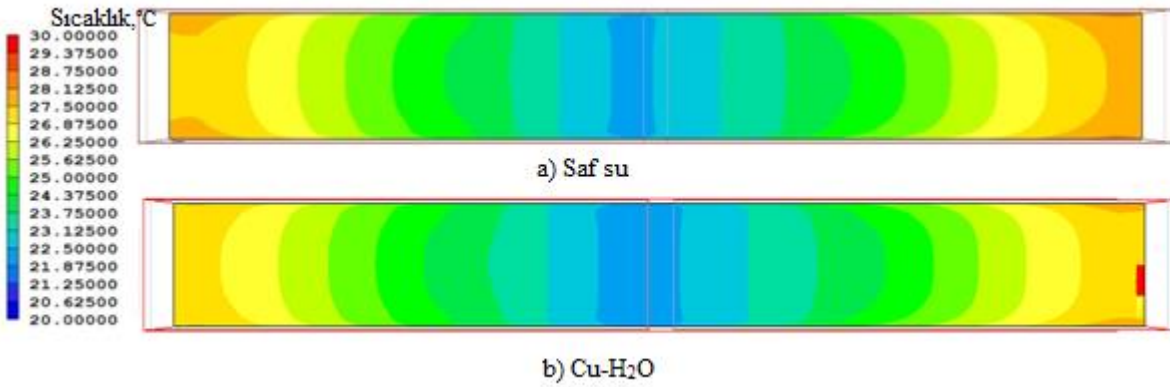


Şekil 10. Farklı nanoakışkanların yerel Nusselt sayısına etkisi.



Şekil 11. Farklı nanoakışkanların ortalama Nusselt sayısına etkisi.

Nanoakışkanların aynı hacimsel oranda ve Reynolds sayısında benzer akış özellikleri gösterdiği tespit edilmiştir. En iyi ısı transferi performansını Cu-H₂O nanoakışkanının gösterdiği belirlenmiştir. Cu-H₂O nanoakışkanı kullanılması durumunda; ortalama Nusselt sayısında TiO₂-H₂O'ye göre %2,9, Al₂O₃-H₂O nanoakışkanına göre %3,1 ve saf suya göre %7,7 artış olduğu tespit edilmiştir. Isı transferindeki en fazla artış, en yüksek ısı iletim katsayısı olan nanoakışkanda görülmüştür. Bu sebeple, nanoakışkan ısı iletim katsayısının önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir. Ayrıca konvansiyonel ısı transferi akışkanlarına göre (su), nanoakışkan kullanımının ısı transferinde belirgin bir artış sağlayabildiği tespit edilmiştir. Şekil 12'de farklı nanoakışkanlar için çarpma plakası üzerinde oluşan sıcaklık konturları gösterilmiştir. Sonuç olarak, farklı nanoakışkan kullanılması durumunda, en iyi ısı transferi performansını Cu-H₂O nanoakışkanının gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 12. Plaka Sıcaklık konturları a) Saf su, b) Cu-H₂O.

4.Sonuç

Bu çalışmada; tek bir hava jeti kullanılarak, yüksek ısı akılı hareketli bir plakadan olan ısı transferinin iyileştirilmesi farklı parametreler için (farklı parçacık çapları, farklı plaka hızları ve farklı tip nanoakışkanlar) sayısal olarak incelenmiştir. Sonuç olarak;

- Al₂O₃-H₂O nanoakışkanı kullanılması durumunda ($V_{\text{plaka}} = 2$ m/s), nanoparçacık çapı azaldıkça ortalama Nusselt sayısının arttığı ve yüzey sıcaklığının düştüğü, parçacık çapı $D_p = 40\text{nm}$ 'den $D_p = 10\text{nm}$ 'ye azaltıldığında ortalama Nusselt sayısında %9,1'lik bir artış olduğu tespit edilmiştir.
- Al₂O₃-H₂O nanoakışkanı kullanılması durumunda ($V_{\text{plaka}} = 0, 2, 4, 6$ m/s), plaka hızı arttıkça ortalama Nusselt sayısının arttığı, plaka hızı $V_{\text{plaka}} = 0$ m/s'den $V_{\text{plaka}} = 6$ m/s aralığında artırıldığında ortalama Nusselt sayısının %88,9 oranında artırılabilceği tespit edilmiştir.
- Farklı nanoakışkanların kullanılması durumunda (Cu-H₂O, Al₂O₃-H₂O, TiO₂-su ve saf su) ($V_{\text{plaka}} = 2$ m/s) ise, en iyi ısı transferi performansının Cu-H₂O nanoakışkanının gösterdiği tespit edilmiştir. Cu-H₂O nanoakışkanın saf suya göre % 7,7 oranında daha iyi ısı transferi sağladığı tespit edilmiştir.

- d. Bu alanda yapılacak gelecekteki çalışmalarda; farklı nanoakışkanların (hibrit nanoakışkanlar vb.) farklı geometrilerde, farklı parametreler için ele alınarak, ısı transferine ve akış özelliklerine etkisinin incelenebileceği değerlendirilmiştir.

Referanslar

- Barewar, S. D., Tawri, S., & Chougule, S. S. (2019). Heat transfer characteristics of free nanofluid impinging jet on flat surface with different jet to plate distance: An experimental investigation. *Chemical Engineering and Processing Intensification*, vol.136, pp.1-10. doi:10.1016/j.cep.2018.12.001
- Başaran, A., & Selimefendigil, F. (2013). Numerical study of heat transfer due to twinjets impingement onto an isothermal moving plate. *Mathematical and Computational Applications*, 18(3), 340-350. doi: 10.3390/mca18030340
- Batchelor G. K. (1977). Effect of Brownian-Motion on bulk stress in a suspension of spherical-particles", *Journal of Fluid Mechanics*, vol.83(1), pp.97-117. doi:10.1017/s0022112077001062
- Buonomo, B., Manca, O., Bondareva, N. S., & Sheremet, M. A. (2019). Thermal and fluid dynamic behaviors of confined slot jets impinging on an isothermal moving surface with nanofluids. *Energies*, vol.12(11), 2074. doi:10.3390/en12112074
- Choi, S. U., & Eastman, J. A. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles (No. ANL/MSD/CP-84938; CONF-951135-29). Argonne National Lab., IL (United States).
- Corcione M. (2011). Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids. *Energy Conversion and Management*, vol. 52(1), pp. 789-793. doi:10.1016/j.enconman.2010.06.072
- Devdatta, P.K., Debendra, K.D., & Ravikanth S.V. (2009). Application of nanofluids in heating building and reducing pollution , *Applied Energy*, vol.86, pp.2566-2573.
- Ersayın, E., & Selimefendigil, F. (2013). Numerical investigation of impinging jets with nanofluids on a moving plate. *Mathematical and Computational Applications*, vol.18(3), pp.428-437.
- Ho, S.A., Hyungdae, K., Hanglin, J., Soon Ho, K., Wonpyo, & C., Moo H.K. (2010). Experimental Study Of Critical Heat Flux Enhancement During Forced Convective Flow Boiling Of Nanofluid On A Short Heated Surface, *Int.J. Multiphase Flow*, vol.36, pp.375-384.
- Kakaç, S., & Pramuanjaroenkij, A. (2009). Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.52, pp.3187-3196. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.006
- Kasaeeian, A., Eshghi, A.T., & Sameti, M. (2015). A Review on The Applications of Nanofluids in Solar Energy Systems , *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol.43, pp.584-598. doi:10.1016/j.rser.2014.11.020
- Khan, I. A. (2021). Experimental validation of enhancement in thermal conductivity of titania/water nanofluid by the addition of silver nanoparticles. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.120, 104910. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104910
- Kilic M., & Başkaya Ş. (2017). Farklı geometride akış yönlendiriciler ve çarpan jet kullanarak yüksek ısı akımlı bir yüzeyden olan ısı transferinin iyileştirilmesi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol.32(3), pp.693-707. doi: 10.17341/gazimmfd.337616
- Kilic, M. (2013). Çarpmalı Akışkan Jetlerle Kanal içine Yerleştirilmiş Elemanlardan Olan Konveksiyonla Isı Transferinin Sayısal ve Deneysel Olarak incelenmesi (Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara).
- Kilic, M., & Ali, H. M. (2019). Numerical investigation of combined effect of nanofluids and multiple jets on heat transfer. *Thermal Science*, 23(5 Part B), 3165-3173. doi:10.2298/TSCI171204094K
- Kilic, M., & Ozcan, O. (2017). Numerical investigation of heat transfer and fluid flow of nanofluids with jets: *International Conference On Advances and Innovations in Engineering (ICAIE)*; pp.434-440.
- Lahari, M. C., Sai, P. S. T., Swamy, K. N., KrishnaMurthy, N., & Sharma, K. V. (2018). Investigation on heat transfer properties of water based TiO₂-ZnO nanofluids. In *IOP conference series: materials science and engineering* vol.45(1),pp.012092. doi:10.1088/1757-899X/455/1/012092

- Li., Xuan Y., & Yu F. (2012). "Experimental investigation of submerged single jet impingement using Cu-Water Nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, vol.36 (1), pp.426–433. doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.10.059
- Pak, B C., & Cho, Y. I.(1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer an International Journal*, vol.11(2), pp.151–170. doi: 10.1080/08916159808946559
- Peyghambarzadeh, S. M., Hashemabadi, S. H., Hoseini, S. M., & Jamnani, M. S. (2011). Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators. *International communications in heat and mass transfer*, vol.38(9), pp.1283-1290. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.07.001
- Sarkar, J., Ghosh, P., & Adil, A. (2015). A review on hybrid nanofluids: recent research, development and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.43, pp.164-177. doi:10.1016/j.rser.2014.11.023
- Selvakumar, P., & Suresh, S.,(2012). Convective Performance Of CuO/Water Nanofluid In An Electronic Heat Sink, *Exp., Thermal Fluid Science*,vol.40, pp.57-63. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2012.01.033
- Sharif, M. A. R., & Banerjee, A. (2009). Numerical analysis of heat transfer due to confined slot-jet impingement on a moving plate. *Applied Thermal Engineering*, vol.29(2-3), pp.532-540. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.03.011
- Sun, B., Zhang, Y., Yang, D., & Li, H. (2019). Experimental study on heat transfer characteristics of hybrid nanofluid jets. *Applied Thermal Engineering*, vol.151, pp.556-566. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.114920
- Suresh, S., Chandrasekar, S., & Sekhar, C. (2011). Experimental Studies on Heat Transfer and Friction Factor Characteristics of CuO/Water Nanofluid under Turbulent Flow in a Helically Dimpled Tube, *Exp.Thermal Fluid Sci.*, vol.35, pp.542-549. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2010.12.008
- Wang B.X., Zhou L.P., & Peng X.F. (2006). Surface and size effects on the specific heat capacity of nanoparticles, *International Journal of Thermophysics*, vol.27(1), pp.139–151.
- Xuan, Y., & Li, Q. (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and fluid flow*, vol.21(1), pp.58-64. doi: 10.1016/S0142-727X(99)00067-3



Ham Deri Yükleme Ekipmanlarının İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından AHP ve MAUT Yöntemleri ile Belirlenmesi

Determination of Raw Leather Loading Equipment in terms of Occupational Health and Safety by AHP and MAUT Methods

Güfte Caner Akın¹ , Tufan Öztürk² 

¹*İstanbul Gelişim Üniversitesi, İstanbul Gelişim Meslek Yüksekokulu, Mülkiyeti Koruma ve Güvenlik Bölümü, 34310 İstanbul, TÜRKİYE*

²*İstanbul Esenyurt Üniversitesi, İşletme ve Yönetim Bilimleri Fakültesi, Havacılık Yönetimi Bölümü, 34513 İstanbul, TÜRKİYE*

Başyuru/Received: 14/07/2021

Kabul / Accepted: 14/10/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Deri sektörü ekonomik bakımdan dünyada ve ülkemizde her geçen gün önemini artırırken, bir diğer taraftan ham derinin işlenmesinde kullanılan aşamalardan kaynaklı ciddi sağlık ve güvenlik problemleri ortaya çıkmaktadır. Ham derilerin tabakalama amacıyla ıslatma dolaplarına taşınması işlemi de bu aşamalardan biridir. Ham derinin taşınma işleminde bant, kazan ve iskele sistemleri kullanılmaktadır. Kullanılan bu sistemlerin her biri birbirinden farklı risk skoru, gerekli kişisel koruyucu donanım (KKD) maliyeti, sistem kurulum maliyeti, ekipman kullanım ömrü, deri yükleme süresi, yıllık tahmini periyodik kontrol ve bakım maliyeti ile ilave eğitim gerekliliği kriterlerini içermektedir. Bu çalışmada ham derinin yüklenmesinde kullanılan üç farklı sistem karşılaştırılmış ve kriterler bakımından sektöre en fazla toplam fayda sağlayacak yükleme sistemi belirlenmeye çalışılmıştır. Öncelikli olarak kriterler Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytical Hierarchy Process, AHP) yöntemi ile ağırlıklandırılmış ve sonrasında Çok Nitelikli Fayda Teorisi (Multi-Attribute Utility Theory, MAUT) yöntemi ile sıralanmıştır. Sektöre en fazla toplam fayda sağlayacak yükleme sisteminin kazan, en düşük fayda sağlayacak yükleme sisteminin ise iskele olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmada iş sağlığı ve güvenliği (İSG) bakımından ham deri yüklemesine özgü ekipman seçimine öneride bulunarak literatüre bir yenilik kazandırılmıştır. Sonuçlar İSG bakımından değerlendirilerek sektöre tavsiyelerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler

“İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği, Çalışma Ekonomisi ve Endüstri İlişkileri, İstatistiksel Analiz ve Uygulamalar”

Abstract

While the leather sector is increasing its importance every day in the world and our country in economic terms, on the other hand, serious health and safety problems are arising due to the stages in the processing of rawhide. The process of transporting rawhides to wetting cabinets for tanning is one of these stages. Belt, kier and scaffold systems are used in the transportation of rawhides. Each of these systems used includes the following: risk scores that are different from each other, cost of the necessary personal protective equipment (PPE), cost of system setup, expected life of the equipment, the loading time of the hide, cost of annual periodic control and maintenance (forecast), additional training requirement criteria. In this study, three different systems used in the loading of rawhide were compared. As a result of this comparison, it was aimed to determine which loading system would provide the highest total benefit to the sector based on the criteria. First of all, the criteria were weighted using the Analytical Hierarchy Process (AHP) technique. They were then ranked using the Multi-Attribute Utility Theory (MAUT). It was concluded that the loading system that will provide the highest total benefit to the sector is the kier and the loading system that will provide the lowest total benefit is the scaffold. In this study, an innovation has been brought to the literature by suggesting the selection of equipment specific to raw hide loading in terms of occupational health and safety. The results were evaluated in terms of occupational health and safety and recommendations were made to the industry.

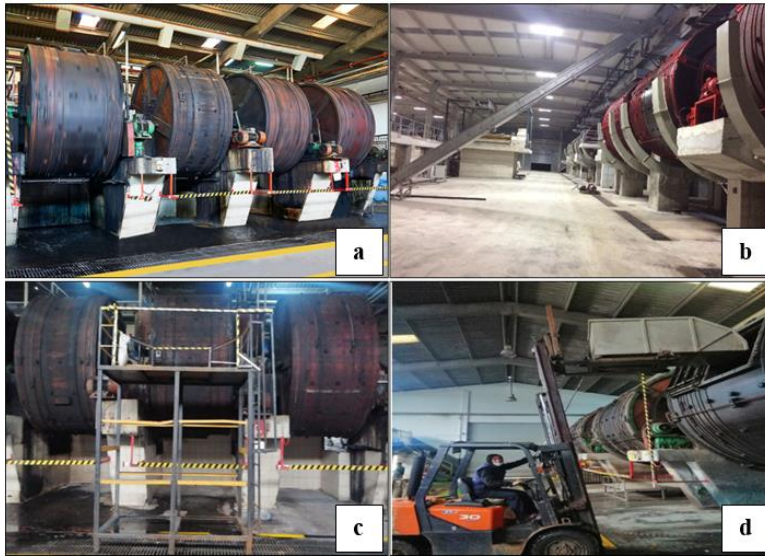
Key Words

“Occupational Health and Safety, Labour Economy and Industrial Relations, Statistical Analysis and Applications”

1. Giriş

Geçmişten günümüze tekstil sektörünün vazgeçilmez bir ürünü olan deri, teknolojinin de gelişmesi ile birlikte giyim materyali, mobilya, ayakkabı, çanta, toka, kemer, cüzdan gibi ürünlerin üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır (Jabrailov, 2006). Deri, küresel olarak 100 milyar dolarlık tahmini ticaret değeriyle en fazla satışı yapılan ürünler arasında yer almaktadır. Gelecekte deri ve deri ürünlerine olan talebin arzdan daha fazla olacağı da tahmin edilmektedir (Oruko, vd., 2020). 1970'li yıllardan itibaren Türk ve dünya ekonomisinde önemli bir yer tutan ve sürekli gelişim gösteren deri sektörü; yurtiçindeki ham deri kaynaklarının yanında ithal edilen ham deriyi de kullanarak yüksek oranda ihracat gerçekleştirmektedir (Genç vd., 2010). Bununla beraber, sektörde temel girdi olarak kullanılan ham derinin ülkemizde üretiminin yeterli ve standart bir sisteme dayanmadığı bilinmektedir. Bu nedenle de ham deriye duyulan ihtiyacı büyük bir kısmı ithalat yöntemi ile sağlanmaktadır. Sektörün geri kalan ham deri ihtiyacı ise yerli kesimhanelerden veya bireysel kesim yapan esnaftan karşılanmaktadır (Kaynak, 2016). Bu yöntemlerle elde edilen ham deri, İstanbul-Tuzla, Tekirdağ-Çorlu, Balıkesir-Gönen, Bolu-Gerede, İzmir-Menemen, Manisa-Kula, Balıkesir, Denizli, Ankara, Gaziantep, Hatay, Konya, Kayseri, Muğla, Uşak, Adana, Bursa, Antalya, Isparta'da yoğunlaşmış şekilde kurulmuş deri işleme imalathanelerinde işlenmektedir. Ülkemizdeki deri ve deri mamulleri imalatı sektöründe büyüklü küçüklü 6.544 firmanın faaliyet yürüttüğü bilinmektedir. Sektör, yıllık ortalama 65257 çalışan sayısı ile ülkedeki toplam istihdamın %4,6 'lık oranını oluşturarak önemli bir istihdam kaynağı sağlamaktadır (SGK, 2019). 2019 yılında sektörün gerçekleştirmiş olduğu ihracat seviyesi ise 1,63 milyar dolar seviyesindedir (T.C. Ticaret Bakanlığı İhracat Genel Müdürlüğü, 2020).

Sektörünün en temel girdisi olan hammadde, hayvanın sırtından yüzülmüş olan ham deridir. Ham derinin hayvandan yüzümünden sonraki kısa süre içerisinde işlenmesi gerekmektedir. Deri işlenmez ise aşırı bakteri oluşumu sebebiyle derideki lifler özelliğini kaybetmekte ve kullanılmaz hale gelmektedir. Ham deri işlenirken ön tabakalama, tabakalama ve finisaj gibi bir takım süreçlerden geçmektedir (Saravanabhavan, vd., 2004; Öry, vd., 1997; Black, vd., 2013) Tabakalama işlemi deriye yumuşaklık, güç ve suya dayanıklılık kazandırılan önemli bir aşamadır (Ramamurthy, vd., 2014). Tabakalama sürecinde, ham derinin üzerinde bakteri üretimi oluşmadan krom, solvent vb. tehlikeli kimyasal maddeler içerisinde ıslatılması gerekmektedir. Bu ıslatma işlemi ve sonrasındaki kireçleme işlemleri havuzlarda, dolaplarda veya pervaneli teknelerde gerçekleştirilmektedir (T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, 2011). Özellikle sektörde de daha fazla kullanılan sığır derilerinin yapısından dolayı bu işlemlerde dolap ekipmanı tercih edilmektedir (T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İSG Genel Müdürlüğü). ıslatma, kireçlik işlemlerinde kullanılan Şekil 1' de gösterilen bu dolaplar; yaklaşık olarak 2-3 metre çap ve eninde, dakikada 3 ila 5 tur devir yapacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 1. (a) ıslatma ve Kireçlik Dolapları; (b) Bant Sistemi; (c) İskele Sistemi; (d) Kazan Sistemi (Karaca Deri Sanayi, 2020)

Deri sektöründe ham derinin ıslatma ve kireçleme işlemi için dolaplara (yaklaşık 10 tonluk mal alan dolaplar) yüklenmesi aşamasında

- Bant sistemi
- İskele sistemi
- Kazan sistemi kullanılabilir.

Deri sektörünün ekonomiye önemli katkılarına rağmen derinin üretiminde kullanılan işlemlerden kaynaklı çevre, halk sağlığı ve çalışan sağlığı üzerine olumsuz etkileri de ortaya çıkmaktadır (Oruko, vd., 2020). Ülkemizde deri sektöründe 2019 yılı SGK iş kazası verileri incelendiğinde 1039 çalışanın iş kazası geçirdiği ve bu sayının da diğer tüm sektörler içinde %2,45'lik orana denk geldiği görülmüştür.

Aynı sektörde 4 çalışanın da meslek hastalığına yakalandığı ve bunun da diğer tüm sektörler içinde %3,67' lik bir orana denk geldiği belirlenmiştir (SGK, 2019).

Dünyada ve ülkemizde deri sektöründeki üretim yöntemlerinin sağlık ve güvenlik üzerine etkilerini konu alan çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu kapsamda: Bangladeş'teki deri tabakhane işçilerinin istihdam türü olan ıslak terbiye, kuru terbiye ve çeşitli işleri içeren çalışma ve istihdam süresinin sağlık durumları üzerindeki etkilerin incelendiği çalışmada, işçilerin solunum ve cilt hastalıklarından müzdarip oldukları sonucuna ulaşılmıştır (Rabbani, vd., 2020). Tabakhane işçileri üzerinde yapılan bir başka çalışmada, krom ve deri tozunun akciğer fonksiyonları üzerindeki olumsuz etkilerine vurgu yapılmıştır (Chandrasekaran, vd., 2014). Genel sağlık anketi-12 (General Health Questionnaire, GHQ-12) kullanılarak 2015 ilk yarısında 286 erkek tabakhane işçisinden veriler toplanarak yapılan bir başka çalışmada; tabakhane işçilerinin ciddi zihinsel bozukluklara sahip olduğu ve bu durumu da çalışanların yaş, eğitim, çalışma şekli ve ergonomik koşulların belirlediği sonucu vurgulanmıştır (Singh ve Kashyap, 2016). Pakistan Karachi şehrinde çalışan tabakhane çalışanları üzerinde yapılan araştırmada, çalışanlarda genel olarak nefes darlığı, göğüs sıkışması, aşırı öksürük ve bunlara bağlı uyku bozukluklarının görüldüğü ortaya konmuştur (Jamal, vd., 2017). 8 adet tabakhane görev yapan 120 çalışan üzerinde yapılan bir anket çalışmasında, bu işyerlerinin yaklaşık %75 inde bir İSG yönetim sistemi olmadığı belirlenmiştir. Bu çalışanların büyük çoğunluğunun koruyucu ekipman kullanmadığı ve İSG farkındalıklarının oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Bununla beraber çalışanların ergonomik, kimyasal, biyolojik, psikososyal risklere maruz kaldığı vurgulanmıştır (Bayleyegn, 2019). Hindistan'daki erkek tabakhane işçilerinde GHQ-12 anketinin güvenilirliğinin, geçerliliğinin ve faktör yapısının incelendiği çalışmada, ham derilerin yüklenmesi ve boşaltılması, taşınması, kaldırılması gibi işlemlerin tehlikesine dikkat çekilmiş ve bu koşullarda çalışmanın ruh sağlığı bozukluğunu artırdığı vurgulanmıştır (Kashyap ve Singh, 2007). Sahra altı Afrika'da krom tabakalama işlemlerinin irdelendiği ve alternatiflerinin araştırıldığı çalışmada, kromun çalışan ve çevreye zararlı sonuçları vurgulanmıştır. Çalışmada, işlenmiş derinin yüksek kalitesi için, deri uzmanlarının modern yöntemlerden ziyade geleneksel yöntemlerle derinin işlenmesi gerektiğini belirttikleri de vurgulanmıştır (Oruko, vd., 2020). Gelecekte deri sektöründe kullanılacak modern yöntemlerin yanında kaliteli deri üretimi için geleneksel üretim yöntemlerinin de devam edeceği anlaşılmaktadır. Bu nedenle geleneksel yöntemlerin kullanıldığı işletmelerin İSG bakımından ihtiyacının gelecekte de devam edeceği değerlendirilmektedir. Hindistan'da tabakhane çalışanlarına yapılan bir anket araştırmasında, işçilerde solunum bozuklukları, deri ve bel ağrısı şikayetlerinin sık meydana geldiği belirlenmiştir (Öry, vd., 1997). İstanbul, Tuzla Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunan 23 deri fabrikasında çalışan 730 işçinin klinik muayenesinin yapıldığı çalışmada, çalışanların genel solunum problemleri yaşadıkları tespit edilmiştir. Aynı çalışmada, tabakhane çalışan işçilerin, biyolojik, fiziksel ve kimyasal tehlikeler ile iş kazalarından etkilendikleri vurgulanmıştır (İşsever, vd., 2007). Tabakhane çalışanları arasında, ıslak zeminde kayıp düşme ve kesim esnasında yaralanma gibi iş kazaları yaygın şekilde meydana gelmektedir. Bununla beraber deri işlemede kullanılan dönerli tamburlar, silindirler ve kesici bıçaklardan kaynaklı yaralamalar da sıklıkla ortaya çıkmaktadır. Derilerin manuel yöntemlerle kaldırılması ve makinalardan kaynaklı gürültü de çalışanı olumsuz etkileyen durumlar arasındadır (İşsever, vd., 2007). Güneydoğu Etiyopya, Mojo kasabesindeki tabakhane işçilerinin solunum semptomları ile mesleki risk faktörleri arasındaki ilişkinin belirlenmeye çalışıldığı araştırmada, tabakhane aktif çalışanlar ile 12 aydır bu ortamdan uzak kalmış çalışanlar karşılaştırılmıştır. Söz konusu araştırmada tabakhane çalışma durumunun ciddi oranda solunum kalitesini düşürdüğü bulgusuna ulaşılmıştır. Bu sonuçların ortaya çıkmasında da İSG eğitiminin, uygun havalandırma sisteminin ve uygun kişisel koruyucu donanımın yetersiz oluşu önemli sebepler olarak gösterilmiştir (Dalju, vd., 2019).

Geçmiş çalışmalar incelendiğinde tabakhane çalışanlarının genel olarak solunum, deri, psikolojik, bel ve eklem problemleri yaşadıkları görülmektedir. Bu problemlerin oluşmasında, kullanılan kimyasalların özelliklerinin, malzeme taşıma yöntem ve araç gereçlerinin, yöntemin ıslak veya kuru olma durumunun, personelin aldığı eğitimin niteliğinin, kişisel koruyucu donanım kullanma durumunun etkili olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca meydana gelen bu iş kazaları ve meslek hastalıklarının bir bölümünün doğru yöntemin seçilememiş olmasından kaynaklı olabileceği, gerek sektör yetkilileri gerekse konu uzmanlarının görüşleri arasındadır (Caner Akın ve Oral, 2020). Bu nedenle yapılacak bilimsel araştırmalarla prosesin yapısına uygun yöntemin belirlenmesi ile ortaya çıkabilecek olası iş kazaları ve meslek hastalıklarının önlenileceği değerlendirilmektedir. Bu çalışmayla, derinin taşınması ve dolaplara yüklenmesinde kullanılan üç farklı yöntemin, yedi kriter bakımından ağırlıklandırılması ve optimum yöntemin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan literatür çalışmasında, sistem içinde mutlaka kullanılması gereken bu üç yöntemden hangisinin İSG risk skoru, KKD gerekliliği, sistem kurulum maliyeti, ekipman kullanım ömrü, deri yükleme süresi, periyodik kontrol ve bakım maliyeti, ilave eğitim gerekliliği bakımından optimum olduğunun belirlendiği bir çalışmaya rast gelinmemiştir. Çalışmanın bu özelliği ile de literatüre yenilik katacağı ve doğru yöntemin seçilmesindeki işletmelerin karar sürecini destekleyeceği değerlendirilmektedir.

2. Metot ve Yöntem

Ham derinin işlenmesinde önemli bir yer tutan ve dolaplara deri yükleme işleminde kullanılan 3 farklı alternatifte ait kriterler, AHP yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. Her bir karar alternatifini, karar vericinin kriterlerini yakalama derecesine göre sıralayan AHP yönteminin bu çalışmada seçilmesinin nedenleri;

- Kalitatif ve kantitatif veri türüne uygun olması,
- Hesaplamalarda ek bir yazılım programına ihtiyaç duyulmaması,
- Yöntemin farklı bilgi, tecrübe ve eğitim sahibi bireylerin kararlarını birleştirerek tek bir sonuca ulaştırılabilir olması,

olarak gösterilebilir (Caner Akın vd., 2020; Caner Akın 2020).

Ağırlıklandırılan kriterler sonucu, MAUT yöntemi ile alternatifler faydalı alternatiften faydasız alternatife doğru sıralanmıştır. Birden fazla ölçütlü ve birbiri ile çelişen kriterlerin sıralanmasındaki problemlere uygunluğu nedeniyle sıralamada MAUT yöntemi tercih edilmiştir (Zionts, 1979).

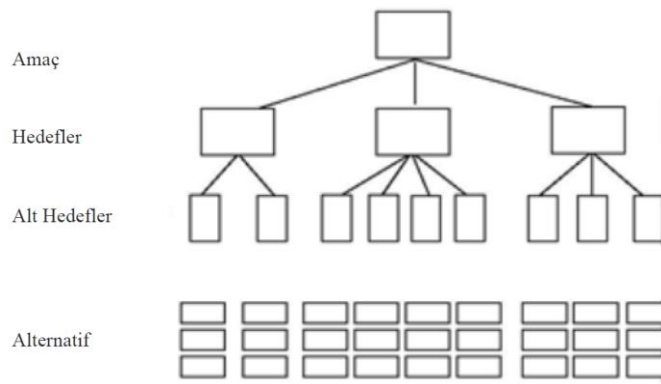
2.1. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP)

AHP yöntemi Churchman ve Ackoff (1954) tarafından uygulanmış basit ağırlıklı toplamlar (Simple Weighted Sum) yönteminden sonra en fazla kullanılan yöntem olmuştur. AHP yöntemi, ilk kez Myers ve Alpert (1968) tarafından ortaya atılmış ve sonrasında Saaty (1980) tarafından geliştirilmiştir. Saaty (1980)'in geliştirdiği 1 ve 9 arasındaki ölçek, günümüzde kullanılan AHP yönteminin temeli olmuştur. AHP yönteminin basit ağırlıklar toplamı yöntemine göre en önemli üstünlüğü, nicel ve nitel düşüncelerin, karar alma sürecinde kullanılmasına imkan vermesidir (Eroğlu ve Lorcu, 2007).

AHP yöntemi dört ana aşamadan oluşmaktadır (Zahedi, 1986).

2.1.1. Probleme ait hiyerarşik bir yapı oluşturulması

Bu aşamada, araştırmanın alternatifleri ve kriterleri belirlenmektedir. Belirlenen kriterlerin her birine, konunun uzman görüşü veya literatürdeki sonuçlar doğrultusunda ağırlıklar tanınlanmaktadır. Kriterler ve alt kriterler Şekil 2'de gösterildiği biçimde hiyerarşik bir sistemle düzenlenerek, karar alma süreci kolaylaştırılmaktadır (Eroğlu ve Lorcu, 2007).



Şekil 2. AHP'nin Hiyerarşik Yapısı (Sarul ve Eren, 2016)

2.1.2. İkili karşılaştırma matrisinin elde edilmesi

Bu aşamada, her bir kriter diğer kriterlerle ayrı ayrı karşılaştırılarak eşit önemde, az önemli, oldukça önemli, çok önemli ve son derece önemli şeklinde ölçeklendirilmektedir.

Kriterlerin karşılaştırılmasında kullanılan önem skalası Çizelge 1'de gösterilmiştir. Bu karşılaştırmalar sonucunda konu bakımından ölçeklerin önem dereceleri belirlenmektedir (Saaty, 1980).

Tablo 1. Karşılaştırmada Kullanılan Önem Dereceleri (1-9 Önem Skalası) (Senger ve Karadağ Albayrak, 2016)

Önem Derecesi	Sınıflama Problemleri	Sıralama Problemleri
1	Eşit Önemli	İki faaliyet amaca eşit düzeyde katkıda bulunur
3	Birinin diğerine göre çok az önemli olması	Tecrübe ve yargı bir faaliyeti diğerine çok az derecede tercih ettirir
5	Kuvvetli derecede önemli	Tecrübe ve yargı bir faaliyeti diğerine kuvvetli bir şekilde tercih ettirir
7	Çok kuvvetli düzeyde önemli	Bir faaliyet güçlü bir şekilde tercih edilir ve baskınlığı uygulamada rahatlıkla görülür
9	Aşırı derecede önemli	Bir faaliyetin diğerine tercih edilmesine ilişkin kanıtlar çok büyük bir güvenilirliğe sahiptir
2,4,6,8	Ortalama değerler	Uzlaşma gerektiğinde kullanılmak üzere yukarıda listelenen yargılar arasına düşen değerler
	Reciprocal	Tersi karşılaştırmalar için

2.1.3. Kriter ağırlıklarının tutarlılığının hesaplanması

Kriterlere önem derecesi atayan araştırmacının tutarlılığının ölçülmesi amacıyla karşılaştırma matrisine ait tutarlılık (CR) değeri hesaplanmaktadır (Hafeez, vd., 2007). Tutarlılık değerinin 0,10'dan küçük hesaplanması durumunda, araştırmacının tutarlı şekilde önem derecesi ataması yaptığı sonucuna varılmaktadır. Bu değer 0,10'dan büyük hesaplanması durumunda ise yapılan önem derecesi atama işleminin yenilenmesi gerekmektedir.

Tablo 2. Tutarlılık İndeks Değerleri (Sarul ve Eren, 2016)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,56	1,59

2.1.4. Nihai öncelik değerine göre alternatiflerin seçilmesi

Elde edilen karşılaştırma matrisi aracılığı ile optimum alternatif belirlenmektedir (Hafeez, vd., 2007). AHP yönteminin son aşamasında her bir alternatif puanlandırılarak bir öncelik vektörü elde edilmektedir. Bunun için; ikili karşılaştırma matrisin, her bir sütununun toplamı hesaplanıp, her bir matris elemanı toplam değere bölünmektedir. Böylece öncelik vektörlerinin tamamı kullanılarak bir karma öncelik vektörü elde edilir. Bu karma öncelik vektörü kullanılarak uygun alternatifin seçimi yapılmaktadır (Zahedi, 1986).

2.2. Çok Nitelikli Fayda Teorisi (MAUT)

MAUT yöntemi ilk kez Fisburn (1967) ve Keeney (1974) tarafından kullanılmıştır. Bu yöntem Loken tarafından 2007 yılında geliştirilmiştir. Bu yöntemin kullanımı son dönemde oldukça çoğalmıştır (Ömürbek, vd., 2016). Birçok sorunun çözümünde ve alternatif seçiminde kullanılan bu yöntem, acil durum yöneticileri tarafından da bazı karar alma süreçlerinde kullanılmıştır (Konuskan ve Uygun, 2014). MAUT yöntemi kriterler verilerinin, 0 ila 1 arasında orantılı olarak ifade edilip tekrar sıralanması olarak düşünülebilir. Bu yöntemde, hem nicel hem de nitel kriterler dikkate alınarak, alternatif seçimi yapılabilmektedir. Bu yöntemle sıralanacak kriterlerin maksimum veya minimum olma durumlarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu amaçla, toplam faydayı destekleyecek kriterin maksimum düzeyde tutulması, toplam faydayı azaltıcı etki gösteren kriterlerin de minimum düzeyde tutulması gerekmektedir.

Bu yöntemde fayda, kriterleri karşılaştırmak ve / veya birleştirmek amacıyla bir fonksiyon şeklinde oluşturulmaktadır. Tek bir kritere (x) göre, fayda u (x) şeklinde gösterilmektedir (Keeney, vd., 1993). İstenen, aşağıda gösterilen toplam faydayı eden U_i değerinin maksimum olma durumudur.

$$U_i = \sum_{j=1}^m w_j u_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

U_i = Her bir alternatife ait toplam fayda değeri
 u_{ij} = Her bir alternatifin fayda değeri
 w_j = AHP yöntemi ile hesaplanan ağırlık
 m = Kriter sayısı
 n = Alternatif sayısı

Bu yöntem aşağıdaki temel adımlardan oluşmaktadır.

- Adım 1: Karar matrisi oluşturulur.
- Adım 2: AHP temelli olarak elde edilen ağırlıklar kullanılır.

$$\sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

- Adım 3: Her bir fayda değeri $u_i(x_i)$ maksimum ya da minimum olma şartına bağlı olarak normalize edilmektedir.

$$u_i(x_i) = \frac{x - x_i^-}{x_i^+ - x_i^-} \quad (\text{Maksimize edilmesi için}) \quad (3)$$

$$u_i(x_i) = \frac{x_i^+ - x}{x_i^+ - x_i^-} \quad (\text{Minimize edilmesi için}) \quad (4)$$

x_i^+ = ilgili sütundaki maksimum değer ; x_i^- = ilgili sütundaki minimum değer

- Adım 4: Toplam fayda hesaplanır.

$$U_i = \sum_{j=1}^m w_j u_{ij} \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n \quad , \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

- Adım 5: Alternatif yöntemler toplam fayda puanı fazla olandan az olana doğru sıralanır.

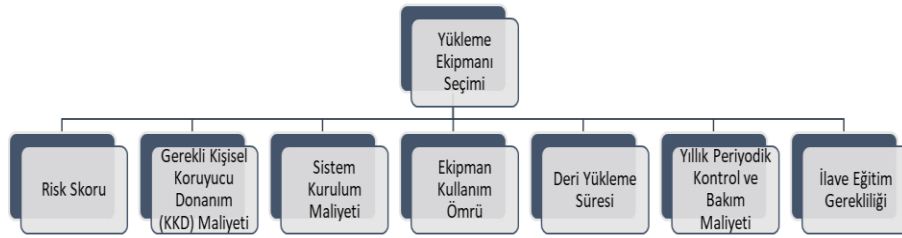
3. Uygulama

3.1. AHP Yöntemi İle Kriterlerin Ağırlıklandırılması

3.1.1. AHP hiyerarşisinin oluşturulması

İlk adımda alternatiflerin seçiminde kullanılacak 7 adet kriter çalışmanın sınırlarında belirtilen fabrikanın işvereni ve bu işletmede çalışan İSG uzmanı tarafından belirlenmiştir. Kriterler aşağıda sıralanmış ve Şekil 3’de sunulan AHP hiyerarşisi oluşturulmuştur.

- Risk Skoru (5x5 Matris Yöntemine göre)
- Gerekli KKD Maliyeti
- Sistem Kurulum Maliyeti
- Ekipman Kullanım Ömrü
- 10 tonluk Deri Yükleme Süresi
- Yıllık Tahmini Periyodik Kontrol ve Bakım Maliyeti
- İlave Eğitim Gerekliliği



Şekil 3. AHP Hiyerarşisi

3.1.2. İkili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması

Tablo 1’de gösterilen 1-9 önem dereceleri dikkate alınarak tüm kriterler derecelendirilmiştir. Derecelendirme işlemi bir kriterin diğer kriterden ne kadar daha önemli olduğunu ifade etmektedir. Oluşturulan karşılaştırma matrisi Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Kriterler İçin İkili Karşılaştırma Matrisi

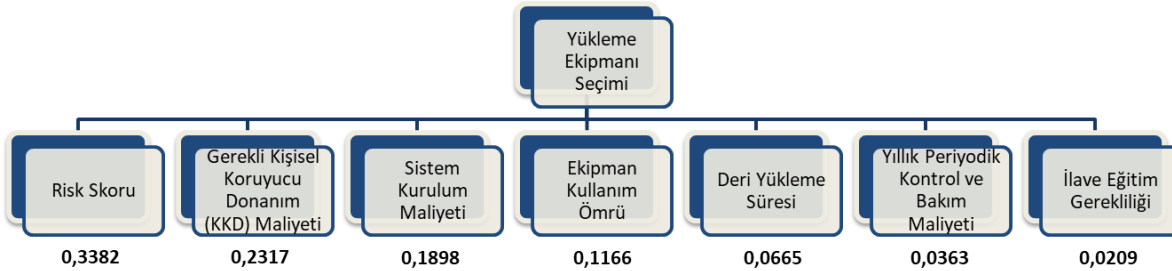
Karşılaştırma Tablosu	Risk Skoru (OxŞ)	KKD Gerekliliği (TL)	Sistem Kurulum Maliyeti (TL)	Ekipman Kullanım Ömrü (Ay)	10 Ton Deri Yükleme Süresi (Adam/saat)	Yıllık Tahmini Periyodik Kontrol ve Bakım Maliyeti (TL)	İlave Eğitim Gerekliliği Maliyeti (TL)
Risk Skoru (OxŞ)	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	7,00	9,00
KKD Gerekliliği (TL)	0,50	1,00	2,00	3,00	5,00	6,00	7,00
Sistem Kurulum Maliyeti (TL)	0,33	0,50	1,00	3,00	5,00	7,00	7,00
Ekipman Kullanım Ömrü (Ay)	0,25	0,33	0,33	1,00	3,00	5,00	7,00
10 Ton Deri Yükleme Süresi (Adam/saat)	0,20	0,20	0,20	0,33	1,00	3,00	5,00
Yıllık Tahmini Periyodik Kontrol ve Bakım Maliyeti (TL)	0,14	0,17	0,14	0,20	0,20	1,00	3,00
İlave Eğitim Gerekliliği Maliyeti (TL)	0,11	0,14	0,14	0,14	0,11	0,14	1,00
Toplam	2,54	4,34	6,82	11,68	19,31	29,14	39,00

Karşılaştırma matrislerindeki her bir sütun toplamı, 1'e eşitlenmiş ve sonrasında her bir hücredeki elemana oran oranı yöntemiyle yeni bir değer atanarak karşılaştırma matrisi normalize edilmiştir. Normalize edilen matrisin her bir satıra ait ortalama değeri ile de öncelik vektörü elde edilmiştir. Bu yöntemle oluşturulan Normalize Edilmiş Karşılaştırma Matrisi ve Öncelik Vektörü Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Kriterler İçin Normalize Edilmiş Karşılaştırma Matrisi ve Öncelik Vektörü

Karşılaştırma Tablosu	Risk Skoru (OxŞ)	KKD Gerekliliği (TL)	Sistem Kurulum Maliyeti (TL)	Ekipman Kullanım Ömrü (Ay)	10 Ton Deri Yükleme Süresi (Adam/saat)	Yıllık Tahmini Periyodik Kontrol ve Bakım Maliyeti (TL)	İlave Eğitim Gerekliliği Maliyeti (TL)
Risk Skoru (OxŞ)	0,48	0,52	0,47	0,36	0,28	0,28	0,30
KKD Gerekliliği (TL)	0,24	0,26	0,32	0,27	0,28	0,24	0,23
Sistem Kurulum Maliyeti (TL)	0,16	0,13	0,16	0,27	0,28	0,28	0,23
Ekipman Kullanım Ömrü (Ay)	0,12	0,09	0,05	0,09	0,17	0,20	0,23
10 Ton Deri Yükleme Süresi (Adam/saat)	0,10	0,05	0,03	0,03	0,06	0,12	0,17
Yıllık Tahmini Periyodik Kontrol ve Bakım Maliyeti (TL)	0,07	0,04	0,02	0,02	0,01	0,04	0,10
İlave Eğitim Gerekliliği Maliyeti (TL)	0,05	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03

Bu işlem sonrasında, Tablo 4'de belirtilen AHP hiyerarşisindeki her bir kriterin ağırlıkları (w_i), satır haline dönüştürülmüş (w_j) ve Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Ağırlandırılmış AHP Hiyerarşisi

3.1.3. Verilerin doğruluğu - validasyon

Kriterlerin karşılaştırma işlemini yapan araştırmacının tutarlılığını gösteren karşılaştırma matrisinin tutarlılık (CR) değerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Tablo 4'de belirtilen öncelik vektörleri hesaplandıktan sonra elde edilen vektör değerleri, Tablo 3'de gösterilen başlangıç adımıdaki karşılaştırma matrisi ile çarpılarak tüm öncelikler matrisi (d_i) oluşturulmuştur.

Elde edilen d_i değerleri öncelik vektörlerine (w_i) bölünerek her bir değerlendirme faktörüne ilişkin temel değerler (E_i) aşağıdaki Denklem 6 kullanılarak elde edilmiştir.

$$E_i = \frac{d_i}{w_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

Temel değerlerin aritmetik ortalaması alınarak karşılaştırmaya ilişkin temel değer olan, diğer bir tanımlamayla bir kare matrisin özdeğerleri arasındaki en büyük değeri ifade eden λ hesaplanmıştır.

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (7)$$

λ hesaplandıktan sonra tutarlılık göstergesi (CI) Denklem 8'den yararlanarak bulunmuştur.

$$CI = \frac{(\lambda - n)}{(n - 1)} \quad (8)$$

Tutarlılık oranının (CR) hesaplanması için, elde edilen CI tutarlılık göstergesi değeri Denklem 9 kullanılarak Tablo 2'deki tutarlılık indeks değerine (RI) bölünmüştür.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (9)$$

Tutarlılık hesaplamalarına ait sonuçlar Tablo 5'de gösterilmiştir.

Tablo 5. Tutarlılık Sonuçları

d_i	E_i	λ	CI	CR
2,6123	7,7252			
1,8270	7,8855			
1,5013	7,9096			
0,8691	7,4532	7,4291	0,0715	0,0542
0,4707	7,0760			
0,2496	6,8704			
0,1479	7,0834			

Bir karşılaştırma matrisinin tutarlı olabilmesi için en büyük özdeğerin (λ) matris boyuna (n) eşit olması gerekir (Uzun ve Kazan, 2016). CR tutarlılık oranının 0,1'in altında olması güvenilir ve gerçekçi sonuca ulaşıldığının göstergesidir (Önder ve Önder, 2015).

3.2. MAUT Yöntemi ile Alternatiflerin Toplam Fayda Bakımından Sıralanması

Alternatifler fayda bakımından sıralanırken; “ekipman kullanım ömrü” kriterinin maksimum; “risk skoru”, “gerekli kişisel koruyucu donanım maliyeti”, “sistem kurulum maliyeti”, “10 tonluk deri yükleme süresi”, “yıllık tahmini periyodik kontrol ve bakım maliyeti”, “ilave eğitim gerekliliği” kriterlerinin ise minimum düzeyde tutulması amaçlanmıştır.

Bu aşamada ilk olarak üç farklı yönteme ait tüm kriter değerleri belirlenerek Tablo 6' da verilen karar matrisi elde edilmiştir.

Tablo 6. Karar Matrisi

Sıra Nu.	Taşıma ve Yükleme Sistemi	Yöntemin Seçilmesinde Etkili Kriterler						
		Risk Skoru (OxŞ)	KKD Gerekliliği (TL)	Sistem Kurulum Maliyeti (TL)	Ekipman Kullanım Ömrü (Ay)	10 Ton Deri Yükleme Süresi (Adam/saat)	Yıllık Tahmini Periyodik Kontrol ve Bakım Maliyeti (TL)	İlave Eğitim Gerekliliği Maliyeti (TL)
1	Bant Sistemi	12,0000	130,0000	70000,0000	96,0000	120,0000	600,0000	0,0000
2	İskele Sistemi	20,0000	1000,0000	10000,0000	84,0000	120,0000	500,0000	1600,0000
3	Kazan Sistemi	6,0000	200,0000	5000,0000	84,0000	40,0000	100,0000	1255,0000
Toplam		38,0000	1330,0000	85000,0000	264,0000	280,0000	1200,0000	2855,0000

Tablo 6; sektördeki firmaların risk analizi belgelerinden, İSG harcama listelerinden, ekipman kullanım, bakım ve güvenlik talimatlarından, iş emirlerinden ve bu deri sektörlerine İSG hizmeti sunan ortak sağlık güvenlik biriminden (OSGB) elde edilen veriler ile oluşturulmuştur. Karar matrisindeki veriler, Denklem (2)'de kullanılarak normalize edilmiş matris oluşturulmuş ve Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Normalize Edilmiş Matris Tablosu

Yöntemin Seçilmesinde Etkili Kriterler

Sıra Nu.	Taşıma ve Yükleme Sistemi	Yöntemin Seçilmesinde Etkili Kriterler						
		Risk Skoru (Ox\$)	KKD Gerekliliği (TL)	Sistem Kurulum Maliyeti (TL)	Ekipman Kullanım Ömrü (Ay)	10 Ton Deri Yükleme Süresi (Adam/saat)	Yıllık Tahmini Periyodik Kontrol ve Bakım Maliyeti (TL)	İlave Eğitim Gerekliliği Maliyeti (TL)
1	Bant Sistemi	0,3158	0,0977	0,8235	0,3636	0,4286	0,5000	0,0000
2	İskele Sistemi	0,5263	0,7519	0,1176	0,3182	0,4286	0,4167	0,5604
3	Kazan Sistemi	0,1579	0,1504	0,0588	0,3182	0,1429	0,0833	0,4396
Sütun Maksimum Değeri		0,5263	0,7519	0,8235	0,3636	0,4286	0,5000	0,5604
Sütun Minimum Değeri		0,1579	0,0977	0,0588	0,3182	0,1429	0,0833	0,0000

Tablo 7'nin her bir sütununa ait maksimum (x_i^+) ve minimum (x_i^-) değerler hesaplanarak sütun sonlarında gösterilmiştir. Tablo 7'de verilen matriste, her bir kritere ait faydanın maksimum veya minimum olma şartına göre denklem 3 veya denklem 4 kullanılarak, sütunlara ait değerler 0-1 arasında sayı değerlerine dönüştürülmüş ve u_{ij} matrisi oluşturularak Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Sütun değerlerinin maksimum ve minimum değer matrisi (u_{ij} matrisi)

Sıra Nu.	Taşıma ve Yükleme Sistemi	Yöntemin Seçilmesinde Etkili Kriterler						
		Risk Skoru (Ox\$)	KKD Gerekliliği (TL)	Sistem Kurulum Maliyeti (TL)	Ekipman Kullanım Ömrü (Ay)	10 Ton Deri Yükleme Süresi (Adam/saat)	Yıllık Tahmini Periyodik Kontrol ve Bakım Maliyeti (TL)	İlave Eğitim Gerekliliği (TL)
1	Bant Sistemi	0,5714	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000
2	İskele Sistemi	0,0000	0,0000	0,9231	0,0000	0,0000	0,2000	0,0000
3	Kazan Sistemi	1,0000	0,9195	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000	0,2156

Tablo 8'in oluşturulmasında Ekipman Kullanım Ömrü kriterinin maksimum, diğer kriterlerin minimum olma durumlarının toplam faydayı artıracığı kabul edilmiştir. Tablo 8'de bulunan her bir değer (u_{ij}) ve AHP yöntemi ile elde edilmiş w_i değeri, Denklem 5'de kullanılarak U_i matrisi elde edilmiş ve Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Ağırlıklandırılmış sonuç matrisi (U_i matrisi)

Yöntemin Seçilmesinde Etkili Kriterler

Sıra Nu.	Taşıma ve Yükleme Sistemi								Toplam Fayda
		Risk Skoru (OxŞ)	KKD Gerekliliği (TL)	Sistem Kurulum Maliyeti (TL)	Ekipman Kullanım Ömrü (Ay)	10 Ton Deri Yükleme Süresi (Adam/saat)	Yıllık Tahmini Periyodik Kontrol ve Bakım Maliyeti (TL)	İlave Eğitim Gerekliliği (TL)	
1	Bant Sistemi	0,1932	0,2317	0,0000	0,1166	0,0000	0,0000	0,0209	0,5624
2	İskele Sistemi	0,0000	0,0000	0,1752	0,0000	0,0000	0,0073	0,0000	0,1825
3	Kazan Sistemi	0,3382	0,2130	0,1898	0,0000	0,0665	0,0363	0,0045	0,8484

Tablo 9’da her bir taşıma ve yükleme sistemine ait kriterlere göre fayda değerleri toplamı, son sütunda verilmiştir.

Tablo 9’un son sütunu incelendiğinde; kriterler bakımından en yüksek fayda sağlayacak yöntemin kazan sistemi, en düşük fayda sağlayacak yöntemin ise iskele sistemi olduğu görülmektedir.

4. Çalışmanın Kısıtları

Bu çalışmada; AHP yöntemine ait karşılaştırma matrisinin oluşturulmasında kriterlerin 1-9 aralığında derecelendirilmesi işleminde, uzman ve işveren görüşlerine başvurulmuştur. Bu kapsamda karşılaştırma tablosunun oluşturulmasında kişi görüş ve tecrübelerinin kullanılmış olması çalışmanın bir kısıtı olarak düşünülmektedir. MAUT yöntemine ait karar matrisinin oluşturulmasında kullanılan verilerin sektördeki firmaların risk analizi belgelerinden, İSG harcama listelerinden, ekipman kullanım, bakım ve güvenlik talimatlarından, iş emirlerinden ve bu deri sektörlerine İSG hizmeti sunan ortak sağlık güvenlik biriminden (OSGB) firmasından elde edilen veriler ile oluşturulmuş olması da çalışmanın bir başka kısıtı olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca çalışmanın konusu ile ilgili literatürde benzer bir çalışmanın olmaması nedeniyle elde edilen bulguların bir başka çalışma ile karşılaştırılamamış olması da çalışmanın diğer kısıtları arasındadır.

5. Sonuç ve Öneriler

Deri işleme faaliyetleri ile ilgili yapılan geçmiş çalışmalarda genel olarak çalışma ortamından ve yoğun kimyasal kullanımından kaynaklı ortaya çıkabilecek iş kazası ve meslek hastalıkları ile bunları etkileyen faktörlerin değerlendirildiği görülmüştür (Oruko, vd., 2020; SGK, 2019; Öry, vd., 1997; Rabbani, vd., 2020; Chandrasekaran, vd., 2014; Singh ve Kashyap, 2016; Bayleyegn, 2019; Kashyap ve Singh, 2007; İşsever, vd., 2007; Dalju, vd., 2019). Ancak sektörde tercih edilen proses yöntemlerinden kaynaklanabilecek iş kazası ve meslek hastalıklarına yönelik bir çalışmaya rastlanamamıştır. Bu çalışmada, sektördeki deri işleme süreci içinde gerçekleşen deri yükleme ve taşıma işlemlerinde kullanılan kazan, bant ve iskele sistemlerinden en faydalı olanı tespit edilmiştir. Fayda durumunun belirlenmesinde İSG risk skoru, KKD gerekliliği, sistem kurulum maliyeti, ekipman kullanım ömrü, işlem süresi, periyodik kontrol ve bakım maliyeti, ilave eğitim gerekliliği kriterleri göz önünde bulundurulmuştur.

Çalışma sonucunda; deri yükleme ve taşıma işlemlerinde kazan sisteminin kullanılmasının işletme açısından toplam faydayı artıracakı sonucu elde edilmiştir. Çalışanların yöntem seçimine bağlı olarak iş kazası ve meslek hastalığına yakınlıkları ile bunun sonrasında sağlık ve güvenlik bakımından etkilenme derecelerinin bir ölçüsü olan risk skoru, kazan sisteminde daha düşük düzeydedir. Yöntem olarak kazan sisteminin seçilmesinin, çalışanların sağlık ve güvenlik durumunu diğer yükleme yöntemlerine göre ciddi şekilde riske sokmayacağı değerlendirilmektedir. İş Sağlığı ve güvenliği kapsamında risklerin toplu yöntemlerle yeteri kadar azaltılamadığı durumlarda kişisel koruyucu donanım kullanılmaktadır. KKD kullanımı maddi olarak işverene bir yük getirmekte, ayrıca çalışanların faaliyetlerini rahat bir şekilde gerçekleştirmelerini önemli bir ölçüde kısıtlamaktadır. Bu üç yöntem KKD kullanımı gerekliliği bakımından incelendiğinde de kazan sisteminde KKD kullanımı gerekliliği ortalamanın çok altında olduğu görülmektedir. Aynı tonajdaki deri yükleme işlemi, diğer yükleme yöntemlerine göre kazan sisteminde daha kısa sürmektedir. Bu yöntemle yapılan işlemlerin daha kısa sürmesi, çalışanların tehlikeye maruziyet sıklığını da azaltacağı değerlendirilmiştir. İşverenler için ciddi maliyet oluşturan yıllık periyodik kontrol ve bakım giderleri kazan sisteminde diğer sistemlere göre daha düşük seviyededir. İşletme için önemli olan bu giderlerin düşüklüğü de, kazan sisteminin procesteki kullanım eğilimini artıracakı değerlendirilmiştir.

Sektörde, derilerin taşınmasında yeni bir teknoloji olan bant sisteminin daha optimum olduğu yönünde işveren görüşleri yaygındır. Ancak, bu çalışmanın sonucu ile de bant sisteminde risk skorunun kazan sistemine göre çok daha yüksek olduğu ve belirlenen kriterlere göre optimum olmadığı ortaya konmuştur. İskele sisteminin ise toplam fayda bakımından, en az faydalı sistem olduğu görülmüştür. İskele sisteminin özellikle risk skor seviyesinin oldukça yüksek olduğu ve kullanımı durumunda ciddi sonuçlu iş kazası ve meslek hastalıklarının ortaya çıkabileceği değerlendirilmektedir. Sonuç olarak sektörde, derilerin taşınması işleminde öncelikli olarak kazan sistemi kullanımının artırılması ve özellikle iskele sisteminin kullanımından kaçınılması tavsiye edilmektedir.

Yeni araştırmacılara farklı sektörlerde çalışmayı genişletmeleri, yeni kriterleri hesaplamalara dahil etmeleri tavsiye edilmektedir. Çalışmanın bilime katkı sağlaması adına farklı istatistikî metotlar ile bu çalışmanın kıyaslanması önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmanın hazırlanmasında veri ve uzman görüşleri desteğinde bulunan Karaca Deri Sanayi Tic. Ltd. Şti. ve Yön Ortak Sağlık Güvenlik Birimi (Yön OSGB) firmasına teşekkür ederiz.

Referanslar

Bayleyegn, A. (2019). Occupational Safety Measures and Health Hazards among Tannery Workers in Bahir Dar City, Ethiopia. *Thesis and Dissertations*. Bahir Dar., Ethiopia.

Black, M., Canova, M., Rydin, S., Scalet, B. M., Roudier, S., ve Sancho, L. D. (2013). *Best available techniques (BAT) reference document for the tanning of hides and skins*. European Commission Database,46, 2013.

Caner Akın, G. (2020). *İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirme Süreci İçin Yeni Bir Yaklaşım: Tersane İşletmelerinde Uygulama* (Doktora tezi). İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul.

Caner Akın, G., Eren, Ö., Oral, H. V., ve Heperkan, H. A. (2020). Yeni Bir Risk Değerlendirme Yöntemi İle Tersane İşletmelerinin Sınıflandırılması. *BMIJ*,(2020), 8(1).

Caner Akın, G., ve Oral, H. V. (2020). Deri Endüstrisinde Sürdürülebilirliği Hedefleyen Deri Çalışma Grubu (Leather Working Group) (Lwg) Protokolünün İş Güvenliği ve Çevresel Önlemlerinin Değerlendirilmesi. *6. Uluslararası İş Güvenliği ve Çalışan Sağlığı Kongresi bildiriler kitabı* içinde (ss. 94-100) İstanbul: Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları.

Chandrasekaran, V., Dilara, K., ve Padmavathi, R. (2014). Pulmonary functions in tannery workers--a cross sectional study. *Indian J Physiol Pharmacol*, 58(3), 206-210.

Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü. *Deri İmalatı Sektörü İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi Rehberi*. Ankara: Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. <http://www.isgip.gov.tr/wp-content/uploads/2018/06/DER%C4%B0-%C4%B0MALATI-SEKT%C3%96R%C3%9C-%C4%B0SGYS-REHBER%C4%B0.pdf> adresinden alındı

Dalju, I., Dessie , A., Bogale, L., ve Mekonnen, T. H. (2019). Occupational risk factors associated with respiratory symptoms among tannery workers in Mojo town, Southeast Ethiopia, 2018: a comparative cross-sectional study. *Multidisciplinary Respiratory Medicine*, 14(1), 27.

Eroğlu, E., ve Lorcu, F. (2007). Veri Zarflama Analitik Hiyerarşi Prosesi (VZAHP) ile Sayısal Karar Verme. *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme Dergisi*, 36(2), 30-53.

Genç, M. C., Değer, M. K., ve Berber, M. (2010). Beşeri Sermaye, İhracat Ve Ekonomik Büyüme: Türkiye Ekonomisi Üzerine Nedensellik Analizi. *Bilgi Ekonomisi ve Yönetimi Dergisi*, 5(1), 29-41.

Hafeez, K., Malak, N., ve Zhang, Y. (2007). , “Outsourcing Non-Core Assets and Competences of A Firm Using Analytic Hierarchy Process”, , 34 (12): . *Computers and Operations Research*, 34(12), 3592-3608.

İşsever, H., Özdilli, K., Özyıldırım, B. A., Hapcioglu, B., Ince, N., Ince, ve Calak, B. (2007). Respiratory problems in tannery workers in Istanbul. *Indoor and Built Environment*, 16(2), 177-183.

Jabrayilov, E. (2006). Türkiye Deri Sektöründe Dış Ticaretin Gelişimi ve Rusya Pazarına Yönelik Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi. İzmir: İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.

- Jamal, A., Mehmood, A., Putus, T., ve Savolainen, H. (2017). Prevalence of respiratory symptoms, bronchial asthma and obstructive lung disease among tannery workers. *Peertechz J Environ Sci Toxicol*, 2(1), 33-42.
- Karaca Deri Sanayi. Islatma ve Kireçlik Dolapları, Bant Sistemi, Çiskele Sistemi, Kazan Sistemi. *Islatma ve Kireçlik Dolapları, b. Bant Sistemi, c. İskele Sistemi, d. Kazan Sistemi*. Karaca Deri San. Tic. Ltd. Şti., İstanbul.
- Kashyap, G. C., ve Singh, S. K. (2007). Reliability and validity of general health questionnaire (GHQ-12) for male tannery workers: a study carried out in Kanpur, India. *BMC psychiatry*, 17(1), 102.
- Kaynak, S. (2016). Giyim Eşyası İmalatı Piyasa Yapısı ve Yoğunlaşma Oranı: Türkiye'nin ilk 500 Sanayi Kuruluşu Üzerine Bir Uygulama. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 12(30), 21-37.
- Keeney, R. L., Raiffa, H., ve Meyer, R. F. (1993). *Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs*. Cambridge University Press.
- Konuşkan, Ö., ve Uygun, Ö. (2014). Çok Nitelikli Karar Verme (MAUT) Yöntemi Ve Bir Uygulaması. Akademik Platform. <https://isites.info/PastConferences/ISITES2014/ISITES2014/papers/A1-ISITES2014ID237.pdf> adresinden alındı
- Oruko, R. O., Selvarajan, R., Ogola, H. J., Edokpayi, J. N., ve Odiyo, J. O. (2020). Contemporary and future direction of chromium tanning and management in sub Saharan Africa tanneries133. *Process Safety and Environmental Protection*, 369-386.
- Ömürbek, N., Karaatlı, M., ve Balcı, H. F. (2016). Entropi Temelli MAUT Ve Saw Yöntemleri İle Otomotiv Firmalarının Performans Değerlemesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 31(1), 227-255.
- Önder, G., ve Önder, E. (2015). Analitik Hiyerarşi Süreci. B. F. Yıldırım, ve E. Önder (Dü) içinde, *Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri* (s. 21-74). Bursa: Dora Yayıncılık.
- Öry, F. G., Rahman., F. U., Katagade, V., Shukla, A., ve Burdorf, A. (1997). Respiratory disorders, skin complaints, and low-back trouble among tannery workers in Kanpur, India. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 58(10), 740-746.
- Rabbani, G., Billah, B., Giri, A., Hossain, S. M., Mahmud, A. I., Banu, B., ve Alif, S. M. (2020). Factors Associated With Health Complaints Among Leather Tannery Workers in Bangladesh. *Workplace Health ve Safety*, 69(1), 22-31.
- Ramamurthy, G., Krishnamoorthy, G., Sastry, T. P., ve Mandal, A. B. (2014). Rationalized method to enhance the chromium uptake in tanning process: role of Gallic acid. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16(3), 647-654.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: Mc Graw Hill.
- Saravanabhavan, S., Thanikaivelan, P., Rao, J. R., Nair, B. U., ve Ramasami, T. (2004). Natural leathers from natural materials: progressing toward a new arena in leather processing. *Environmental science ve technology*, 38(3), 871-879.
- Sarul, L. S., ve Eren, Ö. (2016). The comparison of MCDM Methods including AHP, TOPSIS and MAUT with an Application on Gender Inequality Index. *European Journal of Interdisciplinary Studies*, 4(2), 181-194.
- Senger, Ö., ve Karadağ Albayrak, Ö. (2016). Gri İlişki Analizi Yöntemi ile Personel Değerlendirme Üzerine Bir Çalışma. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 17, 235-285.
- SGK. (2019). *Türkiye Cumhuriyeti Sosyal Güvenlik Kurumu*. Aralık 8, 2020 tarihinde http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari adresinden alındı
- Singh, S. K., ve Kashyap, G. C. (2016). Mental health problems among male tannery workers: A study of Kanpur City, India. *Health*, 4(7), 1089.
- T.C. Milli Eğitim Bakanlığı. (2011). *Kimya Teknolojisi - Yumuşatma-524KI0250 Modülü*. Ankara: T.C. Milli Eğitim Bakanlığı. Aralık 8, 2020 tarihinde http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Yumu%C5%9Fatma.pdf adresinden alındı
- T.C. Ticaret Bakanlığı İhracat Genel Müdürlüğü. (2020). *Deri ve Deri Mamulleri Sektör Raporu*. Ankara: Türkiye Cumhuriyeti-Ticaret Bakanlığı.

- Uzun, S., ve Kazan, H. (2016). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden AHP TOPSIS ve PROMETHEE Karşılaştırılması: Gemi İnşada Ana Makine Seçimi Uygulaması. *Journal of Transportation and Logistics*, 1(1), 99-113.
- Zahedi, F. (1986). The Analytic Hierarchy Process- A Survey of The Method and Its Applacitions. *Interfaces*, 16(4), 96-108.
- Zionts, S. (1979). MCDM: If not a Roman Numeral then What? 94-101.



Ergonomik Personel Görev Çizelgeleme Problemi: Çok Amaçlı Bir Kısıt Programlama Modeli ve Vaka Çalışması

Ergonomic Personnel Task Scheduling Problem: A Multi-objective Constraint Programming Model and A Case Study

Mehmet Pınarbaşı¹

¹OSTİM Teknik Üniversitesi, 06374 Yenimahalle Ankara, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 19/07/2021

Kabul / Accepted: 18/09/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Personel görev çizelgeleme problemi (PGÇP) firma amaçlarını ve teknolojik kısıtlarını dikkate alarak firma personellerine görev atanması problemidir. Ergonomik faktörler görevin yerine getirilmesi esnasında personeller üzerindeki yükün değerlendirilmesi için dikkate alınır. Personel verimliliğini artırmak isteyen işletmeler ergonomik risklerin azaltılması yönünde kararlar almaya zorlanmaktadır. Bunun yanı sıra personel giderleri üretim maliyetleri içerisinde önemli bir yer tutmaktadır. Gerek işçilik maliyetlerini düşürmek gerekse personel üretkenliğini artırmak için ergonomik risk faktörleri göz önünde bulundurularak PGÇP çözülmek zorundadır. Bu çalışmada ergonomik personel görev çizelgeleme problemi (EPGÇP) için bir kısıt programlama (KP) modeli önerilmiştir. Personel ergonomik risk skorlarının belirlenmesinde REBA metodu kullanılmıştır. Modelin amaç fonksiyonu, amaç programlama tabanlı olarak belirlenen ergonomik risk skorlarından sapmaların en küçüklenmesidir. Önerilen modelin performansı orta gerilim sigorta üretimi yapan bir firmadan alınan gerçek veriler ile değerlendirilmiştir. Sayısal test sonuçları literatürde PGÇP için çözüm önerisi sunan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar önerilen KP modelinin problemin çözümünde etkin ve verimli olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler

“Personel görev çizelgeleme problemi, Kısıt programlama, Ergonomi, REBA, Orta gerilim sigorta”

Abstract

Personnel task scheduling problem (PTSP) is the problem of assigning tasks to personnel, taking into account firm objectives and technological constraints. Ergonomic factors are taken into account to assess the ergonomic risks on personnel while performing the task. Firms that want to increase personnel productivity are forced to make decisions to reduce ergonomic risks. In addition, personnel costs have an important place in production costs. To reduce labor costs and increase personnel productivity, PTSP has to solve by considering ergonomic risk factors. In this study, a constraint programming (CP) model is proposed for the ergonomic personnel task scheduling problem (EPTSP). REBA method is used to determine personnel ergonomic risk scores. The objective function of the model is to minimize the deviations from the ergonomic risk scores determined based on goal programming. The performance of the proposed model has been evaluated with real data obtained from a company that produces medium voltage fuses. Numerical results were compared with the results of studies in the literature that proposed a solution for PTSP. The results showed that the proposed CP model is effective and efficient in solving the problem.

Key Words

“Personnel task scheduling problem, Constraint Programming, Ergonomic., REBA, Medium voltage fuses”

1. Giriş

Personel bir işletmede yapılması gereken görevleri yerine getirmek ile mükellef olan iş gücünü temsil etmektedir. İş gücü ve üretim sürecinden kaynaklanan maliyetlerin toplamı nihai ürünün maliyetini oluşturmaktadır. Günümüz rekabetçi ortamında düşük maliyet ile üretim süreçlerini kontrol edebilmek işletmelerin pazar payında ciddi artışlara neden olmaktadır. Bu sebeple maliyetin ciddi bir bölümünü oluşturan iş gücünün etkin planlanması işletmelere mali açıdan büyük avantajlar getirecektir (Alakaş vd., 2020).

Yaşanan salgın süreci firmaları personel kapasitesi olarak kısıtlamalara gitmek zorunda bırakmıştır. Bu tür zorunlu kısıtlamalar doğal olarak işletme kapasitesinin düşmesine neden olmuştur. Her ne kadar salgın süreci kısıtlamalar ve yasaklar getirirse de üretim süreçleri insan ihtiyaçlarının giderilebilmesi adına çalışmak zorunda kalmıştır. Oluşan talebi salgın-işgücü kısıtlamaları altında karşılamak firmaları zorlayıcı bir problem haline dönüşmüştür. İşletme kapasitesini en yüksek seviyede kullanarak talebi karşılamak adına kısıtlı işgücünü planlama zorunluluğu doğmuştur. Personel görev çizelgeleme problemi (PGÇP) bir veya birkaç amacı eniyilemek için işgücü kısıtlamaları, insani kısıtlamalar, mesai zamanı kısıdı, yetenek kısıtları gibi kısıtlamalar altında firmada gerçekleştirilecek görevlere personel atayan işgücü planlaması problemi (Pınarbaşı ve Alakaş, 2020).

Ergonomi insanların fiziksel ve psikolojik karakteristiklerini dikkate alarak insan-makine sistemlerinin geliştirilmesi için çalışılan bir bilim dalıdır. Salgın süreci göstermiştir ki hastalığa yakalanan bireyler fiziksel ve psikolojik olarak ne kadar güçlü iseler hastalığı o derecede hızlı atlatmaktalar ve daha az etkilenmektedirler. İnsanların çalıştığı ortamda maruz kaldığı ergonomik yüklerin azaltılması insanların direncini de artıracaktır. Bu sebeple işgücünün maruz kalacağı ergonomik risk faktörlerinin ölçülmesi gerekmektedir. Ergonomik risk faktörleri REBA gibi çeşitli yöntemler vasıtasıyla gözlem ve ölçümlere dayalı olarak tespit edilir. Yüksek risk faktörüne sahip görevlerin dengeli dağılımı, personeli kas iskelet sistemi hastalıklarına karşı korumak, personelin iş stresini azaltmak, iş memnuniyetini ve moralini artırmak gibi avantajları beraberinde getirecektir. Hem salgın sürecinde personel sağlığını korumak hem de personeli ergonomi kaynaklı risklerden arındırmak adına personel görev çizelgeleme probleminin ergonomik riskleri de göz önünde bulundurarak ele alınması gerekmektedir. Bu problem ergonomik personel görev çizelgeleme problemi (EPGÇP) olarak adlandırılır.

Personel çizelgeleme problemi gibi kombinatoriyal problemler genellikle bir amaç fonksiyonunu eniyilemek amacıyla modellenirler. Ancak bazı durumlarda karar verici birden fazla çelişen amacı aynı anda karşılamak zorunda kalabilir. Birden fazla amacı dikkate alan kombinatoriyal problemlere çok amaçlı karar problemleri denilmektedir. Bu tür problemlerin çözümü için literatürde tek amaçlı problemlerin çözüm yöntemlerinden farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler çok kriterli karar verme yöntemleri, amaç programlama ve çok amaçlı sezgiseller olarak verilebilir. Amaç programlama çok amaçlı problemlerin çözümünde kullanılan en güçlü yöntemlerden biridir (Charnes and Cooper, 1977). Bu yöntem en iyilenmesi gereken her bir amaç için bir sapma değeri belirleyerek, bu sapma değerlerinin en iyileşmesini ve doğrudan tüm amaçların belirli seviyelerde sağlanmasına olanak veren bir yöntemdir. Sapma değerlerine ulaşılma seviyesi yöntemin ilgili amacı ne derecede sağladığı ile ilgilidir.

Kombinatoriyal problemlerin çözümü için geliştirilen yöntemleri en genel anlamı ile tam/kesin ve sezgisel yöntemler olarak sınıflandırmak mümkündür. Tam yöntemler tam sayılı programlama, dal sınır algoritması gibi yöntemler iken sezgisel yöntemlere tabu arama, genetik algoritmalar, tavlama benzetimi gibi yöntemler örnek olarak verilebilir. Sezgisel yöntemler kısa zamanda problem için bir çözüm üretirken kesin yöntemler problem için optimum çözümü üreten yöntemlerdir. Kesin yöntemler sezgiseller kadar kısa sürede çözüm üretmeseler de çözüm arama stratejilerinde yapılacak iyileştirmeler, etkin model kurma teknikleri, gelişmiş ön işlem mekanizmaları gibi yöntemler ile kısa sürede çözüme ulaşma imkanı vermektedirler. Kısıt programlama (KP) son zamanlarda atama problemleri, çizelgeleme ve montaj hattı dengeleme gibi birçok üretim probleminin çözümünde etkin olarak kullanılan bir kesin çözüm yöntemidir (Pınarbaşı, 2021). KP problemin amaç ve kısıtlarında meydana gelecek değişiklikleri kolayca modellemek adına bilgisayar programlamanın etkili yönlerini kullanmaktadır. Bunun yanı sıra matematiksel programlamanın çözüm arama etkinliğini bu modelleme avantajı ile birleştirilerek etkin ve hızlı çözüm bulmaya imkan vermektedir. Probleme özgü çözüm arama stratejisi geliştirebilme imkanı da KP'nin bir diğer avantajıdır. Bu sebeplerle çalışmada EPGÇP çözümü için KP modeli üzerinde durulacaktır.

Bu çalışmada personel çizelgeleme problemi görevlerin ergonomik risk faktörlerini de göz önünde bulundurarak ele alınmıştır. Problemin çözümü için bir çok amaçlı KP modeli önerilmiştir. Modelin amaçlarını her bir görev için hesaplanan üç ayrı REBA puanının en iyilenmesi oluşturmaktadır. Bu üç farklı amaç için oluşturulan sapma değişkenleri KP modeline entegre edilerek yeni bir amaç programlama temelli KP model önerisi yapılmıştır. Modelin etkinliği gerçek veriler ile oluşturulan bir vaka analizi ile test edilmiştir ve literatür çözümleri ile kıyaslanmıştır. Sonuçlar geliştirilen modelin problemin çözümü için etkin ve umut vadeci olduğunu göstermiştir.

Çalışmanın içerik organizasyonu şu şekilde planlanmıştır. Giriş bölümünden sonra Bölüm 2'de literatür araştırması verilmiştir. Bölüm 3'te personel görevlerinin ergonomik açıdan değerlendirilmesi için kullanılan REBA yönteminden bahsedilmiştir. Problem tanımı ve EPGÇP'nin çözümü için önerilen KP modeli Bölüm 4'te sunulmuştur. Bölüm 5 önerilen modelin performansının test edildiği vaka çalışmasının detayları ve sayısal sonuçları içermektedir. Bölüm 6 ile çalışma sonuçlandırılmıştır.

2. Literatür Araştırması

PGÇP literatürü incelendiğinde benzer problemin farklı amaç veya kısıtlar ile farklı isimler adı altında ele alındığı görülmüştür. Bu çalışma EPGÇP ve çözüm yöntemleri ile ilgili olduğundan sadece EPGÇP literatürü üzerine yoğunlaşılacaktır. Geleneksel PGÇP literatürü için Özder vd. (2020) ve Adem ve Dağdeviren (2016) çalışmaları incelenebilir. EPGÇP literatürü için (Adem ve Dağdeviren, 2016) çalışması geliştirilerek yeni çalışmalar eklenmiş ve özet literatür Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1, EPGÇP için geliştirilen çözüm yöntemleri açısından incelediğinde, üç temel çözüm yöntemi dikkat çekmektedir: kesin/matematiksel yöntemler, sezgisel yöntemler ve benzetim. Kesin yöntemleri, matematiksel programlama (Anzanello vd., 2014; Boenzi vd., 2015; Mossa vd., 2016), tam sayılı programlama (Carnahan vd., 2000; Malladi ve Min, 2004; Seçkiner ve Kurt, 2005; Wongwien ve Nanthavanij, 2012; Wongwien ve Nanthavanij, 2013; Otto ve Scholl, 2013), karışık tam sayılı programlama (Rattanamanee ve Nanthavanij, 2013) ve amaç programlama (Bedir vd., 2017; Kaçmaz vd., 2020; Alakaş vd., 2020) olarak sınıflandırmak mümkündür. Sezgisel yöntemler probleme özgü sezgisel arama metotları (Yaoyuenyong ve Nanthavani, 2006; Wongwien ve Nanthavanij, 2012; Otto ve Scholl, 2013; Boenzi vd., 2015; Anzanello vd., 2014) ve genetik algoritma (Carnahan vd., 2000; Cuesta vd., 2012) olarak verilebilir. Bu çözüm yöntemlerine ek olarak problem parametrelerinin belirlenmesi veya amaç programlamada amaç ağırlıklarının tespiti amacıyla AHP yöntemine literatürde sıklıkla başvurulduğu görülmektedir.

EPGÇP’nin literatür çalışmalarının derlenmesinde kullanılabilir bir kriter de çalışmanın dikkate aldığı ergonomik ölçütlerdir. Literatür çalışmalarında çok farklı ölçütler dikkate alınmıştır: OCRA indeks (Cuesta vd., 2012; Boenzi vd., 2015; Mossa vd., 2016), REBA skor (Kaçmaz vd., 2020; Alakaş vd., 2020), yorgunluk (Wang ve Cheng, 2014), gürültü (Yaoyuenyong ve Nanthavani, 2006; Wongwien ve Nanthavanij, 2012), radyasyon (Seçkiner ve Kurt, 2005), uyku, (Kostreva vd., 2002) görev karmaşıklığı (Anzanello vd., 2014). REBA metodu son yıllarda ergonomik riskleri hesaplamada kullandığı matematiksel altyapı nedeniyle ölçülebilir ergonomik skorlar açısından en popüler metot haline gelmiştir (Alakaş vd., 2020).

Tablo 1’de özetlenen literatür çalışmaları uygulama alanı açısından değerlendirildiğinde hizmet ve üretim sistemi olarak iki farklı sektörel uygulamaya rastlanmaktadır. Literatürdeki çalışmaların yarısı herhangi bir uygulama alanı içermeyen (sayısal analizler yazarlardan tarafından üretilmiş veriler ile yapılmıştır) çalışmalardan oluşurken diğer yarısının daha çok ayakkabı üretimi, otomobil üretimi, sigorta ve cam üretimi gibi üretim sektörüne dönük uygulamalar yaptığı görülmektedir. Üretim sektöründe yapılan uygulamanın çok olmasının nedeni personel ergonomik riskinin hizmet sektörüne göre üretim sektöründe daha yüksek olduğu ile açıklanabilir.

Tablo 1. EPGÇP Literatür çalışmaları (Adem ve Dağdeviren, 2016)

Çalışma	Ergonomik ölçüt	Çözüm yöntemi	Uygulama alanı
Carnahan vd. (2000)	Taşınan nesne ağırlığı, taşıma mesafesi, tekrarlamaya sıklığı	TP, GA	-
Malladi ve Min (2004)	Finansal ve ergonomik faktörler	TP, AHP	-
Seçkiner ve Kurt (2005)	Radyasyon miktarı	TP	Hastane
Yaoyuenyong ve Nanthavani (2006)	Gürültü değeri	TP, SA	-
Kostreva vd. (2002)	Uyku düzeni	B	-
Wongwien ve Nanthavanij (2012)	Gürültü sınır değerleri	TP, SA	-
Wongwien ve Nanthavanij (2013)	Rassal risk değeri üretimi	TP	-
Cuesta vd. (2012)	OCRA indeks	ECRot, GA	-
Otto ve Scholl (2013)	Ergonomik puan	TP, SA	Otomobil üretimi
Rattanamanee ve Nanthavanij (2013)	Ergonomik tehlikeye maruz kalma riski	KTP	-
Boenzi vd. (2015)	OCRA indeks	MP, SA	-
Wang ve Cheng (2014)	Yorgunluk indeksi	B	Hava Trafik Kontrolü
Anzanello vd. (2014)	Görev karmaşıklığının dengeli dağılımı	MP, SA	Ayakkabı üretimi
Mossa vd. (2016)	OCRA indeks	MP	Otomobil üretimi
Bedir vd. (2017)	Ergonomik risk faktörü	AP, AHP	Giyim mağazası
Kaçmaz vd. (2020)	REBA Skor	AP	Cam sanayi
Alakaş vd. (2020)	REBA Skor	AP	Sigorta üretimi

KTP: Karışık Tam Sayılı Programlama, GA: Genetik Algoritma, TP: Tam Sayılı programlama, MP: Matematiksel Programlama, KP: Kısıt Programlama, SA: Sezgisel Arama, AP: Amaç Programlama, B: Benzetim, AHP: Analitik Hiyerarşi Süreci, ECRot: Ergonomic and Competent Rotation

Bu çalışma EPGÇP için yeni bir kesin çözüm yöntemi olan KP modelinin kurulması ve problemin çözülmesine odaklanmıştır. KP'nin çizelgeleme problemlerinin çözümü için kullanıldığı literatür çalışmalarından bu bölümde bahsedilecektir. Rodriguez (2007) gerçek zamanlı tren çizelgeleme problemi için bir KP modeli önermiştir. Yazar Paris'te yerleşik tren kavşaklarından geçen trenlerin rota planı ve çizelgesinin oluşturulması uygulaması üzerinde durmuştur. Pour vd. (2018) KP ve karışık tamsayı programlama temelli bir çözüm yaklaşımını bakım personeli çizelgelemesinin çözümü için önermişlerdir. Çalışmada Danimarka'da bulunan bir demiryolu ağının önleyici sinyal sisteminin bakım ekibinin çizelgelemesi vaka analizi olarak sunulmuştur. Hemşire çizelgeleme problemi için tam sayılı programlama ve KP modelleri öneren bir çalışma Trilling vs. (2006) tarafından sunulmuştur. De Silva (2001) otobüs şoförü çizelgeleme problemi için doğrusal programlama ile bütünleşik bir KP modeli önerisinde bulunmuştur. KP'nin PGÇP çözümü için kullanıldığı son yıllardaki ender çalışmalara örnek vermek gerekirse Gür vd. (2019), Eren vd. (2019) ve Özcan vd. (2020) çalışmaları verilebilir. Gür vd. (2019) ameliyathane çizelgeleme problemi için amaç programlama ve KP modelleri önermişlerdir. Bir üniversite kampüsünün güvenlik personellerinin aylık çizelgesinin oluşturulması için Eren vd. (2019) tarafından bir KP modeli önerilmiştir. Özcan vd. (2020) KP ve amaç programlamayı entegre ederek çok amaçlı vardiya çizelgeleme problemini ele almışlardır. Bir hidroelektrik santralinde çalışan personelin vardiyalara göre personel çizelgelemesi vaka analizi olarak sunulmuştur. KP modellemesi ile PGÇP'yi çözen literatür çalışmalarının ergonomik risk faktörlerini göz önünde bulundurmadığı görülmektedir.

Literatür çalışması sonuçları değerlendirildiğinde EPGÇP'nin çözümü için yeni bir kesin çözüm yöntemi olan KP'nin hiç kullanılmadığı görülmüştür. Bunun yanı sıra literatür çalışmalarının problemi genellikle tek amaçlı ergonomik risk faktörleri dikkate alarak değerlendirdiği görülmüş ve bu çalışmada REBA skorlarını birlikte dikkate alan çok amaçlı bir modelleme üzerinde durulmuştur. Ergonomik risk faktörlerinin personel üzerinde büyük oranda etkili olduğu görülen orta gerilim sigorta üretimi sektöründe çalışan bir firmadan elde edilen gerçek veriler ile bir vaka analizi yapılarak literatür desteklenmiştir. Ayrıca bu çalışmada literatürde PGÇP çözümü için geliştirilen KP modeli çalışmalarının sonuçları bu çalışmanın sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilerek çalışmanın literatür katkısı artırılmıştır.

3. Ergonomik Değerlendirme ve REBA Yöntemi

REBA metodu çalışanların bedensel duruşundan yola çıkarak maruz kaldıkları ergonomik yükü hesaplamayı amaçlayan Hignett ve McAtamney (2000) tarafından geliştirilen bir ergonomik değerlendirme yöntemidir. Yöntem özellikle manuel olarak yapılan görevlerin ergonomik riskinin değerlendirilmesinde çok etkilidir. REBA statik hareketleri dinamik değişimleri de göz önünde bulundurarak değerlendirebilme olanağı sağlar. Bu sayede REBA ile çalışanların vücut duruşunun ergonomik olarak değerlendirilmesi yapılmış ve ergonomik risk faktörü sayısal olarak elde edilmiş olur.

REBA skorunun hesaplanması için kısaca aşağıdaki dört adımlık algoritma kullanılabilir. Bunun yanı sıra Şekil 1'de REBA skorunu hesaplanması için gereken akış şeması verilmiştir.

Adım 1: Görevin gözlemlenmesi

Personel görevi yerine getirdiği esnada, vücut duruşu, ekipman kullanımı, görevin yerine getirilmesi için gerekli ekipmana ulaşılabilirlik, çalışma ortamı gibi birçok faktör açısından gözlemleyerek kayıtlar tutulur.

Adım 2: Vücut duruşu seçimi

REBA skorunu hesaplamak için her görev adına personelin vücut duruşunun tanımlanması gerekmektedir. Vücut duruşu belirlenirken en genel ve uzun süreli vücut duruşunun korunduğu yüksek kas gücü isteyen görevlere dikkat edilmelidir. Bir vücut duruşunun seçimi için bir veya birden fazla duruma dikkat etmek gerekebilir.

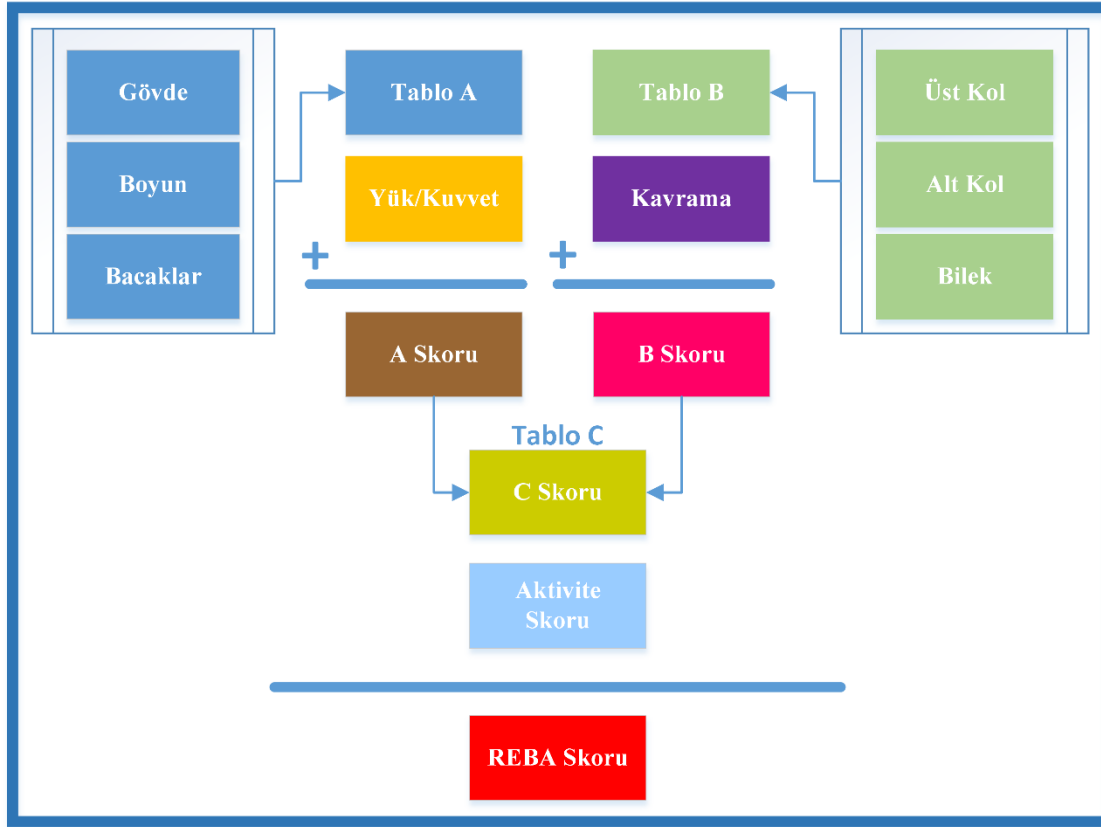
Adım 3: Vücut duruşunun puanlanması

Şekil 1'de gösterilen A grubu skoru personelin gövde, boyun ve bacaklarının pozisyonuna ve duruşuna göre Ek A'da verilen Tablo A'dan bir skor seçilir. B grubu olarak adlandırılan skor ise üst kol, alt kol ve bilekler ile ilgilidir ve e Ek A'da verilen Tablo B'den vücut duruşuna göre bir skor her bir görev için seçilir.

Adım 4: İşlem Noktaları

Bu adımda Tablo A'dan elde edilen skora yük/kuvvet skoru da eklenerek A skoru belirlenir. Yük skoru için personelin maruz kaldığı kuvvet yaklaşık 5 kilogramdan az ise 0, 5 ile 10 kilogram arasında ise 1 ve 10 kilogramdan fazla ise 2 değeri olarak seçilmelidir. Tablo B skoruna kavram skoru eklenerek hesaplamalara devam edilir. Kavrama skoru görev yerine getirilirken iyi kavrama varsa 0, uygun ama ideal bir kavrama yoksa 1, kavrama uygun olmayacak kadar kötü ise 2 ve zor ve güvenli olmayan bir kavrama var ise 3 değeri ergonomi skoruna eklenir. Elde edilen A ve B skorları kullanılarak Ek A'da verilen Tablo C'den C skoru belirlenir. Elde edilen bu C

skoruna Ek A’da verilen Tablo D’deki aktivite skoru da eklenerek toplam REBA skoru belirlenir. Ek A’da verilen Tablo E kullanılarak elde edilen REBA skorunun genel ergonomik risk skoru belirlenir.



Şekil 1. REBA skoru hesaplama akış şeması

Her bir görev için REBA skoru yukarıda anlatılan adım adım algoritma ve Şekil 1 kullanılarak belirlenir. Elde edilecek bu REBA skorları önerilecek KP modelinde REBA A, B ve genel skor olmak üzere ergonomik kısıtlar olarak kullanılacaktır. Önerilen modelin amaç fonksiyonu bu skorlardan oluşacak sapma değerlerinin en küçüklenmesi olarak belirlenmiştir. Modelde üç skorun birden değerlendirilmesi personelin ergonomik açıdan vücut duruşundaki tüm organlara olan yükün daha dengeli dağılmasını sağlayacaktır.

4. Problem Tanımı ve Önerilen Kısıt Programlama Modeli

Bir personel görev çizelgeleme problemi g adet görevin p adet personele atanması ile ilgilidir. PGÇP, toplam boş zamanın en küçüklenmesi, personel yetkinlik dağılımını düzgülendirmek gibi tek amaçlı olarak ele alınırken problemin uygulama alanına bağlı olarak birden fazla amacın dikkate alındığı çok amaçlı olarak da ele alınabilmektedir. Bu çalışmada önerilen modelde, REBA yöntemi ile personel üzerinde oluşacak A, B ve toplam ergonomik yüklerin en küçüklenmesini amaçlayan çok amaçlı bir problem dikkate alınmıştır. Model geliştirilirken dikkate alınan varsayımlar şu şekildedir:

- Bir personelin günlük maksimum çalışma süresi 510 dakikadır.
- Personel üzerindeki iş yükünü sınırlandırmak amacıyla bir personele en fazla altı adet görev atanabilmektedir.
- Personeller her görevi yapabilecek yetkinliğe sahiptir.
- Görevlerin gerçekleştirilme süresi önceden belirlenmiştir.
- İşletmenin süreçleri dikkate alınarak bir görevin yerine getirilmesi için gerekli personel sayısı dikkate alınmıştır.
- Her bir görevin ergonomik değerlendirilmesi yapılmış ve REBA yönteminden ileri gelen skorlar tespit edilmiştir.
- Problemden REBA skorlarından A, B ve toplam REBA skorunun en küçüklenmesi amaçlanmıştır.

Bahsedilen varsayımlar altında EPGÇP için önerilen KP modeli aşağıda verilmiştir. Model için gerekli olan notasyon şu şekildedir:

İndisler

i = Personel

$j, k =$ Görev

Parametreler

$p =$ Toplam personel sayısı

$\bar{P} =$ Personel kümesi $(1, 2, \dots, p)$

$g =$ Toplam görev sayısı

$\bar{G} =$ Görev kümesi $(1, 2, \dots, g)$

$W =$ Günlük çalışma süresi (510 dk)

$G_{\max} =$ Bir personele atanabilecek maksimum görev sayısı ($G_{\max} = 6$)

PG Bir personelin yaptığı görev sırası kümesi $(1, 2, \dots, G_{\max})$

$p_j = j$ görevi için gerekli personel sayısı

$t_j = j$ görevini gerçekleştirme süresi

$R_j = j$ görevinin REBA skoru

$A_j = j$ görevinin REBA A skoru

$B_j = j$ görevinin REBA B skoru

Karar değişkenleri

$x_{jk} = i$ personelinin k . sırada yapacağı görevin numarası, $i \in \bar{G}, k \in PG$

$d_{i1}^- = i$ görevinin REBA skor amacından negatif sapma değeri

$d_{i1}^+ = i$ görevinin REBA skor amacından pozitif sapma değeri

$d_{i2}^- = i$ görevinin REBA A skor amacından negatif sapma değeri

$d_{i2}^+ = i$ görevinin REBA A skor amacından pozitif sapma değeri

$d_{i3}^- = i$ görevinin REBA B skor amacından negatif sapma değeri

$d_{i3}^+ = i$ görevinin REBA B skor amacından pozitif sapma değeri

$$\text{Min} \sum_{i \in \bar{G}} d_{i1}^+ + d_{i2}^+ + d_{i3}^+ \quad (1)$$

s.t.

$$x_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in \bar{P}, k \in PG \quad (2)$$

$$x_{ik} \leq g \quad \forall i \in \bar{P}, k \in PG \quad (3)$$

$$\sum_{k \in PG} (x_{ik} = j) \cdot t_j \leq W \quad \forall i \in \bar{P}, j \in \bar{G} \quad (4)$$

$$\text{count}(i \in \bar{G}, k \in PG, x_{ik} ; j) = p_j \quad \forall j \in \bar{G} \quad (5)$$

$$\text{count}(k \in PG, x_{ik} ; j) \leq 1 \quad \forall i \in \bar{P}, j \in \bar{G} \quad (6)$$

$$\sum_{j \in \bar{G}} (x_{ik} = j) \cdot t_j \cdot R_j - d_{i1}^+ + d_{i1}^- = \sum_{j \in \bar{G}} (x_{ik} = j) \cdot t_j \cdot 7 \quad \forall i \in \bar{P}, k \in PG \quad (7)$$

$$\sum_{j \in \bar{G}} (x_{ik} = j) \cdot t_j \cdot A_j - d_{i2}^+ + d_{i2}^- = \sum_{j \in \bar{G}} (x_{ik} = j) \cdot t_j \cdot 5 \quad \forall i \in \bar{P}, k \in PG \quad (8)$$

$$\sum_{j \in \bar{G}} (x_{ik} = j) \cdot t_j \cdot B_j - d_{i3}^+ + d_{i3}^- = \sum_{j \in \bar{G}} (x_{ik} = j) \cdot t_j \cdot 5 \quad \forall i \in \bar{P}, k \in PG \quad (9)$$

$$(d_{i1}^- > 0) + (d_{i1}^+ > 0) \leq 1 \quad \forall i \in \bar{P} \quad (10)$$

$$(d_{i2}^- > 0) + (d_{i2}^+ > 0) \leq 1 \quad \forall i \in \bar{P} \quad (11)$$

$$(d_{i3}^- > 0) + (d_{i3}^+ > 0) \leq 1 \quad \forall i \in \bar{P} \quad (12)$$

$$x_{ik} \in \bar{G} \text{ ve tamsayı} \quad \forall i \in \bar{P}, k \in PG \quad (13)$$

Eşitlik (1) önerilen KP modelinin amacı olarak tanımlanmıştır. EPGÇP’de amaç personellerin maruz kaldığı ergonomik risk yüklerini azaltmaktır. Önerilen model amaç programlama tabanlı bir çok amaçlı model olduğundan görevlerin REBA skorlarından pozitif sapmayı en küçüklemeyi amaç edinmiştir. Bu sayede hem personel uzuvları üzerindeki ergonomik yükün dengeli dağılımı elde edilmiş hem de toplam REBA puanı amacı sayesinde personel üzerindeki yük ve kavrama dengesi elde edilmiş olacaktır. REBA skorlarındaki pozitif sapmalar REBA skorunda artışa neden olacağından küçülenmesi gerekmektedir. Eşitlik (2) bir personelin k ’inci sırada yapacağı görev numarasının sıfırdan büyük olmasını garanti eder. Benzer şekilde Eşitlik (3) personelin yerine getireceği görev numarasının toplam görev sayısından büyük olmamasını sağlar. Başka bir deyişle bu iki eşitlik karar değişkeninin çözüm kümesi aralığını tanımlar. Eşitlik (4) personellere görev atanırken günlük toplam çalışma süresinden daha fazla süre görev atanmasını engeller. Bu eşitlikte yer alan $(x_{ik} = j)$ mantıksal ifadesi eğer i personelinin k sıradaki yapacağı göreve j görevi atandı ise ifadesinin mantıksal sınamasıdır. Bu ifade bir değerini aldığı anda görevin gerçekleştirilme süresi ile çarpılır ve bu hesap tüm personel için tekrarlanarak günlük çalışma süresi ile sınırlandırır. Eşitlik (5) bir görevin yerine getirilmesi için gerekli olan personel sayısını belirler. Eşitlikte yer alan $count()$ KP çözücüsünde tanımlanmış bir fonksiyondur ve x_{ik} karar değişkeninin sonucunun j ’ye eşit olduğu toplam sonuç sayısını döndürür. Eşitlik (6) her bir görevin sadece bir personele atanmasını garanti eder. İşletmedeki görevler ve bu görevlerin ergonomik riskleri gözlemlendiğinde, personel üzerine yüklenecek ergonomik riskin de belirli sınırlar arasında kalmasına karar verilmiştir. Bu amaçla Eşitlik (7) ile bir personel üzerindeki toplam REBA puanının yedi ile sınırlandırılması sağlanmıştır. Benzer şekilde Eşitlik (8) ve Eşitlik (9) sırası ile personel üzerindeki ergonomik yükü sınırlandırmak amacıyla REBA A ve REBA B skorlarını beş puan ile sınırlandırır. Eşitlik (7), Eşitlik (8) ve Eşitlik (9) amaç fonksiyonunu etkileyen kısıtlardır ve bu kısıtlardan oluşan negatif ve pozitif sapmalar personel üzerindeki ergonomik yükün hesaplanmasını sağlayacaktır. Eşitlik (10), Eşitlik (11) ve Eşitlik (12) amaç fonksiyonunu etkileyen kısıtlardan oluşan negatif ve pozitif sapmalardan sadece birinin pozitif değer almasını sağlarlar. Bu kısıtlar ile personel ergonomik yükü için bir denge kurulmaya çalışılmıştır. Karar değişkeninin tanım kümesi Eşitlik (13) ile belirlenmiştir.

5. Vaka Çalışması ve Deneysel Sonuçlar

Bu bölümde orta gerilim sigorta (OGS) üretimi yapan bir firmadan elde edilen gerçek veriler ile önerilen modelin etkinliği değerlendirilmiştir. Ayrıca modelin vaka analizi sonuçları bu bölümde rapor edilmiştir. Deneysel sonuçları literatürde PGÇP ve EPGÇP üzerine yapılmış olan sırasıyla Pınarbaşı ve Alakaş (2020) ve Alakaş vd. (2020) çalışmalarının sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu çalışmalardan Pınarbaşı ve Alakaş (2020) PGÇP’yi ergonomik risk faktörlerini dikkate almaksızın matematiksel programlama ile çözerken, Alakaş vd. (2020) EPGÇP’yi amaç programlama yaklaşımı ile çözmüşlerdir.

5.1. Orta Gerilim Sigorta Üretimi

Orta gerilim sigortalar elektrik trafolarından büyük işletmelerin elektrik tesisatlarına kadar birçok elektriksel donanımı yüksek akımlardan korumak amacıyla kullanılan bir akım kesme elemanıdır. Temel olarak seramik bir boru içerisine yerleştirilmiş taşıyıcı isimli üzerinde elektriksel devrenin sarılı olduğu bir elemandan oluşan yapıya sahiptir. Boru uçlarında bulunan bakır temelli bir malzemeden oluşan kapaklar vasıtasıyla sisteme entegre edilirler. OGS’ler hem etkili koruması hem de ucuz olması nedeniyle elektriksel altyapılarda sıklıkla tercih edilen bir elemandır.

Elektriksel sistemde çok önemli bir görevi yerine getirmesi sebebiyle OGS’lerin belirli kalite şartlarında ve alanında yetkin personeller tarafından üretilmesi gerekmektedir. Geleneksel bir OGS üretiminde şu dört ana sürecin var olması gerekmektedir: çamurhane, fırınlama ve kesme, ara ürün imalatı ve son montaj. Bu dört bölümün her biri kendi içinde uzmanlık gerektiren üretim süreçleri içermektedir. OGS üretimi çamurhane bölümü olarak adlandırılan ve sigortanın dış ve iç bölümlerinde yer alan seramik boru ve taşıyıcı malzemelerinin üretiminin yapıldığı bölümdür. Seramik malzemeler çeşitli toprak hammaddelerinin bir araya getirilerek değirmenlerde karıştırılması ve çamur halinden boru ve taşıyıcı yarı ürünlerini presler vasıtasıyla şekillendirilirler. Pişirilmemiş boru ve taşıyıcı mamulleri fırın bölümünde belirli sıcaklıklarda pişirildikten sonra kesme bölümünde kesilerek istenilen şartlara göre hazırlanırlar. OGS’ler temel ara ürünler olan boru ve taşıyıcı mamulleri yanı sıra kapaklar ve iç devre elemanları gibi birçok ara ürünün bir araya getirilmesi ile meydana getirilirler. Vaka analizinde OGS üretimi yapan firma bu tür ara ürünleri de kendi bünyesinde üretmektedir. Bu sebeple ara ürünlerin de hassas üretim teknikleri ile üretimini sağlamak adına personel görev çizelgesinin etkin bir şekilde oluşturulması gerekmektedir. Montaj bölümü kendinden önceki bölümlerde üretilen tüm ara ürünlerin bir araya getirilerek ana ürün olan OGS’nin meydana getirildiği bölümdür. Bu bölümde kendi içerisinde uzmanlık isteyen hassas üretim süreçleri gerektirdiğinden bu bölümün personel çizelgesi de bu çalışmada dikkate alınmıştır.

Tanımlanmış bu süreçleri içeren OGS üretimi yapan firmada toplam 43 görev için 12 personelin görevlendirilmesi gerekmektedir. OGS’lerin hassas üretimi gereği belirli sayıda personelin belirli sayıda görevi bireysel veya kolektif olarak yerine getirmesi gerekmektedir. OGS üretimi için gerekli olan üretim bölümlerine ait görevler ve bu görevlere ait veriler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. OGS üretimi için gerekli olan veriler

Üretim Bölümü	Görev No	Görev	Süre	Gereken Personel Sayısı	Üretim Bölümü	Görev No	Görev	Süre	Gereken Personel Sayısı
Çamurhane	1	Çamur Hammadde Tartım	90	2	Ara ürün	23	Kontak Başlık Kesme	66	2
	2	Değirmen Doldurma	30	4		24	Kontak Başlık Şekillendirme	133	1
	3	Değirmen Su Verme	30	1		25	Kontak Başlık Kanal Açma	133	1
	4	Çamur Eleme	120	1		26	Yay Sarma	166	1
	5	Çamur Tanka Basma	30	1		27	Tarak Presleme	33	2
	6	Pres Boşaltma	30	2		28	Delikli Kapak Presleme	20	1
	7	Sır Hammadde Tartım	15	1		29	Kum Sonlandırıcı Presleme	20	1
	8	Sır Değirmen Doldurma	15	2		30	Son Kapak Presleme	20	1
	9	Sır Eleme	15	1		31	Tarak Takma	130	1
	10	Sır Ayarlama ve Renklendirme	60	2		32	Gösterge Elemanı Yapma	400	1
	11	Dış Gövde Şekillendirme	191	2		33	Erime Hattı Sarma	253	1
	12	Taşıyıcı Şekillendirme	102	2		34	Kontak Başlık Sıvama	253	1
Fırın	13	Dış Gövde Rötüslama	45	2	35	Taşıyıcı Puntalama	166	1	
	14	Dış Gövde Sırlama	45	2	36	Gösterge Elemanı Takma	253	1	
	15	Fırın Yükleme	55	3	37	Tarak Puntalama	66	1	
	16	Fırın Boşaltma	30	4	38	Delikli Kapak Sıvama	100	1	
Kesme	17	Dış Gövde Kesme	195	1	39	Kumlama	33	1	
	18	Taşıyıcı Kesme	28	1	40	Kum Sonlandırma Takma	66	1	
	19	Dış Gövde Kanal Açma	155	1	41	Son Kapak Sıvama	66	1	
	20	Taşıyıcı Kanal Açma	51	1	42	Etiketleme ve Paketleme	233	1	
	21	Dış Gövde Kalite Ayırım	155	1	43	Kolileme ve İstifleme	19	1	
	22	Taşıyıcı Kalite Ayırım	51	1					

Bu çalışmada PGÇP ergonomik risk faktörlerini de dikkate alarak çözülmüştür. Tablo 3'te, OGS üretiminde yer alan görevlere ait Şekil 1'de verilen REBA hesaplama akışına göre uzmanlar ve firma yöneticileri tarafından belirlenmiş skorlar verilmiştir. Tablo 3'te görülmektedir ki OGS üretiminde genellikle çamurhane ve fırın/kesme bölümlerindeki görevler ergonomik açıdan oldukça risklidir. Ürünler montaj bölümüne kesilmiş ve gerekli ölçülere getirilmiş olarak sevk edildiğinden ve firma montaj hattını uygun fiziksel şartlara göre tasarladığından montaj bölümüne ait görevlerin ergonomik riski nispeten düşüktür. Ancak bu bölümdeki paketleme ve kolileme görevleri özellikle ürünlerin ağırlıkları nedeniyle ergonomik açıdan yüksek riskli olarak belirlenmiştir.

5.2. Sayısal Sonuçlar ve Tartışma

Bölüm 5.1'de personeller ve yerine getirilecek görevler için gerekli olan görev süreleri, REBA skorları ve görev için gerekli personel görev sayısı gibi teknolojik kısıt verileri verilmiştir. Elde edilen bu veriler ile önerilen KP modeli çalıştırılmıştır. Modelin test edilmesi için IBM ILOG CP Optimizer paket programı kullanılmıştır. Belirtilen veriler ışığında modelin toplu sonuçları Tablo 4'te rapor edilmiştir.

Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm görevlerin yerine getirilmesi için gereken personel sayısı kadar atama yapılmıştır. Görevlerin toplam REBA puanları değerlendirildiğinde çamurhane bölümüne ait görevlerin ergonomik risklerinin fazla olduğu görülmüştür. Bu durum Tablo 3'te REBA skorları belirlenirken uzmanlar tarafından da ön görülen sonuçlar ile örtüşmektedir. Tablo 4'te her bir personele atanan toplam görev sayısı açısından değerlendirildiğinde firmada yerine getirilmesi gereken 61 görevin tamamına bir personel atanmıştır. Beş personele atanması gereken toplam altı görevin tamamı atanırken, dört personele beş görev, iki personele dört ve bir personele üç görev ataması yapılmıştır. Personeller toplam çalışma zamanı açısından değerlendirildiğinde iki personele 509 dakika çalışma zamanı ile neredeyse günlük çalışma zamanı sınırının tamamı kadar süre görev atandığı görülmektedir. Diğer personellere günlük çalışma zamanı sınırına uygun bir şekilde, model boş zamanları dengeli bir şekilde atanmıştır. Ancak personel 2'ye 228 dakika ile en az toplam çalışma zamanı atanmıştır. Çalışma zamanı dengesinde en az süreyi temsil eden bu atamanın nedeni firmanın mazeret izni gibi nedenler ile aniden gerçekleşen personel eksikliklerinde görevlerin aksamaması adına gerekli işçi sayısını bir yedek işçi fazla hesaplamasıdır. Bu sayede izinli bir personelin görevlerinin toplam çalışma zamanı az olan personellere verilmesine imkan verilerek işin aksamaması sağlanmaktadır. Yani günlük çalışma zamanından az çalışma süresi olan personellerin boş zamanları bu şekilde değerlendirilmektedir.

Personeller üzerine oluşan ortalama REBA skoru açısından değerlendirildiğinde önerilen modelde yer alan kısıt (7) nedeniyle ortalama REBA skoru yedi ile sınırlandırılmıştır. Bir personel dışında diğer tüm personelin belirlenen ergonomik yük skoru sınırında veya göreceli olarak üzerinde bir skor elde ettiği görülmüştür. Personel iki ve dört sırasıyla 7.539 ve 7.540 skorları ile belirlenen ergonomik yük skoru açısından en yüksek riski barındırmaktadırlar. İlgili personelin ergonomik yüklerini azaltmak veya etki eden yükten görecekları zararı azaltmak adına görevin yerine getirilmesi için daha etkili araç ve gereçlerin kullanılması veya geliştirilmesi önerilebilir.

Tablo 3. Görevlere ait REBA skorları

Görev	Grup A			Grup B			Yük/ Kuvvet	Kavrama	Hareket	A skoru	B skoru	C skoru	REBA skoru
	Gövde	Boyun	Bacak	Üst Kol	Alt Kol	Bilek							
Çamur Hammadde Tartım	4	2	3	5	2	2	3	1	2	10	9	14	14
Değirmen Doldurma	4	3	4	5	2	3	3	1	3	12	9	15	15
Değirmen Su Verme	2	1	1	1	1	1	0	0	0	2	1	1	1
Çamur Eleme	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
Çamur Tanka Basma	1	1	1	1	1	1	2	0	0	3	1	2	2
Pres Boşaltma	3	3	3	4	2	2	3	2	3	10	8	15	15
Sır Hammadde Tartım	4	2	4	5	2	2	3	1	3	11	9	15	15
Sır Değirmen Doldurma	4	3	3	1	2	3	3	1	3	11	4	14	14
Sır Eleme	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
Sır Ayarlama ve Renklendirme	2	2	1	2	2	1	3	2	1	6	4	8	8
Dış Gövde Şekillendirme	3	3	1	4	2	2	2	3	3	7	9	13	13
Taşıyıcı Şekillendirme	3	3	1	4	2	2	2	3	3	7	9	13	13
Dış Gövde Rötüşlama	2	2	1	3	2	3	2	0	3	5	5	9	9
Dış Gövde Sırlama	4	3	1	3	2	2	2	0	2	8	5	12	12
Fırın Yükleme	2	2	1	5	2	3	3	0	3	6	8	12	12
Fırın Boşaltma	2	2	1	5	2	3	3	0	3	6	8	12	12
Dış Gövde Kesme	1	1	1	2	2	2	2	0	0	3	3	3	3
Taşıyıcı Kesme	1	1	1	2	2	2	2	0	0	3	3	3	3
Dış Gövde Kanal Açma	1	1	1	2	2	2	2	0	0	3	3	3	3
Taşıyıcı Kanal Açma	1	1	1	2	2	2	2	0	0	3	3	3	3
Dış Gövde Kalite Ayrım	3	2	1	3	2	3	2	0	2	6	5	10	10
Taşıyıcı Kalite Ayrım	3	2	1	3	2	3	2	0	2	6	5	10	10
Kontak Başlık Kesme	4	2	1	2	2	2	0	0	1	5	3	5	5
Kontak Başlık Şekillendirme	2	2	1	2	1	2	0	0	0	3	2	3	3
Kontak Başlık Kanal Açma	2	2	1	3	2	2	0	0	0	3	5	4	4
Yay Sarma	2	1	1	1	1	3	0	0	1	2	2	3	3
Tarak Presleme	2	2	1	2	1	2	0	0	0	3	2	3	3
Delikli Kapak Presleme	2	2	1	2	1	2	0	0	0	3	2	3	3
Kum Sonlandırıcı Presleme	2	2	1	2	1	2	0	0	0	3	2	3	3
Son Kapak Presleme	2	2	1	2	1	2	0	0	0	3	2	3	3
Tarak Takma	2	1	1	1	2	3	0	0	1	2	3	3	3
Gösterge Elemanı Yapma	1	3	1	1	2	2	0	0	0	3	2	3	3
Erime Hattı Sarma	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	4	5	5
Kontak Başlık Sıvama	1	1	1	1	1	1	1	1	0	2	2	2	2
Taşıyıcı Puntalama	1	2	1	1	1	3	1	1	1	2	3	3	3
Gösterge Elemanı Takma	3	3	2	2	2	3	1	1	2	7	5	11	11
Tarak Puntalama	1	2	2	1	1	3	1	1	1	3	3	4	4
Delikli Kapak Sıvama	1	1	1	1	1	1	1	1	0	2	2	2	2
Kumlama	1	1	1	1	1	1	2	1	1	3	2	4	4
Kum Sonlandırma Takma	2	1	1	1	1	1	2	0	0	4	1	3	3
Son Kapak Sıvama	1	1	1	1	1	1	2	0	0	3	1	2	2
Etiketleme ve Paketleme	3	2	2	3	2	3	2	1	1	7	6	10	10
Kolileme ve İstifleme	5	3	3	4	2	3	3	1	3	12	8	15	15

Önerilen KP modeli sonuçları EPGÇP için matematiksel model önerisinde bulunarak çözüm geliştiren Alakaş vd. (2020) çalışması sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Alakaş vd. (2020) çalışmasının sonuçları ile aynıdır. Bu durum önerilen KP modelinin etkili çözüm ürettiğinin bir göstergesidir.

Tablo 5'te verilen sonuçlar ise EPGÇP'yi ergonomik kısıtları göz önüne almaksızın ele alan son yıllardaki bir çalışma olan Pınarbaşı ve Alakaş (2020) çalışması ile karşılaştırmalı sonuçları içermektedir. Bu karşılaştırmadaki amaç ergonomik yüklerin personel görev ataması sonuçlarındaki etkisini incelemektir. Önerilen KP modeli Pınarbaşı ve Alakaş (2020) çalışmasına göre çalışılan zaman açısından değerlendirildiğinde önerilen modelin daha dengeli bir atama yaptığı söylenebilir. Benzer şekilde ilgili çalışmalar bir personele atanan ortalama görev sayısı açısından değerlendirildiğinde, KP modelinin daha dengeli atama yaptığı görülmektedir. Pınarbaşı ve Alakaş (2020) çalışmasında toplam iş yükünün çoğunun ilk sekiz personele atandığı görülürken KP modelinde görev dağılımı daha adil yapılabilmektedir. Ayrıca bu çalışmanın bir katkısı da personelin ergonomik risk yükünü de göz önüne almasıdır. Bu çalışma da göstermiştir ki ergonomik yüklerin personel görev atamasında dikkate alınması daha etkili, dengeli ve etkin bir görev çizelgesinin oluşmasını sağlamıştır.

Tablo 4. Personel görev çizelgeleme sonuçları

Görev	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	REBA	Toplam Personel Sayısı
Çamur Hammadde Tartım							1	1					14	2
Değirmen Doldurma	1			1				1			1		15	4
Değirmen Su Verme												1	1	1
Çamur Eleme										1			1	1
Çamur Tanka Basma		1											2	1
Pres Boşaltma	1			1									15	2
Sır Hammadde Tartım				1									15	1
Sır Değirmen Doldurma			1	1									14	2
Sır Eleme	1												1	1
Sır Ayarlama ve Şekillendirme		1							1				8	2
Dış Gövde Şekillendirme						1				1			13	2
Taşıyıcı Şekillendirme									1			1	13	2
Dış Gövde Rötüşlama							1				1		9	2
Dış Gövde Sırlama									1	1			12	2
Fırın Yükleme		1					1	1					12	3
Fırın Boşaltma	1	1			1			1					12	4
Dış Gövde Kesme										1			3	1
Taşıyıcı Kesme										1			3	1
Dış Gövde Kanal Açma							1						3	1
Taşıyıcı Kanal Açma											1		3	1
Dış Gövde Kalite Kontrol											1		10	1
Taşıyıcı Kalite Ayrım												1	10	1
Kontak Başlık Kesme						1						1	5	2
Kontak Başlık Şekillendirme										1			3	1
Kontak Başlık Kanal Açma											1		4	1
Yay Sarma						1							3	1
Tarak Presleme		1									1		3	2
Delikli Kapak Presleme												1	3	1
Kum Sonlandırıcı Presleme										1			3	1
Son Kapak Presleme		1											3	1
Tarak Takma			1										3	1
Gösterge Elemanı Yapma				1									3	1
Erime Hattı Sarma	1												5	1
Kontak Başlık Sıvama								1					2	1
Taşıyıcı Puntalama					1								3	1
Gösterge Elemanı Takma			1										11	1
Tarak Puntalama							1						4	1
Delikli Kapak Sıvama			1										2	1
Kumlama							1						4	1
Kum Sonlandırma Takma						1							3	1
Son Kapak Sıvama												1	2	1
Etiketleme ve Paketleme					1								10	1
Kolileme ve İstifleme				1									15	1
Toplam Çalışma	358	228	498	509	429	489	444	458	430	509	447	335		
Toplam Görev Sayısı	5	6	4	6	3	4	6	5	5	5	6	6		
Ortalama REBA Skoru	7.095	7.539	7.195	5.540	7.431	7.176	7.176	7.066	7.012	7.077	7.134	7.128		

Yapılan çalışmanın firmaya olan katkısı değerlendirildiğinde, görev atamalarının henüz göreve başlanmadan önce belirlenmiş olması personelin iş yeri memnuniyeti, motivasyonu ve çalışma azmi açısından olumlu katkılar sunacaktır. İşletmenin personel görev ataması ve çizelgelemesi için öngörülecek bir matematiksel altyapı sunulabilmiştir. Personellerin ergonomik açıdan değerlendirilmiş bir şekilde görev edinmesi firmanın mesleki hastalıklar riskinin düşmesine de neden olacaktır. Benzer etki personel sağlığı üzerinde de görülecektir. Çalışma ile elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ile firma ergonomik riskleri azaltmak için bir yol haritasına da kavuşmuş olacaktır.

Tablo 5. Pınarbaşı ve Alakaş (2020) ve KP modeli sonuçlarının karşılaştırılması

Personel	Pınarbaşı ve Alakaş (2020)			KP Modeli		
	Çalışılan Zaman	Boş Zaman	Atanan Toplam Görev Sayısı	Çalışılan Zaman	Boş Zaman	Atanan Toplam Görev Sayısı
1	240	270	6	358	152	5
2	285	225	6	228	282	6
3	489.59	20.41	6	498	12	4
4	417.92	92.08	6	509	1	6
5	491.67	18.33	6	429	81	3
6	486.68	23.32	6	489	21	4
7	336.68	173.32	6	444	66	6
8	382.01	127.99	6	458	52	5
9	502.02	7.98	5	430	80	5
10	506.17	3.83	4	509	1	5
11	506.68	3.32	2	447	63	6
12	500	10	2	335	175	6

6. Sonuç

Bu çalışmada personel görev çizelgeleme problemi ergonomik risk skorlarını da dikkate alarak çözülmüştür. Problemin çözümü için bir kısıt programlama modeli önerilmiştir. Geliştirilen KP modeli REBA metodu ile elde edilen üç farklı REBA skorunun amaç programlama tabanlı bir çok amaçlı amaç fonksiyonunu en iyilemek üzere kurulmuştur. Model ergonomik kısıtların yanı sıra bir personele atanması gereken toplam görev sayısı, personel üzerindeki ergonomik risk yükü, günlük toplam çalışma zamanı gibi firmanın teknolojik kısıtlarını da içermektedir. Önerilen model orta gerilim sigorta üretimi yapan bir firmadan elde edilen gerçek veriler ile test edilmiştir. Görevler için ergonomik risk yükünün değerlendirilmesi için REBA metodundan faydalanılmıştır. Görev REBA skorlarının belirlenmesinde, uzmanlar ve firma yöneticilerinin tecrübelerinden faydalanılmanın yanı sıra görevlerin bizzat uygulama alanlarında gözlemlenmesi metodu da kullanılmıştır. Önerilen KP modelinin performansı PGÇP için bir çözüm önerisi sunan Pınarbaşı ve Alakaş (2020) çalışması ve EPGÇP için bir matematiksel model önerisi yapan Alakaş vd. (2020) çalışması sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalı değerlendirmeler önerilen KP modelinin problemin çözümü için etkili ve umut vadeci bir yaklaşım olduğunu göstermiştir. Gelecek çalışma önerileri olarak dikkate alınan problemin görev sürelerini bir dağılıma uyduğunu kabul etmek, personellerin sağlık ve yeteneklerini de dikkate almak, görevlerin planlama ufkunu genişletmek gibi önerilerde bulunmak mümkündür. Modelin büyük veri setli problemlerin çözümünde etkili olabilmesi yeni KP arama stratejilerinin geliştirilmesi, KP ve sezgisel bütünleşik çözüm metodlarının geliştirilmesi de umut vadeci gelecek çalışma önerileri olarak verilebilir. Bunların yanı sıra ışık, termal etki, metabolik faktörler gibi farklı ergonomik ölçütlerin dikkate alındığı yeni problemler de dikkate değer gelecek bir çalışma olacaktır.

Ek A. REBA Skor Tabloları

Bu bölümde Bölüm 3'te REBA skoru hesaplama algoritmasında kullanılan skor tabloları verilmiştir. Bölüm 3'te bahsedilen ilgili skor Tablo A, Tablo B, Tablo C, Tablo D ve Tablo E'den uygun olanı seçilerek belirlenebilir.

Tablo A. Gövde, boyun ve bacak pozisyonları için skor tablosu

Skor A	Bacak	Boyun											
		1				2				3			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Gövde	1	1	2	3	4	1	2	3	5	3	3	5	6
	2	2	3	4	5	3	4	5	6	4	5	6	7
	3	2	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8
	4	3	5	6	7	5	6	7	8	6	7	8	9
	5	4	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	9

Tablo B. Üst kol, alt kol ve bilek pozisyonları için skor tablosu

Skor B	Alt kol						
	Bilek	1			2		
		1	2	3	1	2	3
Üst kol	1	1	2	2	1	2	3
	2	1	2	3	2	3	4
	3	3	4	5	4	5	5
	4	4	5	5	5	6	7
	5	6	7	8	7	8	8
	6	7	8	8	8	9	9

Tablo C. Genel skor matrisi

Skor A (Tablo A + yük/kuvvet skoru)	Skor C											
	Skor B, (Skor B + kavrama skoru)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	1	2	3	3	4	5	6	7	7	7
2	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8
3	2	3	3	3	4	5	6	7	7	8	8	8
4	3	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9
5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9
6	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10
7	7	7	7	8	9	9	9	10	10	11	11	11
8	8	8	8	9	10	10	10	10	10	11	11	11
9	9	9	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12
10	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12
11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12
12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Tablo D. Aktivite skoru

+1, bir veya birden fazla vücut parçası bir dakikadan daha uzun süre statiktir.
+1, Tekrarlanan küçük hareketler (dakikadan dörtten fazla hareket)
+1, Görev vücut duruşu veya dengesinde hızlı ve geniş aralıklı değişkenliğe sahiptir.

Tablo E. REBA genel skoru

1 = ihmal edilebilir risk
2 or 3 = düşük risk, değişiklikler gerekebilir
4 to 7 = orta risk, daha fazla araştırma gerekebilir
8 to 10 = yüksek risk, değişiklikler araştırılmalı ve uygulanmalı
11+ = çok yüksek risk, acilen değişiklikler uygulanmalı

Referanslar

- Adem, A., & Dağdeviren, M. (2016). Ergonomik personel çizelgeleme konusu üzerinde bir literatür araştırması. Uluslararası 16. Üretim Araştırmaları Sempozyumu, İstanbul Teknik Üniversitesi, 12-14 Ekim, 9-14, İstanbul, Türkiye.
- Alakaş, H., Pınarbaşı, M., Sönmez, İ., & Yüksel, A. (2020). Ergonomic personnel-task scheduling problem: A medium voltage insurance production application. *Journal of Turkish Operations Management*, 4(2), 433-448.
- Anzanello, M.J., Fogliatto, F.S. & Santos, L. (2014). Learning dependent job scheduling in mass customized scenarios considering ergonomic factors. *Int. J. Production Economics*, 154, 136–145.
- Cuesta-Asensio, S., Diego-Mas, J.A., Canós-Darós, L., & Andrés-Romano, C. (2012). A genetic algorithm for the design of job rotation schedules considering ergonomic and competence criteria. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(9-12), 1161-1174.
- Bedir, N., Eren, T., & Dizdar, E.N. (2017). Ergonomik Personel Çizelgeleme ve Perakende Sektöründe Bir Uygulama. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 5(3), 657 - 674.
- Boenzi, F., Digiesi, S., Mossa, G., Mummolo, G., & Romano, V.A. (2015). Modelling Workforce Aging in Job Rotation Problems. *IFAC- PapersOnLine*, 48(3), 604–609.
- Carnahan, B., Redfern, M.S. & Norman, B. (2000). Designing safe job rotation schedules using optimization and heuristic search, *Ergonomics*, 43(4), 543-560.
- Charnes, A. & Cooper, W.W. (1977). Goal programming and multiple objective optimizations: Part I. *European Journal Of Operational Research*, 1(1), 39-54.
- De Silva, A. (2001). Combining constraint programming and linear programming on an example of bus driver scheduling. *Annals of Operations Research*, 108(1-4), 277-291.
- Eren T., Özder E.H., Alakaş H.M., & Özcan E. (2019). Kısıt Programlama Yaklaşımıyla Güvenlik Personeli Çizelgeleme Probleminin Çözümü. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 4(2), 16-25.
- Gür, Ş., Eren, T., & Alakaş, H.M. (2019). Surgical Operation Scheduling with Goal Programming and Constraint Programming: A Case Study. *Mathematics*, 7, 251.
- Hignett, S. & Mcatamney, L. (2000). Rapid entire body assessment (REBA). *Applied ergonomics*, 31(2), 201-205.
- Kaçmaz, S., Alakaş, H., & Eren, T. (2020). Ergonomic Staff Scheduling Problem With Goal Programming In Glass Industry. *Journal of Turkish Operations Management*, 4(1), 369-377.
- Kostreva, M., McNeli, E. & Clemens, E. (2002). Using a circadian rhythms model to evaluate shift schedules. *Ergonomics*, 45(11), 739-763.
- Malladi, S. & Min, K. J. (2004). Workforce scheduling with costs and ergonomic considerations. Paper presented at the IIE Annual Conference, Institute of Industrial Engineers, May 15-19, 2004, Hilton Americas, Houston, Texas.
- Mossa, G., Boenzi, F., Digiesi, S., Mummolo, G., & Romano, V.A. (2016). Productivity and ergonomic risk in human based production systems: A job-rotation scheduling model. *Int. J. Production Economics*, 171, 471–477.
- Otto, A. & Scholl, A. (2013). Reducing ergonomic risks by job rotation scheduling. *OR Spectrum* 35, 711–733.
- Özcan, E., Alakaş, H.M., Yelek, A., & Eren, T. (2020). Kısıt programlama ve hedef programlama entegrasyonu ile vardiya çizelgelemesi: Hidroelektrik santral uygulaması. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(4), 916-929.
- 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.

- Pınarbaşı, M. (2021). New chance-constrained models for U-type stochastic assembly line balancing problem. *Soft Computing*, 25, 9559–9573.
- Pınarbaşı, M., & Alakaş, H.M. (2020). Personel Görev Çizelgeleme Problemi İçin Bir Excel Çözücü Modeli: Orta Gerilim Sigorta Üretimi Uygulaması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(2), 729-744.
- Pour, S.M., Drake, J.H., Ejlertsen, L.S., Rasmussen, K.M., & Burke, E. (2018). Constraint Programming/Mixed Integer Programming framework for the preventive signaling maintenance crew scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 269(1), 341-352.
- Rattanamanee, T. & Nanthavanij, S. (2013). Multi-Workday Ergonomic Workforce Scheduling With Days Off. *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering, Project, and Production Management*, 1(1), 1117-1125.
- Rodriguez, J. (2007). A Constraint programming model for real-time train scheduling at junctions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(2), 231-245.
- Seçkiner, S.U. & Kurt, M. (2005). Bütünleşik Tur-Rotasyon Çizelgeleme Yaklaşımı İle İşyükü Minimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(2), 161-169.
- Trilling, L., Guinet, A., & Le Magny, D. (2006). Nurse scheduling using integer linear programming and constraint programming. *IFAC Proceedings Volumes*, 39(3), 671-676.
- Wang, T.C. & Liu, C.C. (2014). Optimal Work Shift Scheduling with Fatigue Minimization and Day Off Preferences. *Mathematical Problems in Engineering*, 1(1), 1-8.
- Wongwien, T. & Nanthavanij, S. (2012). Ergonomic workforce scheduling under complex worker limitation and task requirements: Mathematical model and approximation procedure. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, 34(5), 541-549.
- Wongwien, T. & Nanthavanij, S. (2013). Ergonomic Workforce Scheduling With Productivity And Employee Satisfaction Consideration. *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering, Project, and Production Management*, 1(1), 1108-1116.
- Yaoyuanyong, S. & Nanthavanij, S. (2006). Hybrid procedure to determine optimal workforce without noise hazard exposure. *Computers & Industrial Engineering*, 51(4), 743-764.



MÜHENDİSLİK
FAKÜLTESİ

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

UMAGD, (2022) 14(1), 155-163.



10.29137/umagd.978415

Cilt/Volume:14 Sayı/Issue:1 Ocak/January 2022

Araştırma Makalesi / Research Article

A Substantially Improved New Algorithm for Flowshop Scheduling Problem with Uncertain Processing Times

Muberra Allahverdi¹

¹ Department of Mathematical Sciences, School of Natural Sciences, Kean University, 1000 Morris Ave, Union, NJ 07083, USA

Başvuru/Received: 03/08/2021

Kabul / Accepted: 18/09/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Abstract

The performance measure of total completion time (TCT) plays a key role in manufacturing to improve performance, e.g., reducing inventory levels. Moreover, since uncertainty is an inevitable part of certain manufacturing environments, it is especially important to address cases with uncertain processing times. This paper addresses the four-machine flowshop scheduling problem to minimize TCT with uncertain processing times. Due to the NP-hardness of the problem, different algorithms were presented as solutions in scheduling literature. In this paper, a new substantially improved algorithm is proposed and parameters of the algorithm are fine tuned. The proposed algorithm is compared to the best existing algorithm (RAIRO Operations Research 54, 529–553, 2020) in scheduling literature using extensive computational experiments and statistical analysis. Computational methods using the programming language python, along with statistical inference, is used to confirm the effectiveness of the proposed algorithm over the existing ones. Computational methods reveal that the proposed algorithm is, on average, 86.8% more effective than the best existing one in literature with similar computational times. A test of hypothesis further confirms the effectiveness of the proposed algorithm with a p-value of less than 0.00001, which is practically zero.

Key Words

“Algorithm, uncertain processing times, flowshop scheduling, total completion time”

1. Introduction

A manufacturing process where jobs flow from one machine to the next is known as a flowshop. Total completion time (TCT) is the sum of the completion times of all jobs in the last machine. Minimizing the total completion time is pivotal in increasing performance during manufacturing and ensuring competition among companies, Chen (2015). Furthermore, the total completion time is directly related to inventory levels, lead times, and work in process (Framinan and Perez-Gonzalez 2017a, Framinan and Perez-Gonzalez 2017b), which makes it an essential performance measure to consider for better production.

The processing time of job j on a certain machine is the amount of time required to process job j on that machine. In some cases, processing times are deterministic. Nonetheless, it is not always possible to correctly predict processing times due to a number of uncertainties in a manufacturing environment, including machine operator fatigue, new technology, tool conditions, and poor experience, Tayanithi et al. (1992). Further uncertainties include the breakdown of equipment, incorrect predictions, the absence of workers, and new jobs with no past data. Moreover, Mahjoub et al. (2011) stated that data might be subject to some uncertainties, and thus, it is impossible in practice to accurately estimate the parameters of some scheduling problems. Seif et al. (2020) stated another case (maintenance) where job processing times can be modelled as uncertain.

Attempting to reduce TCT while ignoring these uncertainties may severely affect performance. This is especially true with manufacturing environments that are known to have a wide range of uncertainties. In such environments, not only is it inefficient to consider deterministic processing times, it is also disadvantageous to consider a certain probability distribution. Firstly, past data is necessary to predict a probability distribution which may not always be available. Secondly, a probability distribution is useful only with a large number of realizations. When the number is small, the probability distribution will not be of much use. See Kouvelis and Yu (1997) for further discussion.

Taking the above into account, we address the problem of minimizing the total completion time of a four-machine flowshop problem with uncertain processing times. No assumptions are made about this job descriptor and no particular probability distribution is considered. The only conditions assumed are possible lower and upper bounds for processing times.

Similar problems have been solved for cases related to two and three machines, including Allahverdi and Sotskov (2003) which establishes dominance relations to minimize C_{max} for a two-machine flowshop problem, Allahverdi and Aydilek (2010a) which proposes some polynomial time algorithms for the same problem, Allahverdi and Aydilek (2010b) which solves the two-machine problem with the objective of minimizing maximum lateness when processing times are uncertain, Sotskov et al. (2004) which establishes dominance relations for the two-machine problem with uncertain processing times to minimize total completion time, and Allahverdi and Aydilek (2010c) proposes an improved heuristics for the same problem and indicates the improvement through computational experiments.

Furthermore, Sotskov et al. (2004) investigates the case of three machines with uncertain setup times with the objective of minimizing TCT. Some other papers, including Aydilek et al. (2013, 2015, 2017), Lai et al. (1997) and Lai and Sotskov (1999) also look into various scheduling environments with uncertain processing or setup times.

Finally, Allahverdi and Allahverdi (2020) addresses the four machine flowshop scheduling problem to minimize TCT with uncertain processing times. Ten algorithms are proposed to minimize TCT with uncertain processing times, and one of them is established as the best performing algorithm with the lowest TCT. In this paper, we develop a new algorithm using the python programming language which is substantially better than the best algorithm given in Allahverdi and Allahverdi (2020). We confirm the effectiveness of the new algorithm through computational methods and statistical inference. The percentage improvement of the one established in this paper is on average 86.8% better than the best existing one in literature.

2. A New Algorithm

The problem of a four machine flowshop with the objective of minimizing TCT with uncertain processing times was addressed by Allahverdi and Allahverdi (2020). They proposed different algorithms to solve the problem and showed that one of the algorithms performs the best. In this section, we propose a new algorithm and show that the new algorithm significantly outperforms the best algorithm of Allahverdi and Allahverdi (2020).

Let n be the number of jobs. Let $t_{j,k}$ be the processing time of job j on machine k and let $t_{[j,k]}$ be the processing time of the job in position j on machine k . Let $Lt_{j,k}$ and $Ut_{j,k}$ be the lower and upper bounds of $t_{j,k}$.

The shortest processing time (SPT) sequence is known to give an optimal solution for a single machine problem with the TCT performance measure. Since the case of two-machines is known to be NP-hard, our problem is NP-hard as well. Hence, we attempt to use a variation of the SPT for a four-machine case. Essentially, we propose formulas to combine the processing times (or the upper and lower bounds of the processing times when the processing times are uncertain) of a particular job into a single processing time by

giving the processing time on each machine a different weight. In other words, a single machine problem is obtained after using the formula and the SPT is used on the single machine problem to predict a solution.

The formula used to combine the four upper and lower bounds of the processing times for job i on the four machines into a single processing time is as follows,

$$\alpha(L_{t,r,1} + U_{t,r,1})/2 + \beta(L_{t,r,2} + U_{t,r,2})/2 + \gamma(L_{t,r,3} + U_{t,r,3})/2 + \delta(L_{t,r,4} + U_{t,r,4})/2 \quad (1)$$

Given a value of n and generated values for the upper $U_{t,i,k}$ and lower bounds $L_{t,i,k}$, our aim is to find appropriate values for the variables $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ to minimize the TCT of a sequence which is computed using the new algorithm proposed in this paper.

Steps of the New Algorithm

1. Generate the upper bounds $U_{t,i,k}$ for processing times from $U(1,100)$
2. Generate the lower bounds of processing times $L_{t,i,k}$ from $U(\max(1, U_{t,i,k} - \Delta), U_{t,i,k})$ where Δ is set to the values 10,20, and 30.
3. Let $r=1$
4. Compute w_i as
 $\alpha(L_{t,i,1} + U_{t,i,1})/2 + \beta(L_{t,i,2} + U_{t,i,2})/2 + \gamma(L_{t,i,3} + U_{t,i,3})/2 + \delta(L_{t,i,4} + U_{t,i,4})/2$ for $i=1, \dots, n$.
5. Let $r = r + 1$
6. If $r < n$, go to Step 4. Otherwise, continue.
7. Sequence the jobs according to SPT based on the 'processing times' w_i .

To summarize, upper bounds of processing times $U_{t,i,k}$ are generated from $U(1,100)$ and lower bounds $L_{t,i,k}$ are generated from $U(\max(1, U_{t,i,k} - \Delta), U_{t,i,k})$ where Δ is set to 10, 20, and 30. Hence, Δ determines how to generate the lower bound based on the upper bound. Finally, Formula (1) is used to transform a four machine problem into a single machine problem so that the SPT can be used to determine a sequence.

3. Fine Tuning Parameters of the Algorithm

We aim to find the best values for $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ by checking all possibilities from 0.05 to 1 with an increment of 0.05 such that $\alpha + \beta + \gamma + \delta = 1$. The following is a summary for the code which is written in the python programming language.

1. A list is created containing all combinations of $\alpha, \beta, \gamma, \delta \in [0.05, 0.1, 0.15, 0.20, 0.25, \dots, 1]$ such that $\alpha + \beta + \gamma + \delta = 1$. It is allowed for a certain variable to take the same value more than once as long as the combination $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ is different.
2. Let $r = 1$
 - a For a given n , do the following:
 - i For each Δ in [10, 20, 30], where Δ is defined as above, do the following:
 - 1 Upper and lower bounds of processing times are generated based on n and Δ
 - 2 For every possibility of $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ such that $\alpha + \beta + \gamma + \delta = 1$, we do the following: we use the following formula to combine the four machine problem into a single machine problem, where the "processing time" for the i th job is $\alpha(L_{t,i,1} + U_{t,i,1})/2 + \beta(L_{t,i,2} + U_{t,i,2})/2 + \gamma(L_{t,i,3} + U_{t,i,3})/2 + \delta(L_{t,i,4} + U_{t,i,4})/2$ and the SPT is used to determine the order of the sequence based on this formula.
 - b After completing Step a, we take the sequence with the shortest total completion time and add the parameters $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ used for that sequence to Table 1.
3. If $r \leq 30$, let $r=r+1$ and go to Step 3

Table 1 displays the best parameters for each replication. As evident from the table, the numbers are more or less alike.

Table 1. Best parameters for each of the 30 replications

Replication	α	β	γ	δ
1	0.35	0.35	0.25	0.05
2	0.25	0.35	0.2	0.2
3	0.25	0.3	0.3	0.15
4	0.25	0.25	0.25	0.25
5	0.4	0.2	0.2	0.2
6	0.4	0.35	0.15	0.1
7	0.25	0.3	0.25	0.2
8	0.3	0.25	0.2	0.25
9	0.4	0.35	0.2	0.05
10	0.25	0.3	0.25	0.2
11	0.3	0.25	0.2	0.25
12	0.3	0.3	0.25	0.15
13	0.3	0.2	0.25	0.25
14	0.4	0.25	0.2	0.15
15	0.3	0.25	0.2	0.25
16	0.25	0.25	0.25	0.25
17	0.35	0.3	0.15	0.2
18	0.35	0.25	0.2	0.2
19	0.3	0.3	0.2	0.2
20	0.3	0.25	0.25	0.2
21	0.35	0.35	0.15	0.15
22	0.35	0.15	0.25	0.25
23	0.35	0.3	0.15	0.2
24	0.3	0.25	0.2	0.25
25	0.35	0.25	0.25	0.15
26	0.35	0.3	0.15	0.2
27	0.3	0.25	0.3	0.15
28	0.25	0.25	0.25	0.25
29	0.25	0.25	0.25	0.25
30	0.3	0.25	0.3	0.15

The average and median of each parameter are given in Table 2.

Table 2. Mean and median for each parameter

Replication	α	β	γ	δ
Mean	0.313	0.273	0.222	0.192
Median	0.3	0.25	0.225	0.2

As seen in the Table 2, the mean and median are very similar, which implies the accuracy of the parameter predictions. The averages were rounded to 3 decimal places since they must add up to 1.

4. Comparing the proposed algorithm (new-alg) and the existing best algorithm (old-alg)

Substituting the parameters $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ with the averages of the above predictions, the following formula is obtained

$$0.313(L_{t,r,1} + U_{t,r,1})/2 + 0.273(L_{t,r,2} + U_{t,r,2})/2 + 0.222(L_{t,r,3} + U_{t,r,3})/2 + 0.192(L_{t,r,4} + U_{t,r,4})/2 \tag{2}$$

We follow the algorithm outlined in Section 2, New Algorithm, with Formula 2 above and conduct computational experiments to compare the new algorithm to the best algorithm given in Allahverdi and Allahverdi (2020).

For every combination of n and Δ , where $n = 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200$ and $\Delta = 10, 20, 30$, we generate 1000 replications and compute the error of each algorithm using the formula

$$\text{Error}(\text{alg}) = 100(\text{TCT}(\text{alg}) - \min(\text{TCT}(\text{old-alg}), \text{TCT}(\text{new-alg}))) / \min(\text{TCT}(\text{old-alg}), \text{TCT}(\text{new-alg})) \quad (3)$$

for $\text{alg} = \text{old-alg}$ and new-alg .

In total we look at $(10)(3)(1000) = 30000$ instances. The results are given in Table 3. The first two columns list the n and Δ values. The table has 30 rows since there are 30 different combinations of n and Δ . The third and four columns list the average errors computed using Formula 3. The fifth and sixth columns list the standard deviations of the old and new algorithms and the percentage improvement shows the improvement of the new algorithm's error compared to that of the old algorithm.

Table 3. Comparing old-alg and new-alg

n	Δ	old-alg error	new-alg error	old-alg st dev	new-alg st dev	percentage imp.
20	10	2.78	0.58	3.3	1.24	79.14
20	20	2.76	0.6	3.19	1.36	78.26
20	30	3.06	0.52	3.24	1.23	83.01
40	10	2.73	0.36	2.63	0.94	86.81
40	20	2.7	0.38	2.65	0.98	85.93
40	30	2.91	0.38	2.87	0.97	86.94
60	10	2.67	0.27	2.43	0.73	89.89
60	20	2.83	0.34	2.63	0.93	87.99
60	30	2.61	0.31	2.38	0.85	88.12
80	10	2.41	0.31	2.18	0.85	87.14
80	20	2.66	0.28	2.37	0.77	89.47
80	30	2.65	0.3	2.35	0.84	88.68
100	10	2.42	0.31	2.17	0.79	87.19
100	20	2.49	0.31	2.23	0.8	87.55
100	30	2.49	0.3	2.29	0.82	87.95
120	10	2.22	0.26	1.99	0.72	88.29
120	20	2.36	0.26	2.15	0.7	88.98
120	30	2.25	0.3	2.13	0.78	86.67
140	10	2.21	0.26	1.98	0.68	88.24
140	20	2.33	0.27	2.14	0.7	88.41
140	30	2.31	0.29	2.06	0.76	87.45
160	10	2.26	0.24	1.95	0.64	89.38
160	20	2.23	0.32	2.03	0.78	85.65
160	30	2.31	0.27	2.07	0.71	88.31
180	10	2.08	0.24	1.93	0.64	88.46
180	20	2.06	0.29	1.93	0.73	85.92
180	30	2.18	0.32	1.95	0.77	85.32
200	10	2.04	0.27	1.83	0.71	86.76
200	20	2.09	0.26	1.93	0.69	87.56
200	30	2.1	0.32	1.97	0.79	84.76

As seen in Table 3, there is a considerable difference between the two algorithms. The average percentage improvement is 86.8% with a median of 87.5%, which is a very significant improvement with similar computational times.

The considerable gap between the errors of old-alg and new-alg are evident from Figure 1. The average error of old-alg is 2.44 while that of new-alg is 0.324. While the gap decreases slightly as n grows larger, it is more or less stable.

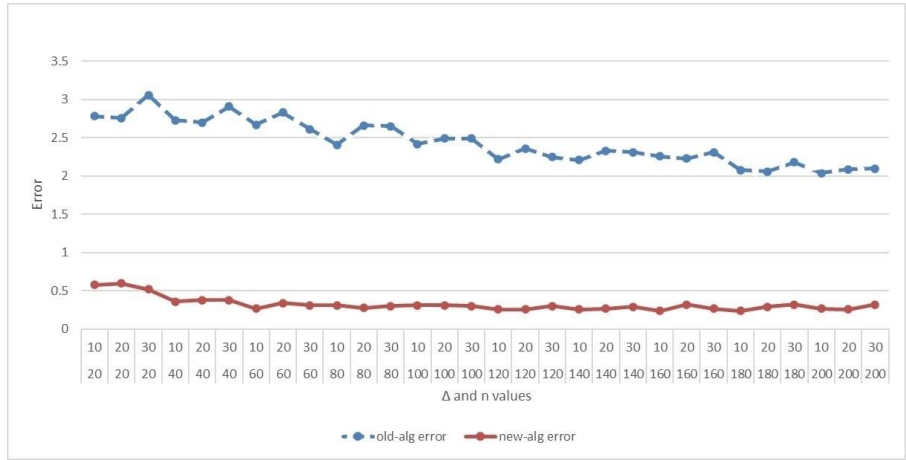


Figure 1. Error vs n and Δ

Figures 2 and 3 illustrate the percentage errors with different values of Δ and n . The percentage errors are almost the same for the three different values of Δ with the largest difference being around 0.5%. As n grows larger, there is a noticeable difference in the percentage error between $n = 20$ and $n = 60$, after which it seems to stabilize.

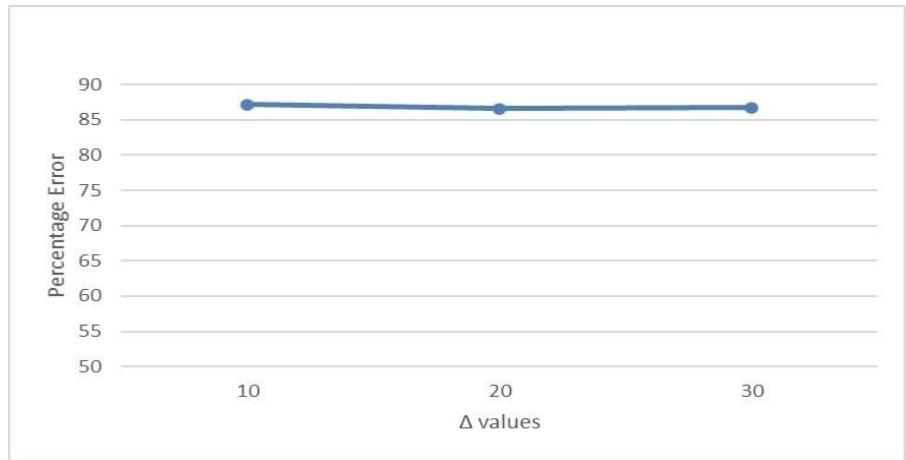


Figure 2. Percentage Error vs Δ

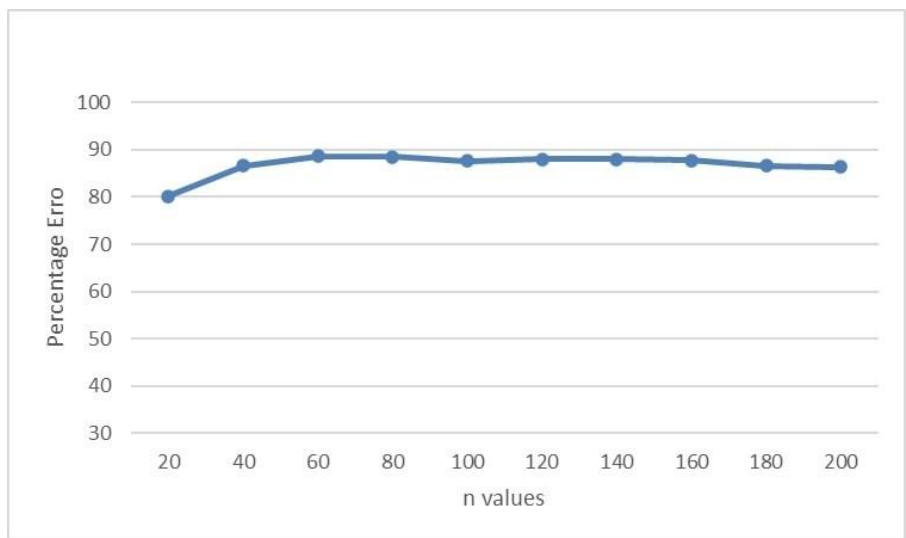


Figure 3. Percentage Error vs n

Finally, the last two figures illustrate the gap between the errors of old-alg and new-alg with different values of n and Δ . In both Figures 4 and 5, the gap seems more or less stable. However, while the gap is relatively stable, we do see a slight increase in the errors of both old-alg and new-alg in Figure 5, which is expected since as Δ increases so does the uncertainty.

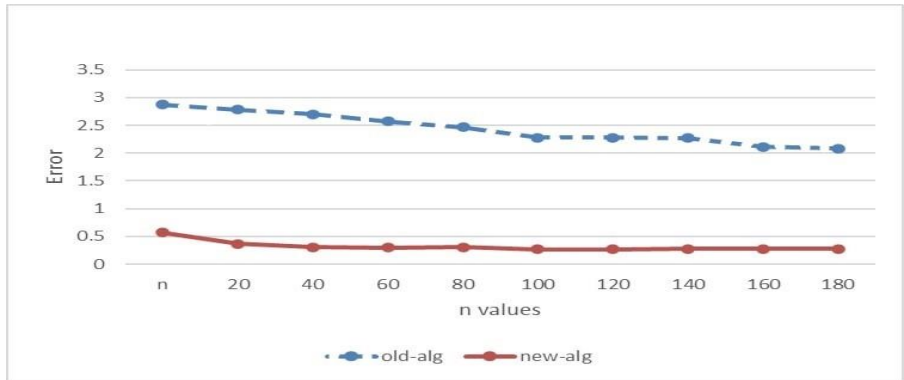


Figure 4. Error vs n

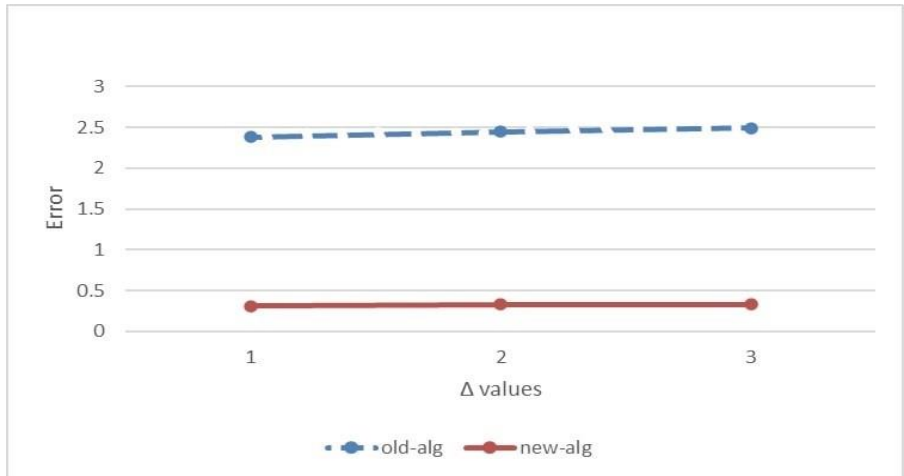


Figure 5. Error vs Δ

5. Hypothesis Testing

We conduct a hypothesis test to confirm the effectiveness of new-alg over old-alg as follows.

$$H_0: \mu_0 - \mu_1 = 0$$

$$H_1: \mu_0 - \mu_1 > 0$$

where μ_0 denotes the population mean of the TCT corresponding to old-alg and μ_1 to that of new-alg. The computed z-scores are listed in Table 4.

Table 4. Z-scores

n	delta	z-score
20	10	177.03
20	20	179.62
20	30	211.48
40	10	303.83
40	20	290.62
40	30	275.67
60	10	372.8
60	20	319.98
60	30	360.11
80	10	383.57
80	20	383.27
80	30	377.32
100	10	395.65
100	20	388.39
100	30	370.15
120	10	437.65
120	20	410.76
120	30	378.99
140	10	444.92
140	20	406.34
140	30	418.98
160	10	479.57
160	20	403.87
160	30	425.98
180	10	445.04
180	20	415.71
180	30	423.17
200	10	459.38
200	20	435.61
200	30	395.12

The average z-score is 372.35 and the median is 391.76. If we take $\alpha = 0.01$, we must check whether the calculated z-scores are greater than 2.33. This is obviously the case for every computed z-score. Hence, we reject the null-hypothesis that the means of old-alg and new-alg are the same and accept the alternative hypothesis that the mean of old-alg is greater than the mean of new-alg. The minimum z-score in the table is 177.03 and the p-value is $1 - \Phi(177.03) < 0.00001$, which is almost zero.

6. Conclusion

Reducing the total completion time (TCT) is an essential performance measure in scheduling since the TCT is directly related to performance, inventory levels, work-in-process, and so on. For scheduling environments with uncertain processing times, ignoring uncertainty can result in very poor performance. As a result, research has recently been conducted to address this issue and an algorithm was proposed by Allahverdi and Allahverdi (2020).

In this paper, we propose a new algorithm through computational methods and test the new algorithm by comparing it with the best existing algorithm in literature. Both algorithms have similar computational times and the percentage improvement of the proposed algorithm over the existing one is 86.8% on average, which is a substantial improvement.

Furthermore, a test of hypothesis is conducted and the null hypothesis that the proposed algorithm is equal to the existing one is refuted with a p-value of less than 0.00001. This strongly confirms the effectiveness of the new algorithm established in this paper.

We assume that setup times are included in processing times. Even though this might be true for some cases, it is not true for all. When setup times take considerable time and are not negligible compared to processing times, it is crucial to consider them separately in order to meet deadlines, eliminate waste, and increase productivity, Allahverdi (2015), Ha (2020), Lee and Kim (2021). Hence, an extension to the problem is to consider the processing times and setup times separately. Yet another extension is to consider the problem with a due date related performance measure, e.g., Costa et al. (2020).

References

- Allahverdi, A. 2015. The third comprehensive survey on scheduling problems with setup times/costs. *European Journal of Operational Research* 246, 345–378.
- Allahverdi, M., Allahverdi, A. 2020. Minimizing total completion time for flowshop scheduling problem with uncertain processing times. 54, 529–553.
- Allahverdi, A., Aydilek, H. 2010a. Heuristics for two-machine flowshop scheduling problem to minimize makespan with bounded processing times. *International Journal of Production Research* 48, 6367–6385.
- Allahverdi, A., Aydilek, H. 2010b. Heuristics for two-machine flowshop scheduling problem to minimize maximum lateness with bounded processing times. *Computers and Mathematics with Applications* 60, 1374–1384.
- Allahverdi, A., Aydilek, H. 2010c. Two-machine flowshop scheduling problem with bounded processing times to minimize total completion time. *Computers and Mathematics with Applications* 59, 684–693.
- Allahverdi, A., Sotskov, Y.N. 2003. Two-machine flowshop minimum length scheduling problem with random and bounded processing times. *International Transactions in Operational Research* 10, 65–76.
- Aydilek, A. Aydilek, H., Allahverdi, A. 2013. Increasing the profitability and competitiveness in a production environment with random and bounded setup times. *Int. Journal of Production Research* 51, 106–117.
- Aydilek, A. Aydilek, H., Allahverdi, A. 2015. Production in a two-machine flowshop scheduling environment with uncertain processing and setup times to minimize makespan. *Int. Journal of Production Research* 53, 2803–2819.
- Aydilek, A. Aydilek, H., Allahverdi, A. 2017. Algorithms for minimizing the number of tardy jobs for reducing production cost with uncertain processing times. *Applied Mathematical Modelling* 45, 982–996.
- Chen, J.F. 2015. Unrelated parallel-machine scheduling to minimize total weighted completion time. *Journal of Intelligent Manufacturing* 26, 1099–1112.
- Costa, M.R.C., Valente, J.M.S., Schaller, J.E. 2020. Efficient procedures for the weighted squared tardiness permutation flowshop scheduling problem. *Flexible Services and Manufacturing Journal* 32, 487-522.
- Framinan, J.M., Perez-Gonzalez, P. 2017a. The 2-stage assembly flowshop scheduling problem with total completion time: Efficient constructive heuristic and metaheuristic. *Computers and Operations Research* 88, 237–246.
- Framinan, J.M., Perez-Gonzalez, P. 2017b. New approximate algorithms for the customer order scheduling problem with total completion time objective. *Computers and Operations Research* 78, 181–192.
- Ha, C. 2020. Evolving ant colony system for large-sized integrated process planning and scheduling problem considering sequence-dependent setup times. *Flexible Services and Manufacturing Journal* 32, 523-560.
- Kouvelis, P., Yu, G. 1997. *Robust discrete optimization and its applications*. Kluwer Academic Publisher.



Kriyojenik Hidrojen Yakıtlı 100 kN İtki Kapasiteli Bir Roketin RPA Programı ile Kavramsal Tasarım ve Analizi

Conceptual Design and Analysis of a Cryogenic Hydrogen Fueled 100 kN Thrust Capacity Rocket with RPA Program

Safa Korkmaz¹ , Hayri Yaman² 

¹Milli Savunma Bakanlığı, Posta Kodu ve Ankara, Türkiye

²Kırıkkale Üniversitesi Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojisi Bölümü, 71450 ve Kırıkkale, Türkiye

Başyuru/Received: 14/08/2021

Kabul / Accepted: 10/10/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Bu çalışmada, kriyojenik hidrojen yakıtlı 100 kN itki kapasiteli bir roketin teorik itki odası tasarımı ve analizleri yapılmıştır. Oksitleyici olarak kriyojenik oksijen kullanılmıştır. Yanma odası basıncı 20 MPa ve nozul çıkış basıncı 0.101325 MPa sınır şartları olarak belirlenmiştir. Sınır şartları dahilinde RPA bilgisayar programı kullanılarak optimum roket geometrisi oluşturulmuştur. SOLIDWORKS programı ile üç boyutlu roket modeli çizilmiştir. Tasarımı yapılan roketin analizleri RPA ve CEA programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Roket iç balistik parametreleri olan basınç, sıcaklık ve Mak sayısı değişimleri incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre yanma odası sıcaklığı 3290.9 K ve nozul çıkış sıcaklığı 1310 K olarak ölçülmüştür. RPA ve CEA programlarından elde edilen nozul çıkış basıncı arzu edildiği gibi deniz seviyesi şartlarında 0.1013 MPa olarak sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler

“İtki odası tasarımı, Analiz, RPA, CEA”

Abstract

In this study was made a conceptual design and analysis of thrust chamber of 100 kN rocket powered by cryogenic hydrogen. Cryogenic oxygen was used as oxidizer. It was determined as boundary conditions which the combustion chamber pressure is 20 MPa and the nozzle outlet pressure was determined 0.101325 MPa. The optimum rocket geometry was created using the RPA computer program within the boundary conditions. Three-dimensional rocket model was drawn with the SOLIDWORKS program. The analysis of the designed rocket was carried out using RPA and CEA programs. Changes of pressure, temperature and Mach number which is rocket internal ballistic parameters were investigated. According to the analysis outputs, the combustion chamber temperature was 3290.9 K and the nozzle exit temperature 1310 K. The nozzle outlet pressure obtained from the RPA and CEA programs was provided as 0.1013 MPa under sea level conditions as desired.

Key Words

“Thrust chamber design, Analysis, RPA, CEA”

Terminoloji

F	İtki kuvveti	k	Özgül ısı oranı
\dot{m}	Kütleli debi	P_c	Yanma odası basıncı
A_t	Nozul boğaz alanı	P_a	Ortam basıncı
A_e	Nozul çıkış alanı	P_e	Nozul çıkış basıncı
A_c	Yanma odası alanı	t_s	Yanma süresi
L^*	Yanma odası karakteristik uzunluğu	V_e	Egzoz hızı
L_c	Yanma odası uzunluğu	V_c	Yanma odası hacmi
L_n	Nozul uzunluğu	g	Yerçekimi ivmesi
L_{cyl}	Yanma odası silindirik bölüm uzunluğu	c^*	Karakteristik egzoz hızı
R	Gaz sabiti	C_F	İtki katsayısı
M_g	Moleküler ağırlık	c	Efektif egzoz hızı
λ	Düzeltilme faktörü	T_c	Yanma odası sıcaklığı
ε	Nozul genişleme oranı	α	Nozul genişleme açısı
I_{sp}	Özgül itki	b	Nozul daralma açısı

1. Giriş

Roketler, Newton'un üçüncü hareket yasası olan her etkiye eşit ve zıt bir tepki prensibine göre çalışan motorlara verilen isim olarak adlandırılmaktadır (Yaman, 2013). Roketler çalışmaları esnasında hava ortamına ihtiyaç duymayan sistemlerdir ve bu özellikleri sayesinde atmosfer dışı her ortamda çalışabilmektedirler (Ward, 2010). Roketler bir yükü hedefe ulaştırmak için kullanılan araçlardır. Bu yükler askeri amaçlı silah başlığı, uzay çalışmaları kabini, ticari ve haberleşme uydular olabilmektedir. Son yıllarda roketler ile insan taşımacılığı yapmak için çalışmalar devam etmektedir (Gill ve Nurick, 1976; Samur, 2015; Sutton ve Biblarz, 2016).

Roketlerde itki, temel olarak yanma odasında üretilen yüksek sıcaklık ve basınçtaki gazın nozul aracılığıyla dışarı atılması esnasında oluşan momentumdan elde edilir (Gill ve Nurick, 1976). Roketler enerji kaynağının çeşidine göre (kimyasal, nükleer, elektrik vb), temel işlevlerine (yükseltici, yörünge istasyonu tutucu), araç tipine (uçak, füze, uzay aracı), yakıt tipine ve kademe sayısına göre sınıflandırılmaktadırlar (Sutton ve Biblarz, 2016). İçlerinde en yaygın kullanılan sınıflandırma yöntemi, roketin kullandığı enerji kaynağının çeşidine göre yapılan sınıflamalardır (Dönmez, 2018; Karayel, 2018).

Sıvı yakıtlı roket motorları; oksitleyiciyi ve yakıtı sıvı formda kullanan kimyasal roket motorlarıdır. Sıvı yakıtlı roketler, diğer kimyasal roketlerde olduğu gibi kimyasal enerjinin kinetik enerjiye dönüştürülmesi prensibi ile çalışmaktadırlar (Cengiz, 2010). Genel olarak katı yakıtlı roket motorlarından daha fazla itki üretmektedirler. Fakat sıvı yakıtlı roket motorları karmaşık alt sistemlere sahiptir. Yakıt ve oksitleyicinin yanma odasına taşındığı besleme ve pompa sistemleri, yanma odası ve nozulun soğutulması için kullanılan soğutma sistemi, kontrol ve güvenlik için kullanılan valfler gibi karmaşık yapıları barındırmaktadır. Bu sebeplerden dolayı sıvı yakıtlı roketler katı yakıtlı roketlere göre çok karmaşıktır ve maliyetleri oldukça yüksektir (Santos vd, 2011; Türk, 2016).

Strunz (1998) sıvı yakıtlı roketin kararsızlıklarını teorik olarak incelemiş ve tanımlamıştır. Akış olayındaki geçici durumları tahmin etmek için numerik yöntemler kullanmıştır. Basitleştirilmiş yanma modeli için analizlerini Karakteristik Metot ve tek boyutlu termokimyasal kodlarını kullanarak yapmıştır (Strunz, 1998).

Guabio Cai ve arkadaşları (2007) sıvı yakıtlı roket nozul optimizasyonuna bağlı performans tahminini araştırmışlardır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) metodlarını nozul performansını daha iyi tahmin edebilmek için optimizasyon süreci ile eşleştirilmiştir. CFD tabanlı optimizasyon prosedürü sayesinde daha iyi nozul performansı elde edilmiştir. Nozul performansı %1.5 artmıştır (Cai vd, 2007).

Youngblood (2015) yapmış olduğu çalışmada küçük ölçekli etanol ve nitro oksit (N_2O) ile çalışan sıvı yakıtlı roket tasarlamıştır. Tasarladığı roketi Nasa Chemical Equilibrium with Applications (CEA) ve Cantera referanslı Matlab ortamında model oluşturarak analiz etmiştir. Daha sonra roketi üreterek ve statik testlerini yapmıştır. Test verileri ile programların sonuçlarını karşılaştırıp Cantera programının Nasa CEA programı kadar iyi olduğunu ve iyi bir rakip olacağını göstermiştir (Youngblood, 2015).

Porto Riko Mayagüez üniversitesinden roket takımı Loxodon-1 adı verdikleri, sıvı oksijen (LOX) ve Jet-A yakıtı ile çalışan 2.2 kN itki üreten sıvı yakıtlı roketi Rocket Propulsion Analysis (RPA) programı kullanarak geliştirmişlerdir. Roketin çalışma basıncı 3.82 MPa ve yanma odası 2218 K sıcaklığa ulaşmıştır. Tasarımı biten roket üretim aşamasına geçmiş olup ateşleme testinin 2021 ilkbaharda yapılması planlanmıştır (Rodríguez Otero vd, 2020).

Ojeda ve arkadaşları 2017 yılında akademik bir tasarım ortamında düşük itki gücüne sahip bipropellant bir sıvı roket motorunu tasarlamışlar, üretmişler ve test etmişlerdir. Yakıt olarak etanol oksitleyici olarak hidrojen peroksit kullanmışlardır. Florida Üniversitesi sıvı tahrik tasarım takımında bulunan Ojeda ve arkadaşları tasarım aşamasında roket geometrisinin boyutunu ve performansını öngörmek için RPA programını kullanmışlardır (Ojeda vd, 2017).

Eric P. 2018 yılında Berkley Üniversitesinde N_2O ve Jet-A ile çalışan 11 kN itki kapasiteli sıvı yakıtlı sonda roket motorunun tasarımını yapmıştır. Roket, deniz seviyesinden 100 km yüksekteki yörüngeye ulaşmak için tasarlanmıştır. Roket motor geometrisinin parametrelerini belirlemek ve roket motor performansını test etmek için RPA programını kullanmıştır (Pillai, 2018).

Ngwu ve arkadaşları 2020 yılında 100 N itki kuvvetine sahip Hidrojen Peroksit ve Kerosen ile çalışan sıvı yakıtlı roket motorunun tasarımını nümerik olarak yapmışlardır. Yaptıkları çalışmayı doğrulamak için RPA programını kullanmışlardır (Ngwu vd, 2020).

Baxi ve arkadaşları 2021 yılında yapmış oldukları çalışmada Vikas 4B sıvı yakıtlı roket motorunu RPA programını kullanarak modellemişlerdir. Yakıt çifti olarak 1.71 karışım oranında Oksijen ve Hidrojen kullanmışlardır. Daha sonra RPA programını kullanarak en verimli roket geometrisini belirlemişlerdir. Roket geometrisi ile SolidWorks programı aracılığı ile katı modelini oluşturmuşlardır. Roket motor duvar malzemesi olarak 152.4 mm (6 inç) kalınlığında ısıl işlem görmüş karbon fiber kullanmışlardır. ANSYS yazılımını kullanarak roket duvarlarında oluşan gerilmeleri, gaz akış hızını ve roket iç basınç dağılımını analiz etmişlerdir. Elde edilen verilerle roket motorunun güvenli olduğu sonucuna varmışlardır (Baxi vd, 2021)

Bu çalışmada 100 kN itki kapasiteli sıvı yakıtlı roket motor tasarımı hedeflenmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen çıktılar; bulgular, tartışma ve sonuçlar kısmında ayrıntılı olarak verilmiştir.

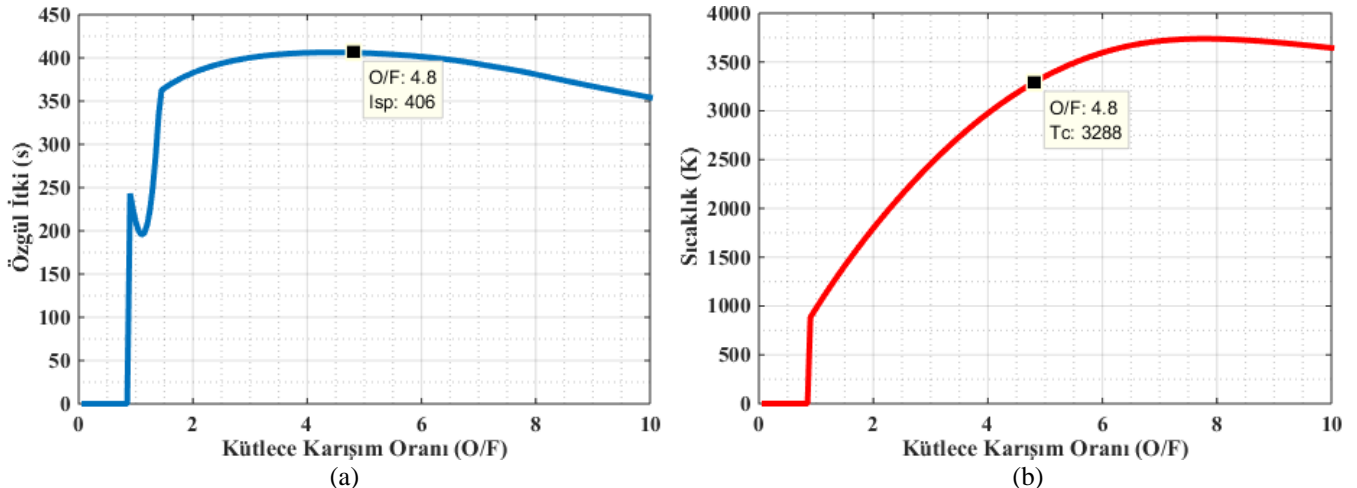
2. Materyal ve Metot

Yanma odası basıncı 20 MPa olan ve yakıt çifti olarak belirlenen sıvı oksijen- sıvı hidrojen ile 100 kN'luk itkiye sahip bir sıvı yakıtlı roket motor tasarımı yapılmıştır. Öncelikli olarak analitik hesaplamalar yapılmış ve daha sonra RPA programı yardımıyla roket boyutları optimize edilmiştir. Sıvı yakıtlı roketin yanma odası ile nozul tasarımı yapıldıktan sonra analizler için paket programlar kullanılmıştır.

Kullanılan programlar; Alexander Ponomarenko tarafından geliştirilen RPA programı, roket motorlarının performans tahmini ve optimizasyonu için kullanılan bilgisayar destekli bir programdır. Roket motorlarının tasarımı ve analizi az sayıda parametre girilerek yapılabilmektedir. Bu sayede hem zaman hem de maliyet açısından üstün ve doğru sonuçların elde edilmesi sağlamaktadır (Ponomarenko, 2009).

Tasarımı yapılan roket motorunun analizleri Nasa'nın bilgisayar programı olan CEA ve RPA programları ile yapılmış ve karşılaştırılmıştır. CEA kimyasal denge kompozisyonlarını ve karmaşık karışımların özelliklerini hesaplamaktadır. CEA, son 45 yıl içinde NASA Lewis (şimdi Glenn) Araştırma Merkezi'nde geliştirilen bir dizi bilgisayar programında en sonuncusunu temsil etmektedir.

Tasarımı yapılan roketin yanma odası basıncı 20MPa, çevre basıncı 101325 Pa olarak belirlenmiştir. Sıvı hidrojen yakıtının sıcaklığı 45 K, oksitleyici sıvı oksijen sıcaklığı ise 90 K'dir. Hidrojen ve oksijen yakıt çiftinin stokiometrik oranı 7.937 olmasına rağmen, Şekil 1'de görüldüğü gibi en yüksek özgül itki değeri oksitleyici yakıt oranı 4.8 olduğunda elde edilmektedir. Bu amaçla roket yakıt karışım oranı 4.8 olarak belirlenmiştir.



Şekil 1 Sıvı Hidrojen – Sıvı Oksijen kütlece karışım oranlarına göre (a) özgül itki ve (b) sıcaklık değişim grafiği

Roket motorundan 100 kN itki elde edebilmek için (Raposo, 2016),

$$\dot{m}_{\text{toplam}} = \frac{F}{gI_{sp}} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{\text{toplam}} = \frac{100 \text{ kN}}{9.81 \times 406} = 25.11 \text{ kg/s} \quad (2)$$

Denklem 1 ve 2 'de görüldüğü gibi yakıtlarımızın kütleli debisi 25.11 kg/s olması gerekmektedir. Karışım oranı 4.8 olduğundan

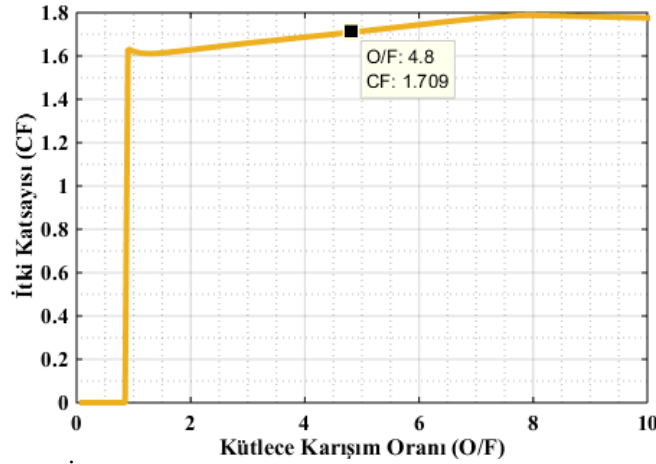
$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_{\text{toplam}}}{r_{\text{karışım}} + 1} \quad (3)$$

$$\dot{m}_f = \frac{25.11}{5.8} = 4.33 \text{ kg/s} \quad (4)$$

$$\dot{m}_o = \dot{m}_f \times r_{\text{karışım}} = 4.33 \times 4.8 = 20.78 \text{ kg/s} \quad (5)$$

İtki odası tasarımı için yanma odası şekli silindirik ve nozul tipi olarak da De laval %80'lik parabolik yapı seçilmiştir. Roket nozul boğaz çapı Denklem 6 ile belirlenmektedir (Hetem vd, 2011).

$$A_t = \frac{F}{P_c C_F} \quad (6)$$



Şekil 2 İtki Katsayısının yakıt çiftinin karışım oranına göre değişimi

İtki katsayısının değeri Şekil 2'deki grafikten de anlaşılacağı üzere karışım oranına göre değişmektedir. İtki katsayısı stokiometrik karışım oranına kadar artmakta ve bu orandan sonra azalmaktadır.

$$A_t = \frac{100 \text{ kN}}{20 \text{ MPa} \times 1.709} = 2926 \text{ mm}^2 \quad (7)$$

$$D_t = \sqrt{\frac{4A_t}{\pi}} = 61.04 \text{ mm} \quad (8)$$

Roket genişleme oranı nozul çıkış alanının nozul boğaz alanına oranı olarak ifade edilmektedir ve ϵ ile gösterilmektedir.

$$\epsilon = \frac{A_e}{A_t} = \frac{\left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{1}{k-1}} \left[\frac{P_c}{P_e} \right]^{\frac{1}{k}}}{\sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left[1 - \left[\frac{P_e}{P_c} \right]^{\frac{k-1}{k}} \right]}} \quad (9)$$

Roketler nozul çıkış basıncı atmosfer basıncına eşit olduğunda en iyi performans elde edilmektedir. Roket ideal şartlarda deniz seviyesinde çıkış basıncının $P_e = 101235 \text{ Pa}$ olması istenmektedir. Roket tasarımında özgül ısı oranı genellikle $k = 1.2$ olarak alınmaktadır. Bu şartlar altında Denklem 9 çözüldüğünde $\epsilon = 20.02$ olarak bulunmaktadır.

$$A_e = \epsilon A_t \quad (10)$$

$$A_e = 58578 \text{ mm}^2 \quad (11)$$

$$D_e = 273 \text{ mm} \quad (12)$$

Roket nozul çıkış kesit alanı 58575 mm^2 ve nozul çıkış çapı 273 mm olarak bulunmuştur. Roketin herhangi bir noktasındaki alan Denklem 13 ile ifade edilmektedir.

$$\frac{A_x}{A_t} = \frac{\left[\frac{2}{k+1} \left(\frac{P_c}{P_x} \right)^{\frac{k+1}{2k-2}} \right]}{\sqrt{\frac{2}{k-1} \left[\left(\frac{P_c}{P_x} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}} \quad (13)$$

Denklem 13 ile yanma odası alanı $A_c = 4.6 A_t = 13460 \text{ mm}^2$ olarak hesaplanmıştır. Yanma odası çapı $D_c = 131 \text{ mm}$ 'dir. Teorik yanma odası hacmi; yakıtların kütleli debisi, ortalama özgül hacim ve verimli bir yanma için gerekli sürenin bir fonksiyonu olarak Denklem 14'te tanımlanmaktadır.

$$V_c = \dot{m} \vartheta t_s \quad (14)$$

Denklem 14'te V_c yanma odası hacmi, \dot{m} yakıtların toplam kütleli debisi, ϑ ortalama özgül hacmi ve t_s ise yakıtın yanma odasında kalma süresi olarak ifade edilmektedir. Karakteristik uzunluk olarak tanımlanan L^* yakıt kalma süresinin belirlemede kullanılabilir. L^* yanma odasının hacminin nozul boğaz alanına oranı olarak Denklem 15'de tanımlanmaktadır.

$$V_c = A_t L^* \quad (15)$$

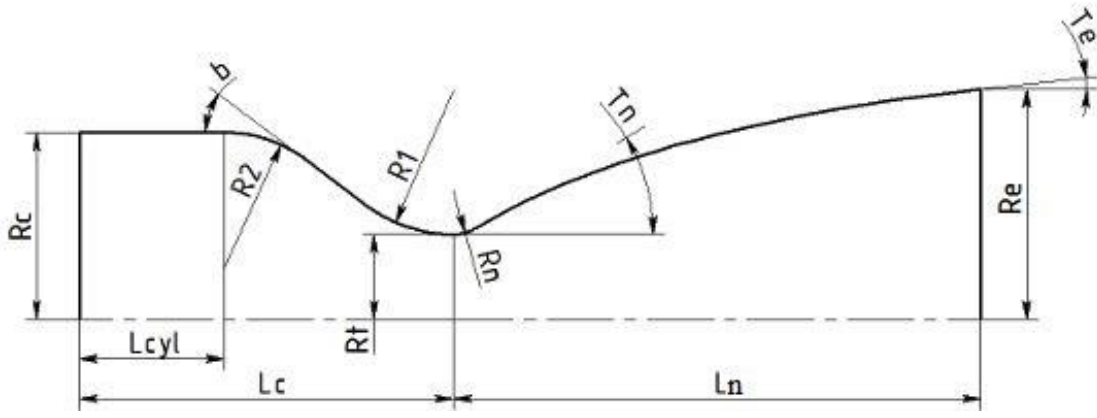
L^* deneysel çalışmalarla elde edilmiştir ve yakıt kombinasyonlarına göre değeri değişmektedir. Sıvı Oksijen - Sıvı Hidrojen için yanma odası karakteristik uzunluk Tablo 1'den elde edilmiştir.

Tablo 1 Çeşit yakıt çiftleri için yanma odası karakteristik uzunluğu (Huang ve Huzel, 1971)

Yakıt Çifti	Yanma Odası Karakteristik Uzunluğu (L^*)
Sıvı Flor - Hidrazin	610-710 mm
Sıvı Flor - Sıvı Hidrojen	560-750 mm
Hidrojenperoksit - RP-1	1520-1750 mm
Nitrik Asit - Hidrazin	750-900 mm
Sıvı Oksijen - Sıvı Hidrojen	550-1020 mm
Sıvı Oksijen - RP-1	1000-1250 mm

$$V_c = 2926 \times 1020 = 2984520 \text{ mm}^3 \quad (16)$$

Tasarımı yapılan roketin gerekli yanma odası hacmi Denklem 16'da görülmektedir. Yanma odasını şekli silindirik olarak seçilmiştir. Şekil 3'te görülen roket geometrisinden yanma odası uzunluğu ve nozul uzunluğu hesaplanabilmektedir. Şekil 3'te görülen L_{cyl} yanma odası silindirik kısmının uzunluğunu, L_c yanma odasının toplam uzunluğunu ifade etmektedir. Nozul daralma yarım açısı $b = 12^\circ$ ve nozul genişleyen yarım açısı $T_n = 28.83^\circ$ olarak alınmıştır.



Şekil 3 Roket geometrisi

Şekil 3'te görülen radyuslar sırasıyla $R_1 = 124.19$ mm, $R_2 = 751.14$ mm ve $R_n = 11.86$ mm olacak şekilde alınmıştır.

$$L_c = L_{cyl} + R_2 \tan\left(\frac{b}{2}\right) + \left(\frac{R_c - R_t}{\tan b}\right) + R_1 \tan\left(\frac{b}{2}\right) \quad (17)$$

L_{cyl} hesaplamak için Denklem 18 kullanılmaktadır. V_2 nozulun daralan kısmından nozul boğazına olan kısmın hacmini ifade etmekte ve eğrinin integrali alınarak hesaplanmaktadır. V_2 hacmi 2278667 mm³ olmaktadır.

$$V_c = A_c L_{cyl} + V_2 \quad (18)$$

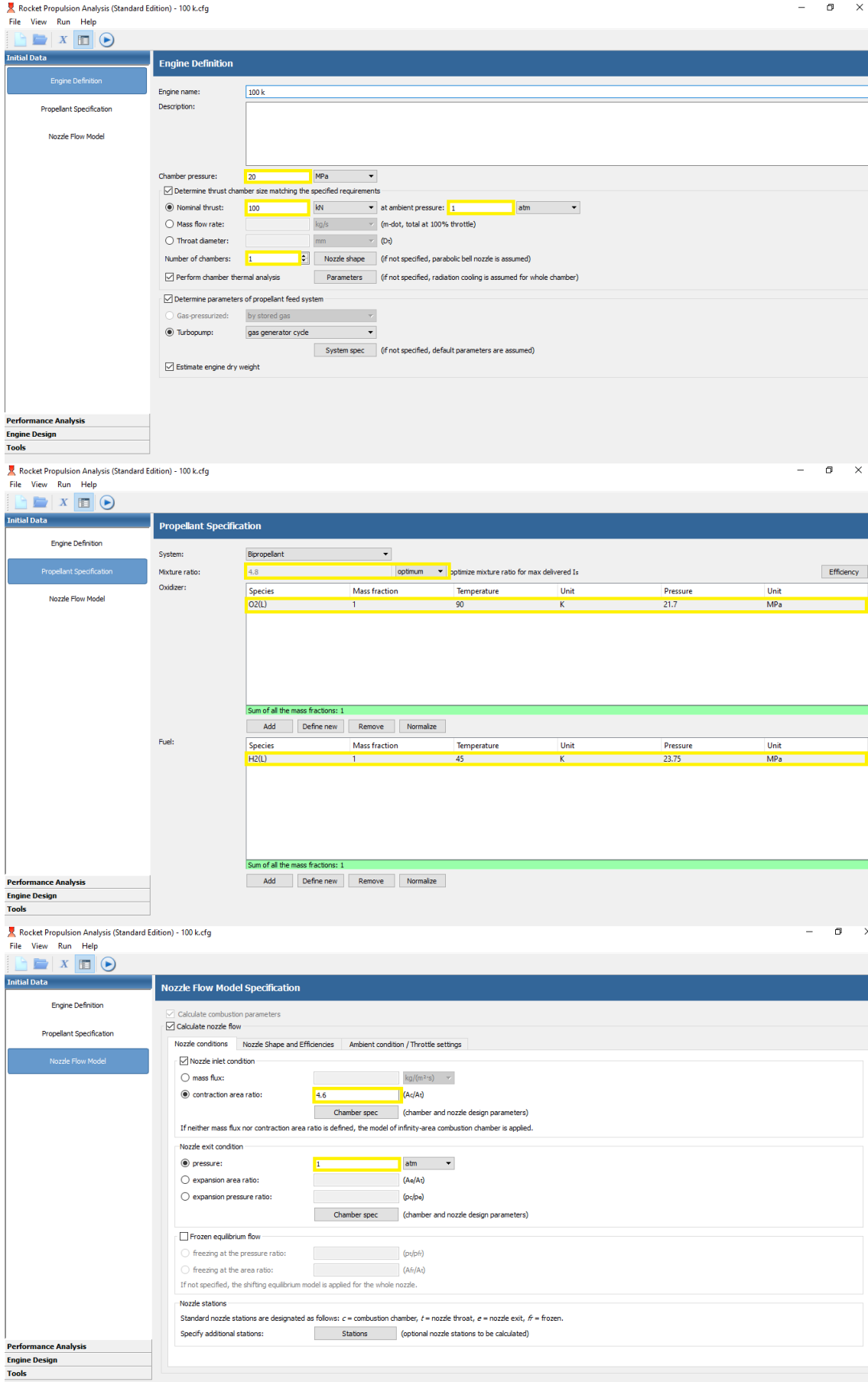
Denklem 18'den L_{cyl} 52.4 mm olarak hesaplanmaktadır. Denklem 17'den L_c değeri 309 mm olarak bulunmaktadır.

$$L_n = \frac{0.8(\sqrt{\epsilon} - 1)R_t + R_n}{\tan\left(\frac{T_n}{2}\right)} \times \lambda \quad (19)$$

$$\lambda = \frac{1}{2} \left(1 + \cos\left(\frac{T_n}{2}\right)\right) \quad (20)$$

Nozulda meydana gelen aksel olmayan gaz akışlarını da hesaba katmak için λ kullanılmaktadır ve düzeltme faktörü olarak bilinmektedir. Roket nozul uzunluğu Denklem 19 ve Denklem 20 yardımıyla, 370.4 mm olarak bulunmaktadır.

RPA programına giriş parametreleri, yanma odası basıncı 20 MPa, yakıt çifti Sıvı Hidrojen - Sıvı Oksijen, oksitleyici yakıt oranı 4.8, nozul çıkış basıncı 1 atm, A_c/A_t oranı 4.6 ve nominal itki 100 kN olarak girilmiştir. Şekil 4'te RPA programı kullanıcı arayüzü gösterilmektedir. Programa girilen gerekli bilgiler sarı kutucuk ile işaretlenmiştir.



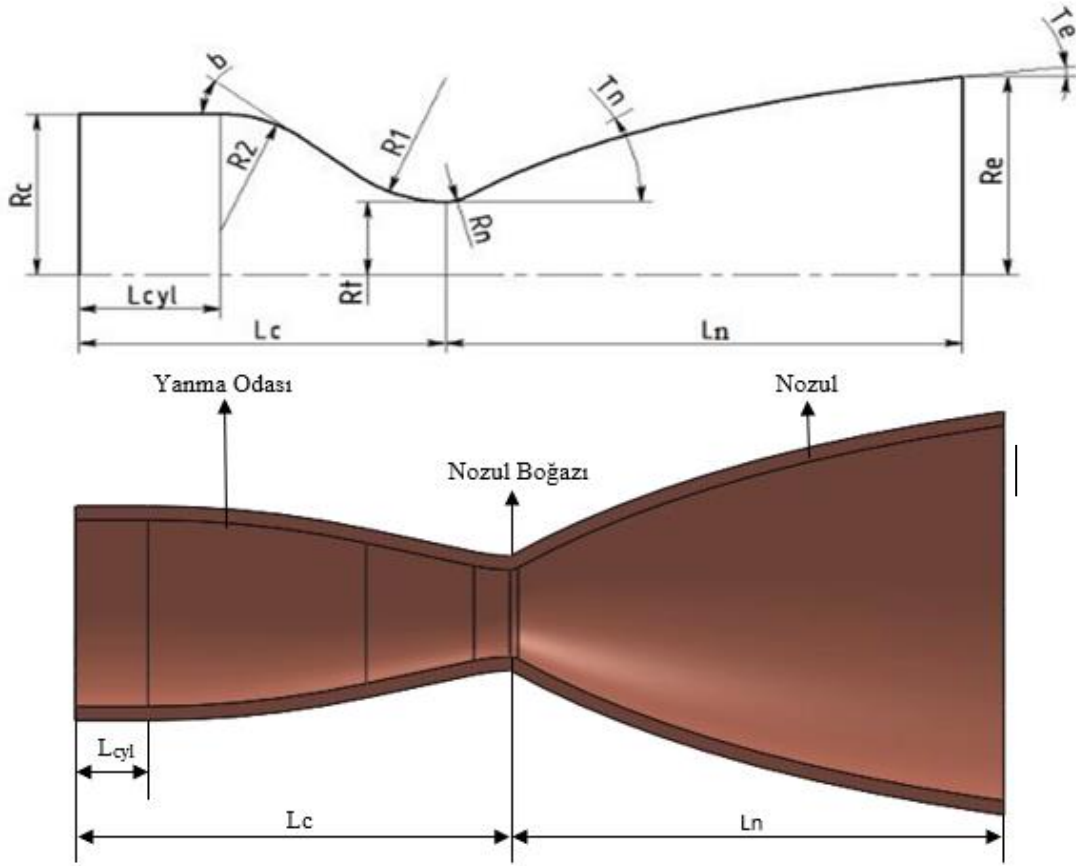
Şekil 4 RPA programı kullanıcı arayüzü

Şekil 4'te verilen parametreler için RPA programı aracılığı ile oluşturulan roket motor geometrisi Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2 RPA programı itki odası geometrisinin değerleri

İtki Odası Geometri Parametresi	Değer	İtki Odası Geometri Parametresi	Değer
Dc	133.18 mm	Ae/At	18.61
Dt	62.10 mm	R1	124.19 mm
De	267.90 mm	R2	751.14 mm
L*	1018.26 mm	Rn	11.86 mm
Ln	353.44 mm	b	12.00°
Lc	311.06 mm	Tn	28.83°
Lcyl	51.84 mm	Te	8.00°

Tablo 2'de RPA programının 100 kN'luk roket itki odası geometrisinin değerleri görülmektedir. Şekil 5'te Tablo 2'de sunulan roket motorunun Solidworks programında oluşturulan üç boyutlu katı modelin kesit görünümü verilmiştir.



Şekil 5 100 kN'luk roket itki odası kesit görünümü

3. Bulgular

Tasarım geometrisi belirlenen roketin sınır şartları öncelikli olarak RPA programına girilmiştir. Çıktı olarak programdan atmosfer ortamı (deniz seviyesinde) ve atmosfer dışı (uzay vakum ortamında) roket çalışma değerleri elde edilmiştir. Tablo 3-4'de sırasıyla performans ve analiz sonuçları olarak verilmiştir. Performans sonuçlarına göre sıvı yakıtlı roket motoru deniz seviyesinde 99.99360 kN itki kuvveti üretirken, vakum ortamında 105.71135 kN itki kuvveti üretmektedir. Oksitleyici yakıt oranı 4.8 iken ideal kütleli debi 25.11385 kg/s'dir.

Tablo 2 RPA vasıtasıyla elde edilen performans sonuçları.

İtki Kuvveti ve Kütleli Debi	Değer
Vakum Altında İtki	105.71135 kN
Vakum Altında Özgül İtki	429.22756 s
Deniz Seviyesinde İtki	99.99360 kN
Deniz Seviyesinde Özgül İtki	406.01136 s
Toplam Kütleli Debi	25.11385 kg/s
Oksitleyicinin Kütleli Debisi	20.78835 kg/s
Yakıtın Kütleli Debisi	4.32551 kg/s

Tablo 4'te verilen analiz sonucuna göre nozul çıkış basıncı 0.1013 MPa olarak elde edilmiştir. Egzoz çıkış basıncı ile ortam basıncının eşit olması ($P_e=P_a$) nedeniyle optimum itki koşulunun sağlandığı görülmüştür. Nozul çıkışı gaz hızı süpersonik (1-5 Mak aralığı) kategorisinde içerisinde yer alan 3.76 Mak değeri olarak tespit edilmiştir.

Tablo 4 100 kN'luk roketin deniz seviyesi için RPA analiz programı ile elde edilen sonuçlar.

	Yanma Odası	Nozul Girişi	Nozul Boğazı	Nozul Çıkışı	Birim
Basınç	20	19.6099	11.26	0.1013	MPa
Sıcaklık	3289.8884	3284.9488	3039.847	1309.6263	K
Özgül Isı (P=Sabit)	5.9598	5.9562	5.4058	3.3981	kJ/(kg·K)
Özgül Isı (V=Sabit)	5.0518	5.0488	4.5675	2.6877	kJ/(kg·K)
Özgül Isı Oranı (K)	1.1797	1.1797	1.1835	1.2643	
Yoğunluk	8.4429	8.2911	5.1707	0.1089	kg/m ³
Ses Hızı	1665.9959	1664.7144	1602.0169	1084.5442	m/s
Gaz Hızı	0	216.9051	1602.0169	4086.2915	m/s
Mak Sayısı	0	0.1303	1	3.7678	
Alan Oranı ($\frac{A_c}{A_t}, \frac{A_t}{A_t}, \frac{A_e}{A_t}$)	4.6	4.6	1	18.6127	

Tasarımı yapılan roket CEA programı ile Tablo 5'te görüldüğü gibi aynı sınır şartları kullanılarak analizleri gerçekleştirilmiştir. CEA programı ile yapılan analiz sonuçları RPA programında benzer şekilde çok yakın değerler elde edilmiştir.

Tablo 5 100 kN'luk roketin CEA analiz programı ile elde edilen analiz sonuçları.

	Yanma Odası	Nozul Girişi	Nozul Boğazı	Nozul Çıkışı	Birim
Basınç	20	19.609	11.26	0.10138	MPa
Sıcaklık	3290.9	3285.94	3040.94	1310.7	K
Yoğunluk	8.4443 0	8.2921 0	5.1714 0	0.10894	kg/m ³
Özgül Isı (P=Sabit)	5.9624	5.9588	5.408	3.3977	kJ/(kg·K)
Özgül Isı Oranı (K)	1.1716	1.1716	1.1784	1.2642	
Ses Hızı	1665.8	1664.5	1601.9	1084.7	m/s
Mak Sayısı	0	0.13	1	3.767	
İtki Katsayısı (Cf)	0.0908	0.0908	0.67	1.7091	
Pr	0.595	0.5394	0.5561	0.6473	
Viskozite	9.75x10 ⁻⁵	9.75x10 ⁻⁵	9.75x10 ⁻⁵	9.75x10 ⁻⁵	kg/(m s)

Tablo 6’da RPA programı ile CEA programı analiz sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir. Her iki program tarafından da roket motor basınç dağılımı ve Mak sayısı değerlerinin aynı olduğu görülmüştür. Ancak roket motor iç sıcaklık dağılımı sonuçları incelendiğinde, CEA programı sonuçlarının RPA programı sonuçlarından yaklaşık olarak 1 K daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu değerler dikkate alınmayacak kadar küçük ve önemsiz farklar olarak bilinmektedir.

Tablo 6 RPA-CEA programlarının analiz sonuçlarının karşılaştırılması

	Analiz Programı	Yanma Odası	Nozul Boğazı	Nozul Çıkışı	Birim
Basınç	RPA	20	11.26	0.1013	MPa
	CEA	20	11.26	0.10138	
Sıcaklık	RPA	3289.88	3039.84	1309.62	K
	CEA	3290.9	3040.94	1310.7	
Mak Sayısı	RPA	0	1	3.76	
	CEA	0	1	3.76	

Tablo 7’de RPA programından alınan emisyon değerleri verilmiştir. Daha önceden belirtildiği üzere maksimum itki kuvveti üretmek için yakıtça zengin karışım oranı seçilmiştir. Analiz sonucuna göre nozul çıkışında serbest oksijen görülmediği için iyi bir yanma elde edilebileceği sonucuna varılabilir. Kullanılan hidrojen ve oksijen yakıt çiftinin yanma sonu ürünü H₂O olduğundan dolayı çevreye duyarlı, zehirleyici olmayan ve yüksek enerjiye sahip bir yakıt çifti olarak temiz bir enerji kaynağı olduğu görülmektedir.

Tablo 7 RPA programının emisyon sonucu

	Enjektör	Yanma Odası	Nozul girişi	Nozul boğazı	Nozul çıkışı
H	0	0,001369	0,0013651	0,000911	0,0000001
H ₂	0,172413793	0,0675675	0,0675655	0,0675791	0,0679398
H ₂ O	0	0,9150378	0,9151371	0,9225336	0,9320601
H ₂ O ₂	0	0,0000074	0,0000073	0,0000025	0
HO ₂	0	0,0000074	0,0000073	0,0000021	0
O	0	0,0003207	0,0003181	0,0001237	0
O ₂	0,827586207	0,0003779	0,000375	0,0001491	0
OH	0	0,0153121	0,0152246	0,0086988	0

4. Tartışma

Roket performansı artırmak için birçok nozul tasarımı geliştirilmiştir. Yapılan araştırmalarda görülmüştür ki; çan tipi nozul genişleme bölgesinin ilk kısmında, hızlı genişlemeye ya da dairesel akışa neden olduğundan nozul çıkışında düzgün ve aksel akış sağlayacağından dolayı en uygun nozul tipi olarak De laval %80’lik parabolik yapı seçilmiştir. Çan tipi nozul konik nozul tipine göre daha kısa düşük sürtünme kaybı ve hafif olmaktadır.

Şekil 1’de görüleceği gibi özgül itki; yanma odası sıcaklığı ve gazların molekül ağırlığından doğrudan etkilendiği görülmektedir. Hidrojen ve oksijen yakıt çiftinin stokiyometrik oranı 7.937 olmasına rağmen, en yüksek özgül itki değeri oksitleyici yakıt oranı 4.8 olduğunda elde edilmektedir.

$$I_{sp,max} = \frac{1}{g} \left[\frac{2k}{k-1} \frac{R}{M_g} T_c \left\{ 1 - \left(\frac{P_e}{P_c} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

Denklem 21’de maksimum özgül itki eşitliği görülmektedir (Turner, 2006).

5. Sonuç

Bu çalışmada, öncelikli olarak rokette kullanılacak yakıt ve oksitleyici seçimi yapılmıştır. Yakıt olarak sıvı hidrojen 45 K ve sıvı oksijen 90 K sıcaklığı sınır şartlarında kriyojenik olarak rokette kullanılmıştır. Yakıt oksitleyici oranı lisanslı olarak kullanılan RPA programı desteğinde 4.8 olarak ideal oranı belirlenmiştir. Sınır şartları RPA programına girilerek optimum roket geometrisi oluşturulmuştur. Roket analizi girilen 100 kN itki kuvveti üretmesi için yanma odası basıncı 20 MPa ve dış ortam basıncı 101.3 kPa olarak belirlenmiştir. Sonrasında roket teorik olarak ateşlenmiş RPA ve CEA programları ile ayrı ayrı analizler gerçekleştirilmiştir. Teorik olarak roket analizleri hızlı bir şekilde gerçekleştirilerek zamandan tasarruf sağlanmaktadır. Yakıt çifti ve karışım oranlarının ve itki odası geometrisinin roket performansı üzerine olan etkisi hızlı bir şekilde incelenebilmektedir. Optimum karışım oranı belirlenebilmektedir. Üretilen gaz hızı, sıcaklığı ve basıncının dağılımı roket boyunca analiz edilmiştir. En yüksek sıcaklık 3290.9 K ile yanma odasında görülmüştür. Mak sayısı 3.76 çıkmıştır. En yüksek özgül itkinin meydana geldiği 4.8 karışım oranındaki nozul çıkışında kütsel olarak %93,20 suya dönüştüğü görülmüştür. Böylece çevreci bir yakıt çifti olduğu değerlendirilmektedir. Bu analizler neticesinde elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde imalatı hedeflenen 100 kN'luk roketin üretilebilirliği teyit edilmiştir.

Yazarların Katkısı: Tüm çalışmada yazarların test, analiz, literatür araştırması, yazma ve düzeltme işlerinde eşit oranda katkıları olmuştur. Aynı zamanda bu çalışma yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

Fon Desteği: RPA program yazarların kendi imkanlarıyla karşılanmıştır. Ayrıca CEA program akademik çalışmalara NASA tarafından açık kaynak olarak ücretsiz bir şekilde sunulmaktadır.

Referanslar

- Baxi, P., Jain, R., Dhadke, Y., Chhabra, Y. ve Khatawate, V. H. (2021). Design and Analysis of Bell-Parabolic De Laval Rocket Exhaust Nozzle. *2021 4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)* içinde (ss. 1–6). IEEE.
- Cai, G., Fang, J., Xu, X. ve Liu, M. (2007). Performance Prediction and Optimization for Liquid Rocket Engine Nozzle. *Aerospace Science and Technology*, 11(2–3), 155–162.
- Cengiz, K. (2010). *Development Of An Iterative Method For Liquid-Propellant Combustion Chamber Instability Analysis*. Uzun Mühendisliği. Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Dönmez, C. E. (2018). *Kompozit Esaslı Kati Roket Yakıt Numunesinin Karakteristik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi*. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ. Kırıkkale Üniversitesi.
- Gill, G. S. ve Nurick, W. H. (1976). *Liquid Rocket Engine Injectors*.
- Hetem, A., Miraglia, J., Burian, R. ve Caetano, C. A. C. (2011). Numerical Simulation Of Liquid Propellant Rocket Engines. *MIPRO, 2011 Proceedings of the 34th International Convention* içinde (ss. 930–934). IEEE.
- Huang, D. H. ve Huzel, D. K. (1971). *Design of Liquid Propellant Rocket Engines Second Edition*.
- Karayel, E. (2018). *Roket Motor Borusu Tasarımının Balistik Parametrelere Etkisinin Araştırılması*. fen Bilimleri Enstitüsü. Kırıkkale Üniversitesi.
- Ngwu, G. O., Ugheoke, B. I., Yusuf, O. T., Nyabam, M. A. ve Onuh, S. O. (2020). Numerical Analysis and Modelling of a 100 N Hypersonic Liquid Bipropellant Thruster. *Advances in Aerospace Science and Technology*, 5(4), 85–99.
- Ojeda, C., Prescott, K. T. ve Persaud, T. (2017). Production and Manufacture of Low-Cost Liquid Rocket Engines for Sounding Rockets. *53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference* içinde (s. 4841).
- Pillai, E. T. (2018). Space-capable sounding rocket design for collegiate teams. *2018 IEEE Aerospace Conference* içinde (ss. 1–13). IEEE.
- Ponomarenko, A. (2009). RPA: Design tool for liquid rocket engine analysis.
- Raposo, H. C. T. (2016). *Mixture Ratio and Thrust Control of a Liquid-Propellant Rocket Engine*. *Aerospace Engineering*. Centre National D'études Spatiales.

- Rodríguez Otero, R., Morales-Jimenez, S., Ureña Contreras, K. ve Baez Cortes, J. (2020). Loxodon-1: Development of the First Liquid Rocket Engine in Puerto Rico. *ASCEND 2020* içinde (s. 4258).
- Samur, A. E. (2015). *Hİbrİt Yakıtlı Roket Motoru Ateşleme/Test Düzenegİ Tasarımı*. Havacılık Ve Uzay Teknolojİleri Enstİtüsü. Hava Harp Okulu.
- Santos, E. A., Alves, W. F., Prado, A. N. A. ve Martins, C. A. (2011). Development of Test Stand For Experimental Investigation of Chemical and Physical Phenomena in Liquid Rocket Engine. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 3(2), 159–170. doi:10.5028/jatm.2011.03021111
- Strunz, R. (1998). Using The Method Of Characteristics To Predict Transient Flow Phenomena.
- Sutton, G. P. ve Biblarz, O. (2016). *Rocket propulsion elements*. John Wiley & Sons.
- Türk, S. (2016). *Üst Kademe Sıvı Yakıtlı Roket Motoru İÇin Kavramsal İtki Odası Tasarımı*. Fen Bilimleri Enstitüsü. Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Turner, M. J. L. (2006). *Rocket and Spacecraft Propulsion* (2. bs.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Ward, T. A. (2010). *Aerospace propulsion systems*. John Wiley & Sons.
- Yaman, H. (2013). *Yüksek Enerjili Maddelerin Çift Bazlı (DB) Roket Yakıtlarında Kullanımı ve Performans Etkilerinin Araştırılması*. Fen Bilimleri Enstitüsü. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- Youngblood, S. H. (2015). *Design and Testing of a Liquid Nitrous Oxide and Ethanol Fueled Rocket Engine*. New Mexico Institute of Mining and Technology, Department of Mechanical Engineering, Explosive Engineering.



Fuzzy Measurement System Analysis Approach: A Case Study

Eda Beylihan¹ , Sermin Elevli¹ 

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ondokuz Mayıs University, 55200, Samsun, TURKEY

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ondokuz Mayıs University, 55200, Samsun, TURKEY

Başvuru/Received: 25/08/2021

Kabul / Accepted: 4/11/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Abstract

In quality control, gathering relevant and timely data is essential to monitor and determine process variation. Since process data are obtained through measuring instruments that contain uncertainties, an ideal measurement system that has a statistical characteristic of zero error does not exist. Measurement System Analysis (MSA), one of the requirements of ISO/TS 16949, is an experimental and mathematical method of determining the variation arising from measurement systems rather than from a process or product. MSA is used to minimize the risk of wrong decisions regarding process control. Recently, the fuzzy approach has been utilized to cope with the vagueness of the obtained data in MSA studies. This paper analyzes the use of Fuzzy MSA in a company that manufactures automotive parts.

Key Words

Measurement System Analysis (MSA), Fuzzy Approach, Fuzzy MSA, Gage Repeatability and Reproducibility (GR&R), Number of Distinct Categories (NDC).

1. Introduction

In today's competitive environment, companies are trying to provide services and products that can meet basic customer demands in the most profitable way. Under the ongoing concept, the customer's demand is to obtain these services or products with higher quality and lower prices. In order to prioritize customer demand within a favorable competitive environment, it is necessary to meet these requests of services or products in full, or in other words, it must be perfect. This necessity forced organizations to adopt an understanding of Total Quality Management based production. The most critical factor in this approach is that the structure is based on continuous improvement. The method of improving the products/services is by eliminating faults.

For determining and eliminating the faults of an organization's processes, 6σ , competence analysis, lean production, and many other concepts can be used. Organizations have implemented Quality Management Systems such as ISO 9001 and ISO/TS 16949 (recently IATF 16949) to strengthen product quality, corporate image, and operations. Measurement Systems Analysis (MSA) is one of these essential management system tools. Measurement techniques in quality management are used to identify whether a product meets requested specifications. However, differences, volatile results, or variations might occur due to the inspector or measurement equipment in the measurement system. There is always a chance to reject the correct part (Type 1 Error) or accept the wrong part (Type 2 Error). Organizations have been using Measurement Systems Analysis (MSA) to improve business by eliminating these kinds of errors.

The primary purpose of the Measurement Systems Analysis (MSA) is to determine and remove the total variation between measurement methods. The Measurement Analysis System is implemented as a requirement of the Quality Management Systems and is a means of establishing sustainability within the organization. However, it would be wrong to assume that these data obtained by the measurement instrument and the inspector are also completely fault-free. Thus, statistical calculations, evaluations such as hypothesis testing, point, interval estimation, standard deviation, and other simulations are used (Yeh and friends, 2015). By the 1960s, Zadeh (1965) published the concept of Fuzzy for the first time; unlike other statistical calculations, this concept is used to prevent uncertainties.

In recent years, the use of the fuzzy logic approach in quality control has been an area of interest for researchers: Lee (2001) and Hong (2004) predicted the fuzzy Cpk index. Parchami et al. (2005) identified new process capability indices with two membership functions especially for comparing manufacturing processes with fuzzy specification limits, and uncovered interesting relations among the introduced indices. Parchami and Mashinchi (2007) presented a new method for using middle values. Faraz and Bameni Moghadam (2007) and Golbay and Kahraman (2006) mentioned necessary methods for fuzzy quality control charts. Bokov (2011) presented an empirical method for modelling high-pressure gauges in which pneumatic measurements include measurement deviations from measurement experiments using a valid measurement model. Nasiri and Darestani (2016) reviewed the literature on fuzzy control charts between the years 1990 and 2012 because fuzzy control charts had an important role in their study. Koprivica and Filipovic (2018) aimed to present an effective blurring tool in dealing with different types of uncertainty and the application of natural language to model decision-making in quality management. This article shows how fuzzy logic integration can help plan a particular product.

A number of articles from the last decade on Fuzzy MSA are given in Table 1.

Table 1. Literature Review

Author	Title	Fuzzy Number	Sector
Kazemi et al. (2010)	Developing a Method for Increasing Accuracy and Precision in Measurement System Analysis: A Fuzzy Approach	Triangular	Automotive Parts Industry
Hajipour et al. (2013)	A fuzzy expert system to increase accuracy and precision in measurement system analysis	Triangular	Automotive Parts Industry
Moheb-Alizadeh (2014)	Capability analysis of the variable measurement system with fuzzy data	Triangular	Automotive Parts Industry
Rahmati and Amalnick (2015)	Fuzzy Gauge Capability (C_g and C_{gk}) through Buckley Approach	Triangular	Manufacturing Industry
Yeh et al. (2015)	Using Fuzzy Theory in %GR&R and NDC of Measurement System Analysis	Triangular	Machine Tool Factory
Wang et al. (2018)	VLSI Circuit Measurement System Analysis based on Random Fuzzy Variables	Triangular and Trapezoidal	Test boards and Test Programs
Mittal et al. (2018)	On the fuzzy evaluation of measurement system analysis in a manufacturing and process industry environment: A comparative study	Trapezoidal	Manufacturing Industry
Darestani et al. (2021)	Developing Fuzzy Tool Capability Measurement System Analysis	Triangular and Trapezoidal	Automotive Parts Industry

Fuzzy Measurement Systems Analysis (FMSA) is mentioned in response to the uncertainty of the common Measurement Systems Analysis (MSA) method in this study. Thus, the method is focused on getting more precise results. Moreover, since fuzzy indices provide an expanded area for decision-makers, it is thought to be more accurate to use this method.

Firstly, the traditional (typical) Measurement Systems Analysis (MSA) is described, followed by the Fuzzy Measurement Systems Analysis (FMSA) in detail. The system has been observed that the data gained by Fuzzy Measurement Systems Analysis (FMSA) provides more precise results by comparing the applications of both systems on a selected product by a manufacturer of automotive parts.

2. Traditional Measurement System Analysis (MSA)

Measurement System Analysis (MSA) is a collection of statistical methods for the analysis of measuring system capacity (Smith et al., 2007). Identifying, classifying, and evaluating the quality of measurement actions increases the usefulness, accuracy, and significance of measurements. Montgomery and Runger (1993) proposed the MSA as an efficient approach for better Measurement instruments. MSA's primary objectives are to;

- Describe the components of the measurement error,
- Evaluate the contribution of a measurement error due to the total variance of equipment parameters or process-based.
- Figure out the stability of a metrology tool over time by correlating/comparing multiple metrology tools.

To see the inconsistency/variability within a system, the variances in the measurement systems must first be defined and separated from the process (Göndör and Koczor, 2010). The MSA should be implemented on every process in the system since the risk of a flawed measurement system may lead to the acceptance of wrong products or refusing of good products.

Based on the types of data values, the MSA is separated into two groups: measurable measurement values and non-measurable measurement values. Only measurable measurement values will be mentioned within the study's scope.

It is often assumed that measurements are error-free. The analysis and the results are generally based on this assumption. However, in order to focus on the eligible process variability, the variability from the measurement system shall be specified and separated from process variability. Variability of the measurement system is divided into two main categories;

- 1) Accuracy: The difference between the actual value and the measurement value of parts examined.
- 2) Precision: The variation is seen when a piece is measured repeatedly by the same measuring device.

The sort of possible variations in measurement and the measures of these variations are shown in Figure 1:

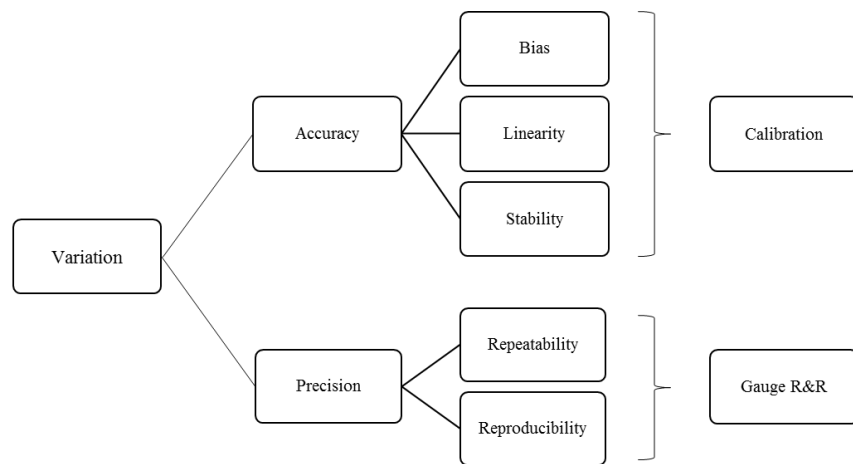


Figure 1. Types of variations (Yeh and Sun, 2013)

2.1. Accuracy

Accuracy is the difference between the measured value and the actual value of the relevant part. The variation can be examined under three categories, as seen in Figure 1:

- 1) Bias: The difference between the observed average of the measurements and the reference value made by sensitive measuring equipment (Ford, 1995).

- 2) Linearity: Linearity is the difference in the measuring device's trend values over the expected operating range (Ford, 2002). Linearity can be determined by selecting parts from the beginning to the end of the measuring device's measuring range.
- 3) Stability: An indication of how accurately the measuring system measures a single characteristic of the same part over time.

2.2. Precision

One of the important purposes of measuring system operation is to gain detailed knowledge of the amount and variability of measurement system's measurement variables interacting with ambient conditions. This information is so valuable that it is far more useful to identify repeatability and trends, and to determine acceptable limits for them, with extremely precise measuring equipment with very high repeatability. Such studies provide the following benefits (Montgomery, 2009):

- 1) Criteria for accepting new measuring equipment.
- 2) Ability to compare one measuring device with another.
- 3) Evaluation of a measuring device that is considered to be inadequate.
- 4) Comparison of the state of the inspector before and after repair.
- 5) Information for calculating the process variability and acceptability level for a production process.

2.2.1. Repeatability

Repeatability is the variability of measurements gained by an inspector when measuring the same characteristic of the same part using a measuring device several times. The repeatability of the measurement process shows the consistency of the measurement system's variance. Measurement differences caused by the measurement tool itself and the use of different measurement tools are the cause of most repeatability errors. Since both of these differences are represented by the subgroup interval (R) of the repeated measures, the interval chart will show the measurement process's consistency.

Measuring device variability or repeatability - Repeated measures and number of inspectors - assuming that the number of products is greater than 15; Repeatability standard deviation (measurement equipment standard deviation, EV);

$$EV = 5.15 \times \frac{\bar{R}}{d_2^*} \quad (1)$$

It is calculated with the formula stated above. "R" is the average change range of the repeated measurements. Where d_2^* equals 1.128.

2.2.2. Reproducibility

Reproducibility is the variability of the averages of the measurements that different inspectors take of the same characteristic of the same part using the same measuring device. The repeatability of the measurement process shows the consistency of the inspector's variance. The variability of the person who performs the measurement shows the increasing tendency that can be attributed to each inspector. If this trend or metric variability is present, the individual aggregate averages of the metrics will be different.

The standard deviation for reproducibility - AV;

$$AV = \sqrt{(5.15 \frac{\bar{X}_{DIFF}}{d_2^*})^2 - \frac{(EV)^2}{n.r}} \quad (2)$$

Here \bar{X}_{DIFF} is found by subtracting the largest inspector average from the lowest inspector average. The number of parts in the equation is n, and r is the number repetition of the measurements for each inspector and for each part.

2.2.3. Gauge R&R

The GR & R analysis is a method used by a system to determine the measurement system's suitability. The total GR & R consists of a variation of the total variation of reproducibility and repeatability:

$$GR\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad (3)$$

The percentage of measurement variation of a GR & R study system is calculated as GR & R% (Golbay and Kahraman, 2006).

There is a slight error in every measurement system in the general literature. So, those error rates are identified as (Montgomery, 2009);

- a) %GR&R \leq 10 the measuring device is accepted.
- b) %GR&R = 10 to 30 is considered conditional approval.

Currently, the equipment variance (EV) and the measurement variance (AV) are identified according to the conditions of use, and improvements will be made. Conditional approval is given to the measurement equipment that measures critical features, and an action plan is prepared.

- c) % GR & R ≥ 30 , the measurement system is developed, the problem is determined, and the fault source is improved. It is desirable that the Number of Distinct Categories (NDC) value gained by dividing the difference, change between the parts by GR & R is at least 5.

$$NDC = 1,14 \times (PV/GR\&R) \tag{4}$$

If the NDC is lower than value "5", the studies include improvements that should be made within the process.

3. Fuzzy Measurement System Analysis (FMSA)

The fuzzy concept was first proposed by Lotfi A. Zadeh, a cybernetic expert at the University of California, Berkeley. The concept was published in an article titled Information and Control (Zadeh, 1965). After being published, it was applied to the systems, and the theory has since become frequently discussed and applied to different approaches in various disciplines. The basis of a fuzzy theory lies in the elimination of uncertainties. It defines ambiguities with quantitative numbers and makes them into workable data. In a fuzzy logic approach that suggests that every piece of information should be expressed intermittently rather than 0 or 1, it is possible to define these intervals with the membership function shown in Figure 2:

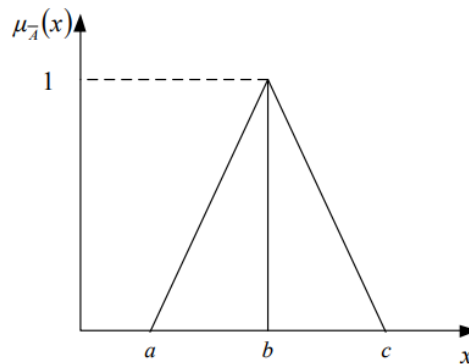


Figure 2. Types of variations (Yeh et al., 2015)

In MSA applications, if the quality level of the measurement system is in a low section, process analysis may not be expected to be valid. For this reason, the fuzzy system MSA is considered to be a far more accurate and reliable method than the conventional one. This precise data analysis will lead to a more accurate decision-making process and quality system.

In FMSA, the steps of the traditional MSA study are applied one by one, and only the figures are given in triple spacing. Here, a value of 0,001 will be applied to the data for fuzzifying the results. (Kahraman and Kaya, 2008):

$$X = (a, b, c) = (b \times \delta_1, b, b \times \delta_2) \quad \delta_1 = 0,999, \delta_2 = 1,001 \tag{5}$$

The steps in the FMSA study can be mentioned as below:

Step 1: n items randomly taken for representing the process are selected and randomly measured by inspectors (raters) and processed in Table 2.

Table 2. Record of measurement outcomes

		PART											
		1	2	3	4	5	6	7			
INSPECTOR / REPEATED	Ins. A	1. Rep.											
	Ins. A	2.Rep.											
											
	Ins. B	1. Rep.											
											

Step 2: The received measurement values are fuzzied for gaining triplet range values. It is possible to perform the mathematical operations of the obtained range values as follows (Zadeh 1965):

$$X(a, b, c) \text{ and } Y(d, e, f) \tag{6}$$

$$X + Y = (a, b, c) + (d, e, f) = (a + d, b + e, c + f) \tag{7}$$

$$X - Y = (a, b, c) - (d, e, f) = (a - d, b - e, c - f) \tag{8}$$

$$X \times Y = (a, b, c) \times (d, e, f) = (a \times d, b \times e, c \times f) \tag{9}$$

$$X \div Y = (a, b, c) \div (d, e, f) = (a \div d, b \div e, c \div f) \tag{10}$$

Step 3: The individual averages of the measurements taken for each inspector and their averages are calculated ($X_{a_{ort}}$, $X_{b_{ort}}$, $X_{c_{ort}}$).

Step 4: The range of measurements that each inspector has made and the average of these ranges is calculated ($R_{a_{ort}}$, $R_{b_{ort}}$, $R_{c_{ort}}$).

Step 5: The average of the finally calculated averages ($X_{a_{ort.ort.}}$, $X_{b_{ort.ort.}}$, $X_{c_{ort.ort.}}$) and the average of the intervals are calculated. ($R_{a_{ort.ort.}}$, $R_{b_{ort.ort.}}$, $R_{c_{ort.ort.}}$)

Step 6: The difference between the maximum average and the minimum average is calculated ($X_{a_{DIFF}}$, $X_{b_{DIFF}}$, $X_{c_{DIFF}}$), and the range of each track averages is calculated (R_{a_p} , R_{b_p} , R_{c_p}).

Step 7: The equipment variance (EV) is calculated as:

$$EV = (R_{a_{ort.ort.}}, R_{b_{ort.ort.}}, R_{c_{ort.ort.}}) \times K1 \tag{11}$$

$$EV = (R_{a_{ort.ort.}} \times K1, R_{b_{ort.ort.}} \times K1, R_{c_{ort.ort.}} \times K1) \tag{12}$$

$$EV = (EV_a, EV_b, EV_c) \tag{13}$$

* The K1 value is equal to 5.15 / d2.

Step 8: The inspector variance (AV) is calculated as:

$$\sqrt{(X_{DIFF} \times K2)^2 - \frac{(EV)^2}{n.r}} \tag{14}$$

$$AV = \sqrt{((X_{a_{DIFF}}, X_{b_{DIFF}}, X_{c_{DIFF}}) \times K2)^2 - \frac{(EV_a, EV_b, EV_c)^2}{n.r}} \tag{15}$$

$$AV = (AV_a, AV_b, AV_c) \tag{16}$$

Step 9: As a result, the GR & R value is calculated and interpreted as follows:

$$GR\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2} \tag{17}$$

$$GR\&R = \sqrt{(EV_a, EV_b, EV_c)^2 + (AV_a, AV_b, AV_c)^2} \tag{18}$$

$$GR\&R = (GR\&R_a, GR\&R_b, GR\&R_c) \tag{19}$$

4. Case Study and Results

In this study, the data of an automotive parts manufacturer are used. All measuring systems are analyzed per ISO / TS 16949 standards, which are in accordance with the working policy. Since the data obtained in this study were analyzed by the traditional MSA method, the observed values are assumed to be exact. However, with the assumption that these values are not entirely flawless, fuzzy MSA has been used to make clearer and more accurate decisions in this study. As a result of the study, both methods were compared, and the results were evaluated.

In a case study, 10 selected parts were measured by three inspectors (A, B, and C) in three repetitions each; these values are given in Table 3.

Table 3. Record of measurement outcomes

Inspectors / Repetition	PART										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. A	1	83,47	83,48	83,47	83,46	83,47	83,46	83,5	83,49	83,51	83,47
2.	2	83,46	83,49	83,47	83,46	83,47	83,46	83,5	83,46	83,51	83,47
3.	3	83,45	83,48	83,47	83,46	83,47	83,47	83,5	83,49	83,51	83,47
4. B	1	83,46	83,49	83,46	83,47	83,46	83,47	83,5	83,49	83,51	83,47
5.	2	83,46	83,46	83,46	83,47	83,46	83,47	83,5	83,49	83,51	83,47
6.	3	83,46	83,49	83,46	83,47	83,47	83,47	83,5	83,46	83,51	83,47
7. C	1	83,46	83,49	83,46	83,46	83,46	83,47	83,5	83,49	83,51	83,47
8.	2	83,45	83,49	83,46	83,44	83,46	83,47	83,5	83,49	83,51	83,47
9.	3	83,46	83,49	83,46	83,46	83,46	83,46	83,5	83,5	83,51	83,47

According to this data, Traditional MSA values are as in Table 4:

Table 4. Traditional MSA results	
Traditional MSA	
% GR&R	22,75
NDC	6,03

According to traditional MSA results, it is possible to say that this measurement system can be accepted after advising with the customer.

To form an ideal measurement system and try to make more precise decisions, the measurement data is fuzzified as in Table 5 and Table 6 with two different fuzzy coefficients:

Table 5. Record of 0,001 fuzzified measurement outcomes

Inspectors / Repetition	PART					
	1	2	3	4	5	
1. A	1	(82,39;83,47;83,55)	(83,40;83,48;83,56)	(83,39;83,47;83,55)	(83,38;83,46;83,54)	(83,39;83,47;83,55)
2.	2	(83,38;83,46;83,54)	(83,41;83,49;83,57)	(83,39;83,47;83,55)	(83,38;83,46;83,54)	(83,39;83,47;83,55)
3.	3	(83,37;83,45;83,53)	(83,40;83,48;83,56)	(83,39;83,47;83,55)	(83,38;83,46;83,54)	(83,39;83,47;83,55)
4. B	1	(83,38;83,46;83,54)	(83,41;83,49;83,57)	(83,38;83,46;83,54)	(83,39;83,47;83,55)	(83,38;83,46;83,54)
5.	2	(83,38;83,46;83,54)	(83,38;83,46;83,54)	(83,38;83,46;83,54)	(83,39;83,47;83,55)	(83,38;83,46;83,54)
6.	3	(83,38;83,46;83,54)	(83,41;83,49;83,57)	(83,38;83,46;83,54)	(83,39;83,47;83,55)	(83,39;83,47;83,55)
7. C	1	(83,38;83,46;83,54)	(83,41;83,49;83,57)	(83,38;83,46;83,54)	(83,38;83,46;83,54)	(83,38;83,46;83,54)
8.	2	(83,37;83,45;83,53)	(83,41;83,49;83,57)	(83,38;83,46;83,54)	(83,36;83,44;83,52)	(83,38;83,46;83,54)
9.	3	(83,38;83,46;83,54)	(83,41;83,49;83,57)	(83,38;83,46;83,54)	(83,38;83,46;83,54)	(83,38;83,46;83,54)
		6	7	8	9	10
1. A	1	(83,38;83,46;83,54)	(83,42;83,50;83,58)	(83,41;83,49;83,57)	(83,43;83,51;83,59)	(83,39;83,47;83,55)
2.	2	(83,38;83,46;83,54)	(83,42;83,50;83,58)	(83,38;83,46;83,54)	(83,43;83,51;83,59)	(83,39;83,47;83,55)
3.	3	(83,39;83,47;83,55)	(83,42;83,50;83,58)	(83,41;83,49;83,57)	(83,43;83,51;83,59)	(83,39;83,47;83,55)
4. B	1	(83,39;83,47;83,55)	(83,42;83,50;83,58)	(83,41;83,49;83,57)	(83,43;83,51;83,59)	(83,39;83,47;83,55)
5.	2	(83,39;83,47;83,55)	(83,42;83,50;83,58)	(83,41;83,49;83,57)	(83,43;83,51;83,59)	(83,39;83,47;83,55)
6.	3	(83,39;83,47;83,55)	(83,42;83,50;83,58)	(83,38;83,46;83,54)	(83,43;83,51;83,59)	(83,39;83,47;83,55)
7. C	1	(83,39;83,47;83,55)	(83,42;83,50;83,58)	(83,41;83,49;83,57)	(83,43;83,51;83,59)	(83,39;83,47;83,55)
8.	2	(83,39;83,47;83,55)	(83,42;83,50;83,58)	(83,41;83,49;83,57)	(83,43;83,51;83,59)	(83,39;83,47;83,55)
9.	3	(83,38;83,46;83,54)	(83,42;83,50;83,58)	(83,42;83,50;83,58)	(83,43;83,51;83,59)	(83,39;83,47;83,55)

Table 6. Record of 0,01 fuzzified measurement outcomes

Inspectors		PART				
/		1	2	3	4	5
Repetition						
1. A	1	(82,64;83,47;84,30)	(82,65;83,48;84,31)	(82,64;83,47;84,30)	(82,63;83,46;84,29)	(82,64;83,47;84,30)
2.	2	(82,63;83,46;84,29)	(82,66;83,49;84,32)	(82,64;83,47;84,30)	(82,63;83,46;84,29)	(82,64;83,47;84,30)
3.	3	(82,62;83,45;84,28)	(82,65;83,48;84,31)	(82,64;83,47;84,30)	(82,63;83,46;84,29)	(82,64;83,47;84,30)
4. B	1	(82,63;83,46;84,29)	(82,66;83,49;84,32)	(82,63;83,46;84,29)	(82,64;83,47;84,30)	(82,63;83,46;84,29)
5.	2	(82,63;83,46;84,29)	(82,63;83,46;84,29)	(82,63;83,46;84,29)	(82,64;83,47;84,30)	(82,63;83,46;84,29)
6.	3	(82,63;83,46;84,29)	(82,66;83,49;84,32)	(82,63;83,46;84,29)	(82,64;83,47;84,30)	(82,64;83,47;84,30)
7. C	1	(82,63;83,46;84,29)	(82,66;83,49;84,32)	(82,63;83,46;84,29)	(82,63;83,46;84,29)	(82,63;83,46;84,29)
8.	2	(82,62;83,45;84,28)	(82,66;83,49;84,32)	(82,63;83,46;84,29)	(82,61;83,44;84,27)	(82,63;83,46;84,29)
9.	3	(82,63;83,46;84,29)	(82,66;83,49;84,32)	(82,63;83,46;84,29)	(82,63;83,46;84,29)	(82,63;83,46;84,29)
		6	7	8	9	10
1. A	1	(82,63;83,46;84,29)	(82,67;83,50;84,34)	(82,66;83,49;84,32)	(82,67;83,51;84,35)	(82,64;83,47;84,30)
2.	2	(82,63;83,46;84,29)	(82,67;83,50;84,34)	(82,63;83,46;84,29)	(82,67;83,51;84,35)	(82,64;83,47;84,30)
3.	3	(82,64;83,47;84,30)	(82,67;83,50;84,34)	(82,66;83,49;84,32)	(82,67;83,51;84,35)	(82,64;83,47;84,30)
4. B	1	(82,64;83,47;84,30)	(82,67;83,50;84,34)	(82,66;83,49;84,32)	(82,67;83,51;84,35)	(82,64;83,47;84,30)
5.	2	(82,64;83,47;84,30)	(82,67;83,50;84,34)	(82,66;83,49;84,32)	(82,67;83,51;84,35)	(82,64;83,47;84,30)
6.	3	(82,64;83,47;84,30)	(82,67;83,50;84,34)	(82,63;83,46;84,29)	(82,67;83,51;84,35)	(82,64;83,47;84,30)
7. C	1	(82,64;83,47;84,30)	(82,67;83,50;84,34)	(82,66;83,49;84,32)	(82,67;83,51;84,35)	(82,64;83,47;84,30)
8.	2	(82,64;83,47;84,30)	(82,67;83,50;84,34)	(82,66;83,49;84,32)	(82,67;83,51;84,35)	(82,64;83,47;84,30)
9.	3	(82,63;83,46;84,29)	(82,67;83,50;84,34)	(82,67;83,50;84,34)	(82,67;83,51;84,35)	(82,64;83,47;84,30)

According to the fuzzified values, the fuzzy MSA values resulting from the calculations are as follows; for 0,001 coefficient %GR&R 23,73 and NDC 5,77. For 0,01 coefficient %GR&R 22,75 and NDC 6,03. According to fuzzy MSA results, it is possible to say that this measurement system can be accepted after advising with the customer.

The results of both the fuzzy and the traditional method are shown in table 7:

	Traditional MSA	Fuzzy MSA (0,001)	Fuzzy MSA (0,01)
% GR&R	22,75	23,73	22,75
NDC	6,03	5,77	6,03

It can be seen from the results that the analysis of measurement systems made with fuzzy values are closer to the probable rejection of the system. This means that the fuzzy MSA method should be preferred to eliminate a type 1 error. It is observed that in the analyzes made with fuzzy data, values are given intermittent values, hence giving more accurate results. As the fuzzified coefficient increases, the deviations in the right and left values are high, and the results seem to approximate the traditional methods.

5. Conclusion

In today's competitive conditions, trying to progress only with technological studies does not bring them success. Effective strategy choices, especially in the field of engineering, play an important role in achieving success. Elimination of uncertainties is an important issue in creating an effective strategy. Many studies have been done to eliminate the uncertainty environment in the processes, and fuzzy logic studies are one of the most popular in the field of engineering today.

Measuring systems traditionally use precise data. However, there may be cases where the user cannot always find the exact data. The way to account for such uncertainties in a measurement system is to work with imprecise data. Thus, it is possible to turn uncertainty into opportunity. In this study, the commonly used Measurement System Analyze (MSA) statistical tool was used to analyze measurement systems. An ideal measurement system should provide zero error in the measured value; however, there is no such system. For this reason, managers choose the MSA method with statistical properties. Traditionally MSA studies have included precisely observed values, which are not entirely flawless. The fuzzy MSA method is included in the study as an alternative method to these uncertain values. The exact values of the product of an automotive parts manufacturer were transformed into fuzzified values by the fuzzified coefficient, so the results became more realistic.

Since there is not much literature in the field of fuzzy MSA study, it will be a pioneer for new research. Future studies may include different methods of fuzzification. Furthermore, fuzzy values can be weighted according to inspectors to create a different study.

References

- Bokov, V.B. (2011). Pneumatic gauge steady-state modelling by theoretical and empirical methods. *Journal of Measurement*, Vol. 44, Issue 2, Pages: 303-311.
- Darestani, S.A., Ghane, N., Ismail, Y. and Tadi, A.M. (2021). Developing Fuzzy Tool Capability Measurement System Analysis. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, Vol.14, Pages: 79-92.
- Faraz, A. and Bameni Moghadam, M. (2007). Fuzzy Control Chart: A Better Alternative for Shewhart Average Chart. *Quality and Quantity*, Vol. 41, Pages: 375–385.
- Ford, General Motors and Chrysler, (1995). *Measurement System Analysis; Reference Manual*, 126p.
- Ford, (2002). *Automotive Industry Action Group (AIAG), Measurement Systems Analysis Reference Manual*. 3rd ed., Chrysler, Ford, General Motors Supplier Quality Requirements Task Force.
- Golbay, M. and Kahraman, C.(2006). An Alternative Approach to Fuzzy Control Charts: Direct Fuzzy Approach. *Information sciences*, Vol. 77, No. 6, Pages: 1463-1480.
- Göndör, V., & Koczor, Z. (2010). Improvement of the Measurement System Analysis Using Experimental Design. *Obuda University E-Bulletin*, Vol. 1(1), Pages: 35–42.
- Hajipour, V., Kazemi, A. and Mausavi, S.M. (2013). A fuzzy expert system to increase accuracy and precision in measurement system analysis. *Journal of Measurement*, Vol. 46, No: 8, Pages: 2270-2780.
- Hong, D.H. (2004). A Note on Cpk Index Estimation Using Fuzzy Numbers. *European Journal of Operational Research*, Vol. 158, Pages: 529–532.
- Kazemi, A., Haleh, H., Hajipour, V. and Rahmati, S.H.A. (2010). Developing a Method for Increasing Accuracy and Precision in Measurement System Analysis: A Fuzzy Approach. *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 6, Pages: 25-32.
- Kahraman, C. and Kaya, I., (2008). Depreciation and income tax considerations under fuzziness. *Fuzzy Engineering Economics with the application*, Vol. 233, Pages: 159-171.
- Koprivica, S.M. and Filipovic, J. (2018). Application of Traditional and Fuzzy Quality Function Deployment in the Product Development Process. *Engineering Management Journal*, Vol. 30, Pages: 98-107.
- Lee, H.T. (2001). Cpk Index Estimation Using Fuzzy Numbers. *European Journal of Operational Research*, Vol. 129, Pages: 683-688.
- Mittal, K., Tewari, P.C. and Khanduja, D. (2018). On the fuzzy evaluation of measurement system analysis in a manufacturing and process industry environment: A comparative study. *Management Science Letters*, Vol. 8, Pages: 201-216.
- Moheb-Alizadeh, H. (2014). Capability analysis of the variable measurement system with fuzzy data. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 38, Pages: 4559-4573.
- Montgomery, D.C. (2009). *Statistical Quality Control: A Modern Introduction*(sixth ed.). Wiley, New York.
- Montgomery, D.C. and Runger, G.C. (1993). *Gauge Capability and Designed Experiments. Part I: Basic methods*. *Quality Engineering*, Vol. 6, Pages: 115-135.
- Nasiri, M. and Darestani, S.A. (2016). *International Journal of Productivity and Quality Management*. 2016 Vol.18 No.4, Pages 474 – 498.
- Parchami, A. and Mashinchi, M. (2007). Fuzzy Estimation for Process Capability Indices. *Information Sciences*, Vol. 177, Pages: 1452–1462.

- Parchami, A., Mashinchi, M., Yavari, A.R. and Maleki, H.R. (2005). Process Capability Indices as Fuzzy Numbers. *Austrian Journal of Statistics*, 34, 4, Pages: 391–402.
- Rahmati, S.H.A. and Amalnick, M.s. (2015). Fuzzy Gauge Capability (C_g and C_{gk}) through Buckley Approach. *Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, Vol. 9.
- Smith, R.R., McCrary, S.W. and Callahan, R.N. (2007). Gauge Repeatability and Reproducibility Studies and Measurement System Analysis: A Multi-Method Exploration of the State of Practice. *Journal of Quality Technology*, 23, 1, Pages: 1-11.
- Wang, Y., Zhang, D., Zhang, S., Wang, H. and Cong, H. (2018). VLSI Circuit Measurement System Analysis Based on Random Fuzzy Variables. 2018 Eighth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), Pages: 2373-6844.
- Yeh, T.M. and Sun, J. (2013). Using the Monte Carlo Simulation Methods in Gauge Repeatability and Reproducibility of Measurement System Analysis. *Journal of Applied Research and Technology*, 11(5). [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(13\)71585-2](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(13)71585-2).
- Yeh, T.-M., Pai, F.Y. and Huang, C.-W. (2015). Using Fuzzy Theory in %GR&R and NDC of Measurement System Analysis. *Journal of Engineering*, Vol. 7, Pages: 161-176.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Journal of Information and Control*, Volume 8, Issue 3, Pages: 338-353.



Tek ve Çift Doz Aşı Uygulamalarının COVID-19 Vaka Sayıları Üzerinden Benzetim Yöntemiyle Karşılaştırılması

Comparison Between One and Two Dose Vaccine Applications Based on COVID-19 Cases with Simulation Method

Mustafa Demirbilek¹

¹ Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 27260 Şahinbey Gaziantep

Başvuru/Received: 23/09/2021

Kabul / Accepted: 14/11/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 15/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 15/01/2022

Öz

Çin'in Wuhan şehrinde başlayan COVID-19 salgını yaklaşık bir buçuk yıllık bir sürede dünyayı etkisi altına almış, milyonlarca insanın hastalanmasına ve ölmesine, ekonomik faaliyetlerde büyük kayıplara neden olmuştur. Geçmişte diğer salgınların durdurulmasında kullanıldığı gibi COVID-19 salgınına durdurmak için kullanılacak en etkili müdahale stratejisi aşılama değildir. Aşı geliştirme çalışmaları salgınla beraber başlamasına rağmen üretilen aşı sayısı toplumlar için hala çok yetersizdir. Kıt aşı miktarı ve tek doz aşı uygulamasının bireylerde belli ölçüde koruma sağlayabilmesi, iki doz halinde aşı uygulamasının birçok platformda eleştirilmesine yol açmıştır. Bu çalışmada farklı etkinlik düzeyleri, aşı miktarları ve dağıtım zamanları düşünülerek, Biontech aşısının tek ve çift doz halinde uygulanması, vaka sayıları üzerinden karşılaştırılmıştır. Salgının modellenmesinde, bireylerin diğer bireylerle, sadece ev, iş yeri ve okul gibi ortamlarda direkt etkileşim içinde, kalan bireylerle indirekt etkileşim içinde olabileceği SIR (Korunmasız-Hasta-İyileşen) Ağ modeli kullanılmıştır. Bir yıllık salgın süreci ve bir milyon kişilik popülasyonun düşünüldüğü modelde, tek ve çift doz aşı uygulama üzerine oluşturulan her senaryo için 30 koşum yapılmış ve sonuçlar arasındaki farklılıklar bağımsız örneklem t testi kullanılarak analiz edilmiştir. Altmış günlük dağıtım zamanı için çift doz uygulama ile karşılaştırıldığında, tek doz aşı uygulaması tüm etkinlik seviyelerinde vaka sayılarını önemli oranda düşürmüştür.

Anahtar Kelimeler

“COVID-19, Aşılama, Benzetim, SIR Ağ Modelleri”

Abstract

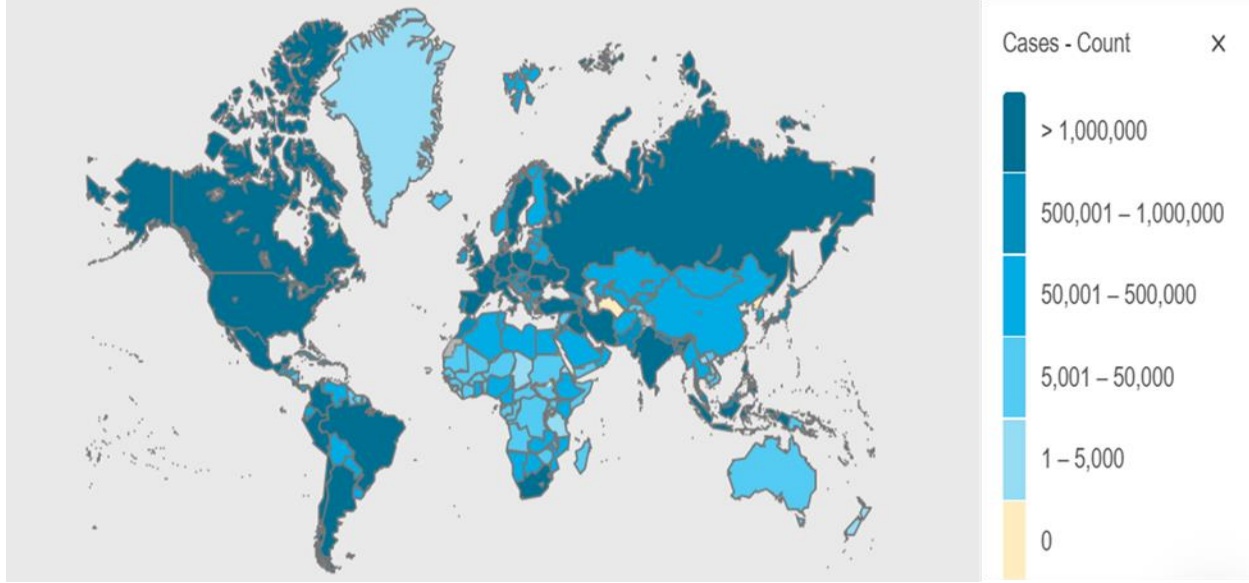
COVID-19 pandemic started Wuhan city in China affected world for almost one and half years and caused millions of infected and death people and great loss in economic activities. The most effective intervention strategy is vaccination to stop COVID-19 pandemic as it stopped other pandemics in history. The number of shots produced so far is insufficient for societies even though studies for developing vaccines started with the pandemic. Insufficient number of vaccines and the reasonable level protection of one-dose shot on individuals caused widespread criticisms of applications of two doses. In this study, applications of one dose and two dose vaccines are compared based on the number of cases by considering different efficacy levels, the number of shots, and delivery periods. SIR (Susceptible-Infectious-Recovered) Network model where individuals can directly interact with others only in homes, schools, and workplaces while indirectly interacting with the remainings is used to mimic the pandemic. Thirty trials are conducted for each scenario included an application of one or two dose vaccines and independent sample t tests are carried out to understand whether differences between results are statistically significant for the model a-year pandemic duration and a-million population are considered in. The application of one dose vaccine significantly decreases the number of cases compared to two doses for the 60-day delivery period.

Key Words

“COVID-19, Vaccination, Simulation, SIR Network Models”

1. Giriş

Bulaşıcı hastalıklar tarih boyunca insanlığı etkilemiş, çok sayıda insanın hastalanmasına ve ölmesine ve devletler için büyük ekonomik kayıplara neden olmuştur. Tarihteki veba, sıtma, kolera gibi salgınların yanı sıra, yirminci yüzyılın en büyük salgını olan İspanyol gribi yaklaşık 50 milyon kişinin hayatına mal olarak, birinci dünya savaşında ölenlerin sayısını geçmiştir (Demirbilek, 2020). Yeni milenyumda ise SARS, MERS ve Ebola salgınları dünya genelinde birçok insanın hastalanmasına ve ölmesine sebep olmuştur. 2019 yılının aralık ayında ortaya çıkan ve daha sonra COVID-19 olarak adlandırılan virüsün neden olduğu salgın, şimdiye kadar dünya genelinde yaklaşık 167 milyon insanın hasta olmasına, vakalardan yaklaşık 3.5 milyonun ölmesine ve ekonomik olarak büyük bir daralmaya neden olmuştur (Şekil 1).



Şekil 1. Dünya genelinde vaka sayılarının yoğunluğu (WHO, 2021)

Bulaşıcı hastalıkların yayılmasının durdurulması veya sağlık sistemine gerekli zamanın kazandırılması için en azından yayılma hızının azaltılması adına kullanılan, karantina, antiviral ilaç, kapanma/kısıtlama, aşılama gibi çeşitli müdahale stratejileri bulunmaktadır. Bunların arasında en etkili yöntem aşılama (Siegrist, 2008). COVID-19 salgını yaklaşık bir buçuk yıldır etkisini sürdürürken, geliştirilen aşılar birçok topluma sürü bağışıklığı kazandırabilecek sayılarda üretilip dağıtılamamıştır. Bununla beraber başta Moderna, Biontech ve Sinovac olmak üzere birçok aşının iki hatta üç doz halinde uygulanması, önemli sayıda bireyin aşıya ulaşımını daha da güçleştirmektedir. Aşıların birden çok doz halinde uygulanma sebebi, belli bir zaman aralığında etkinlik derecelerini (efficacy level or rate) maksimum seviyelere çıkarmak ve koruyuculuklarını artırmaktır. Fakat toplumların önemli bir kesimi bir doz aşıya dahi ulaşamıyorken bazı kesimlere iki doz aşı yapılmak istenmesi tartışmaları da beraberinde getirmektedir. Bazı araştırmacılar tek dozda olsa mümkün olduğunca fazla kişinin aşı olmasını savunurken (Sinai, 2021; Goldberg, 2021; BBC News, 2021), bazı araştırmalarda tek doz aşının yeterli olmayacağı savunulmuştur (Bose, 2021; Gorvett, 2021; Goje, 2021).

Bu çalışmada yukarıdaki tartışmalar değerlendirilerek, Pfizer-Biontech aşısının aynı miktarlar için tek doz ve çift doz uygulanması halinde, farklı kapsama seviyeleri ve etkinlik dereceleri düşünülerek, toplam hasta ve ölüm sayılarını ne kadar düşürdüğü incelenmiştir. Pfizer-Biontech aşısının tek doz etkinlik düzeyi için farklı araştırmalarda farklı sonuçlara ulaşıldığı için hassasiyet analiziyle değerlendirilmiştir. Salgının modellenmesinde SIR (Korunmasız-Hasta-İyileşmiş) Ağ (Network) Temelli model kullanılmıştır. Ağ temelli modeller uzun yıllardır işgücü piyasalarının (Calvó-Armengol ve Jackson, 2007), uluslararası ticaretin (Chaney, 2014), finansal piyasaların (Elliott vd., 2014) modellenmesi gibi farklı çalışmalarda kullanılmıştır. Salgın hastalıkların modellenmesi de ağ temelli modellerin yapısına uygun olduğundan bu alanda yapılan çalışmalarda bulunmaktadır (Craig vd., 2020). Ağ temelli modelde, üretilen popülasyondaki bireyler birbirlerine direkt veya indirekt bağlantılı olabilmekte ve hastalık geçişleri bu örüntü üzerinden gerçekleşmektedir. Bireylerin birbirleriyle direkt veya indirekt bağlantısı sosyal çevreleriyle ilgilidir. Örnek olarak aynı evde yaşayan bireyler birbirleriyle direkt bağlantı kurabilmekteyken, bireylerin okullarındaki veya iş yerlerindeki arkadaşları, evdeki diğer bireylerle indirekt bağlantı kurmuş olur. Hastalığın geniş kesimlere yayılması indirekt bağlantılarla gerçekleşmektedir. Bulaşıcı hastalıkların yayılımının modellenmesinde kullanılan daha eski bir yöntem olan SIR bölmeli (compartmental) modellerde ise, popülasyondaki tüm bireylerin homojen olarak birbirleriyle ilişkili olduğu varsayımı yapılmıştır. Buna göre aynı evin içinde yaşayan bireylerin birbirleriyle etkileşime geçme olasılığı, şehrin bir ucunda yaşayan bireyle etkileşime geçme olasılığı ile aynı kabul edilmiştir. SIR bölmeli modeller birçok çalışmada kullanılmasına rağmen (Hethcote, 2000; Zaric ve Brandeau, 2001; Medlock ve Galvani, 2009), gerçek durumlara daha uygun olduğundan bu çalışmada SIR ağ temelli model kullanılmıştır.

Literatürde matematiksel SIR modellerinin yanı sıra, ağ temelli modellerin kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. FluTE (Chao vd., 2010), EpiFire (Hladish vd., 2012), FRED (Grefenstette vd., 2013), SIMID (Ramírez-Ramírez vd., 2013) ve epiDMS (Liu vd., 2016)

salgınları modellemek için geliştirilmiş ağ temelli yazılımlara örnek olarak sayılabilir. Sayılan yazılımlar incelenen salgınları doğru ve gerçekçi bir şekilde modellemelerine rağmen komplike yapıları nedeniyle üzerlerinde yapılmak istenen değişiklikler sınırlı kalmaktadır. Bazıları ara yüzlerinde bulunan belirli parametrelerde (iyileşme periyodu, R_0 değeri, başlangıç hasta sayısı, popülasyon büyüklüğü, vs.) değişiklik imkanı sunmasına rağmen, bu çalışmada düşünülen farklı ağ yapıları, çevresel faktörler, aşı müdahaleleri gibi önemli değişiklikleri yapmak mümkün değildir. Bazıları ise açık kaynak kodlu olmasına rağmen, içeriğinde büyük değişiklikler yapmak neredeyse yeniden yazmak kadar zor olacaktır. Son olarak çalışmamızda birçok senaryo için belirli sayılarda koşum yapılmış ve sonuçlar arasındaki farkların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı test edilmiştir. Bunun için salgın modellemesini, gereken şartlara göre, görece hızlıca yapabilecek bir model geliştirilmeye ihtiyaç duyulmuştur.

Literatüre bakıldığında tek ve çift doz aşı uygulamasının hasta ve ölüm sayıları bakımından meydana çıkaracağı sonuçlar spekülasyondan öteye gidememiştir. Bu çalışmada modelleme ve benzetim teknikleri kullanılarak, Pfizer-Biontech aşısının farklı etkinlik düzeylerinde tek ve çift dozlarda, farklı sayılarda ve farklı zamanlarda dağıtımının, hasta ve ölüm sayıları üzerine etkileri incelenmiştir. Amacımız karar vericilerin sınırlı aşı miktarları ve dağıtım zamanlarında, en doğru dağıtım kararını vermelerine yardımcı olmaktır.

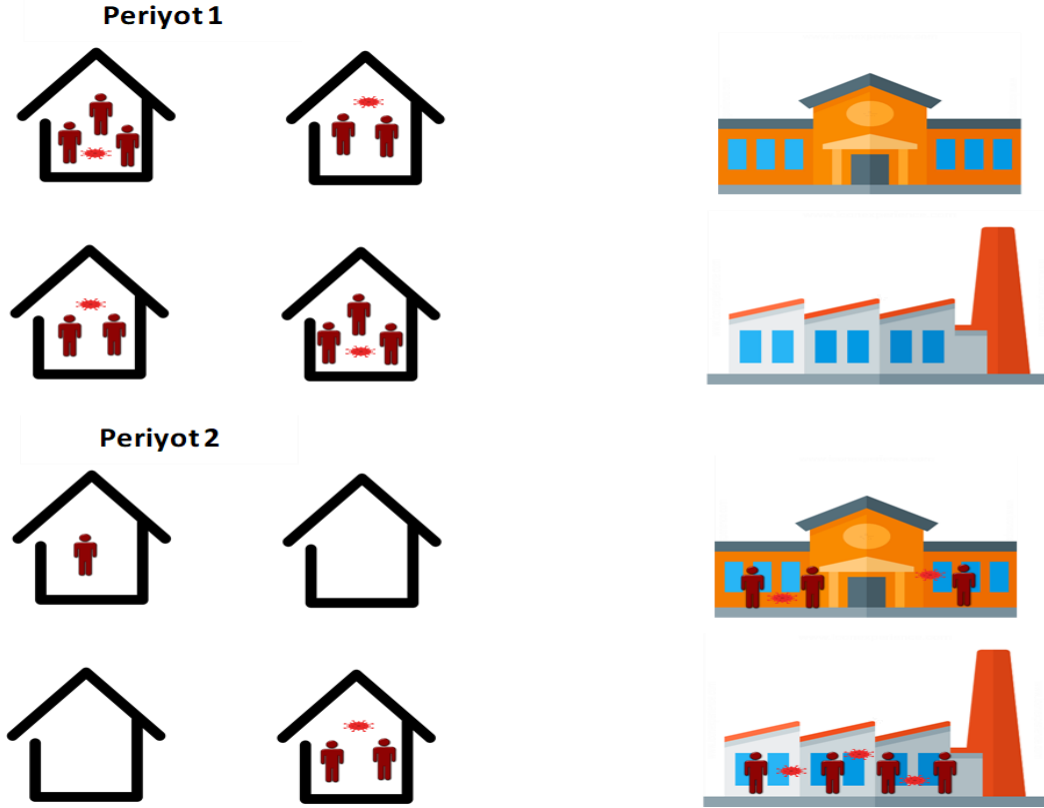
Bir sonraki bölümde geliştirilen SIR ağ modeli ve benzetim için gerekli olan verilerle ilgili detaylı bilgi verilecektir. Bölüm 3'te benzetim bulguları açıklanacak, son bölümde ise sonuçlar tartışılarak, bazı varsayım ve sadeleştirmelerden bahsedilecektir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. SIR Tabanlı Ağ Modelleri

SIR, İngilizce Susceptible (Korunmasız), Infected (Hasta), Recovered (İyileşmiş) kelimelerinin baş harflerinden oluşan bir kısaltmadır. Korunmasız veya sağlıklı olarak ifade edebileceğimiz bireyler, topluluk için henüz hasta olmamış ve hasta olma potansiyeli olanları ifade etmektedir. Sağlıklı ve hasta bireyler bir zaman aralığı boyunca kontağa geçebilir ve bu kontak sonucu sağlıklı bireylerde hasta olabilirler. Daha sonraki sürelerde bu yeni hasta olmuş bireylerde iyileşene kadar diğer sağlıklı bireylere hastalığı yayabilirler. İyileşme sürecinde hasta bireyler ölebilir. İyileşen kişiler bir daha hasta olmaz ve hastalığı bulaştıramazlar. Matematiksel olarak modellenebilen klasik bir SIR modelinin en önemli ön kabulü, topluluk içindeki tüm bireylerin birbirleriyle etkileşim içine girmelerinin mümkün olmasıdır. Bir örnek verilecek olursa, şehrin bir ucunda yaşayan bir kişinin bir aile bireyi ile kontağa geçme olasılığının, şehrin diğer ucunda yaşayan hiç tanımadığı başka bir birey ile kontağa geçme olasılığına eşittir. Gerçek hayatta bu durumu gözlemlemek çok güçtür. Bireyler çoğunlukla yakın çevresindeki bireylerle etkileşim içinde olmaktadır. Bu çevreler genellikle ev, okul, toplu taşıma araçları ve iş yerleridir. Ağ yapılarını temel alan modeller, kişilerin yakın çevrelerindeki bireylerle direkt, yakın çevrelerindeki kişilerin kendi çevrelerindeki bireylerle endirekt bağlantılar kurabilmesine olanak sağlarlar. Bulaş açısından bakılacak olursa, bireyler direkt bağlantılı olduğu bireylerden hastalık kapma riskine sahipken, endirekt olarak çevresindeki kişilerden de etkileneceklerdir. Örnek olarak bir evde sürekli kalan bir çocuk, çalışan bir ebeveyniyle direkt bağlantılıyken, ebeveyninin iş arkadaşlarıyla endirekt bağlantılı olur. İş yerinde hasta bireyler bulunması, bu bireylerle direkt bağlantısı olan ebeveynin hasta olmasına ve çocuğuna bulaştırmasına neden olabilecektir. SIR tabanlı ağ modelleri salgın hastalıkların gerçeğe yakın modellenmesinde çok daha başarılıyken, ağ yapıları kurmanın getirdiği yüksek işlem zamanlarından dolayı matematiksel modellemeler hala tercih edilmektedir (Demirbilek, 2021).

Çalışmamızda model dâhilinde üretilen bireylerin birbirleriyle kontağa geçebileceği üç farklı çevre tanımlanmıştır. Bunlar, çalışan bireylerin etkileşimde bulunabilecekleri iş yerleri, öğrencilerin etkileşime geçebilecekleri okullar ve yaşlı, işsiz, çocuk ve ev hanımlarının gün içinde zaman geçirdikleri evlerdir. Sisteme tanımlanan her bir birey bir eve atanmak zorundadır. Modelde bir gün iki zaman dilimine ayrılmış, tüm bireyler ilk zaman dilimini evlerinde geçirirken, diğer zaman diliminde bazı bireyler okul ve iş yerlerinde, kalan bireyler ise evlerinde zaman geçirip, ortamlarındaki bireylerle etkileşim içinde olmaya devam ederler. Bu sayede bireyler arasında direkt ve endirekt bağlantılar kurulmuş olur. Anlatılanlar Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Ağ temelli model (Network Model)

Hasta olmayan bir bireyin, bir zaman aralığında hasta olma olasılığı, pb , Eşitlik 1'deki gibi hesaplanmaktadır (Demirbilek, 2021).

$$pb = 1 - p^n \quad (1)$$

0 ve 1 arasında değer alan p , bulaş şiddetine (attack rate) göre belirlenmektedir. Bireylerin bulunduğu ortamdaki (ev, iş yeri ve okul) hasta birey sayısını gösteren n sayısının yüksek olması, korunmasız bireyin enfekte olma olasılığını artırır. Hesaplanan enfekte olma olasılığı, 0 ve 1 arasında üretilen rastgele sayıdan büyük olması durumunda kişi hastalanır, küçükse korunmasız olarak kalmaya devam eder. Birey hasta olduktan sonra iyileşme periyodu belirtilen aralıklarda rastgele atanır. Hasta olduğu süre zarfında kişi, ortamı içinde bulunan sağlıklı bireyleri hasta edebilir. Enfekte olma ihtimali sadece sağlıklı kişiler içindir (Demirbilek, 2021).

2.2. Benzetim Verileri

Bu çalışma kapsamında 360 günlük salgın süreci düşünülmüştür. Salgının tepe noktası yaklaşık sürecin ortalarına düşmektedir. Tanımlı popülasyon, 0-4, 5-19, 20-24, 25-59, 60 ve üstü olmak üzere beş farklı yaş grubuna bölünmüştür. Nüfusun yaş gruplarına göre dağılımı 2019 TÜİK verilerine göre yapılmıştır. 5-19 yaş grubundaki bireylerin ilköğretim ve lise çağındaki öğrenciler olduğu; 20-24 yaş aralığındaki bireylerin %70'inin üniversite öğrencileri olduğu varsayılmıştır. 20-24 yaş aralığındaki bireylerin geriye kalanı ve 25-59 yaş grubundaki bireylerin %85'inin çalıştığı düşünülmüş, geriye kalan yaş gruplarındaki bireylerin gün boyu evlerinde kaldığı varsayılmıştır. İyileşme periyodu her kişi için aynı olup, 6 ve 9 gün arasında düzgün dağılmıştır. Her koşum, rastgele olarak seçilmiş 15 hasta bireyle başlamaktadır. Evlerdeki birey sayısı 1 ve 7, iş yerlerindeki birey sayısı 50 ve 100, son olarak okullardaki birey sayısı 290 ve 310 arasında düzgün dağılıma sahiptir. Salgın şiddeti ve ölüm oranları Tablo 2'deki gibi gerçek verilere göre hesaplanmıştır. Aşılma seviyesi, aşılana bireylerin toplam birey sayısına oranı olarak tanımlanabilir. Bu çalışma kapsamında, %10, %20 ve %30 olmak üzere üç farklı kapsama seviyesi uygulanmıştır. Bu kapsama seviyeleri iki doz aşı için geçerli olmakla beraber; tek doz aşı düşünüldüğünde bu seviyelerin iki katına çıkılmaktadır. Örnek olarak iki doz aşılama için 1 milyon kişilik bir nüfusun %10'unun kapsanması hedeflenirse 200,000 aşı gerekecektir. Bu miktarda aşı tek doz halinde uygulandığında aynı nüfusun %20'si kapsanacaktır.

Biontech aşısı için ilk doz etkinlik oranları için %70, %75 ve %80 olmak üzere üç farklı senaryo düşünülmüştür. Bunun sebebi yapılan çalışmalarda ilk doz aşılama için farklı etkinlik oranları gözlenmesidir. Biontech aşısı için birinci ve ikinci aşılama arasındaki 3 haftalık süreçte aşının etkinlik oranı %53 olarak, ikinci dozdan sonraki bir haftalık süreçten sonra etkinlik oranının %95'e çıktığı açıklanmıştır (Dawson, 2021). Bununla beraber tek doz aşının etkinlik oranının, uygulanmasından itibaren 4 haftalık süreç sonunda %70, %74 ve

%80'lere çıktığı farklı ülkeler tarafından yapılan araştırmalarda ortaya konmuştur (Schuster-Bruce, 2021; Van Beusekom, 2021). Bu çalışmada tek doz için %70 , %75 ve %80 olmak üzere üç farklı etkinlik oranı, iki doz için belirtilen %95'lik etkinlik oranıyla karşılaştırılmıştır. Hem tek doz hem de iki dozluk uygulama için birinci ve ikinci doz arasındaki 21 günlük sürede etkinlik oranı %53 kabul edilmiştir. Daha sonra verilen maksimum etkinlik oranlarına bir haftalık süre boyunca lineer olarak ulaşıldığı varsayılmıştır. Benzetim ile ilgili gerekli veriler Tablo 1'de özet olarak gösterilmiştir.

Tablo 1. Benzetim verileri

Salgın şiddeti	7.4%	Kapsama Seviyesi (%)	10,20,30
Ölüm Oranı	2.1%	Dağıtım Zamanı (gün)	60 ve 120
Popülasyon (milyon)	1	Salgın Süresi (gün)	360
Başlangıç Hasta Sayısı	15	Aşılamanın Başlangıcı	30. Gün
İyileşme Zamanı (gün)	Düzgün (6,9)	Okul (kişi)	Düzgün (290,310)
Ev (kişi)	Düzgün (1,7)	İş yeri (kişi)	Düzgün (50,100)
Etkinlik (Doz 1 ve 2)	%53	Etkinlik Süresi (Gün)	21
Maksimum Etkinlik (2 Doz)	%95	Maksimum Etkinlik (1 Doz)	%70,%75,%80

Salgın şiddeti (attack rate), tamamen korunmasız bir popülasyonda, belli bir süre sonunda hasta olan bireylerin toplam popülasyona oranı olarak tanımlanır. Modelimizde belirlenen çalışma süresi sonunda ortaya çıkan hasta ve ölü sayısının kalibrasyonunu, altı farklı ülkenin COVID-19 vaka ve ölüm sayılarına göre yapılmıştır. Baz alınan altı farklı ülkenin nüfusları, vaka ve ölü sayıları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Altı ülkenin COVID-19 vaka ve nüfus sayılarına göre bulaş şiddeti ve ölüm oranlarının hesaplanması [2]

Ülke	Nüfus	Vaka	Bulaştırma Şiddeti	Ölümlü Vaka	Ölüm/Hasta Oranı
ABD	331.002.651	30.173.235	0,091	598.597	0,020
Almanya	83.783.942	3.243.966	0,039	95.767	0,030
İngiltere	67.886.011	5.146.035	0,076	97.031	0,019
Fransa	65.273.511	5.074.276	0,078	89.957	0,018
İspanya	46.754.778	4.289.553	0,092	74.374	0,017
İtalya	60.461.826	4.134.479	0,068	92.850	0,022
Oranlar	...		0,074	...	0,021

Çalışma içinde iyileşme zamanı, evlere, okullara ve iş yerlerine atanan kişi sayıları, hastalığın bulaşma durumları gibi birçok stokastik veri kullanıldığından, 30 koşum için ortaya çıkan ortalama sonuçlar arasındaki farkın, istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını anlamak için bağımsız örneklem t testleri uygulanmıştır. Modelimiz Python programlama diliyle kodlanmış, bütün koşumlar Intel i5 7200U 2.5 GHz işlemcili ve 8 GB belleğe sahip Windows 10 işletim sistemi kurulu bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular

Tablo 3 ve 4'de sırasıyla, 60 ve 120 günlük dağıtım zamanlarında, farklı aşı miktarları ve etkinlik seviyelerinde, tek doz ve iki doz aşılama için toplam hasta ve ölüm sayılarıyla, 30 koşum sonucu elde edilen ortalamalar arasındaki farkın, istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığının anlaşılması için yapılan bağımsız örneklem t-testinin sonuçları gösterilmiştir. Testler için H_0 hipotezi, iki ortalama değer arasında anlamlı bir farkın olmaması; alternatif hipotez ise değerlerin birbirinden farklı olmasıdır. Testlerin sonucunda ortaya çıkan p değerleri, eşik değer olan 0.05 ile karşılaştırılmıştır. Eşik değerden küçük olan test değerleri H_0 hipotezinin reddini; yani sonuçlar arasındaki farkın anlamlı olduğunu göstermektedir. Örnek olarak Tablo 3'e baktığımızda, aşıların iki doz olarak dağıtılmasından sonra ortaya çıkan hasta sayıları ile %70 etkinlik seviyesinde tek doz olarak dağıtımıyla ortaya çıkan hasta sayıları için yapılan t testinde ortaya çıkan p değeri $9.9E-03$ olmuştur. Bu sonuca göre aşıların 2 doz olarak uygulandığı senaryoda oluşan hasta sayısı, tek doz olarak uygulandığında ortaya çıkan hasta sayısından anlamlı olarak fazladır diyebiliriz.

Tablo 3, 60 günlük dağıtım zamanı için farklı dozlarda ve etkinlik seviyelerinde yapılan aşılamanın ve t testlerinin sonuçlarını göstermektedir. Öncelikle tabloda yer alan "Aşısız" satırı herhangi bir aşılama stratejisi olmadan yapılan benzetimde toplam hasta ve ölüm sayılarını göstermektedir. Daha önceden de bahsedildiği gibi bu sayılar gerçek COVID-19 vaka ve ölüm sayılarına göre kalibre edilmiştir. Aşı miktarları toplam uygulanan doz adetlerini göstermektedir. İki doz aşı uygulandığı takdirde belirtilen sayıların yarısı

kadar kişi aşılanmış olacaktır. İki y¼z bin aşı çift doz halinde uygulandığında, bir milyon kişilik bir n¼fus için %10 kapsama sağlamaktadır. Hiç aşılama yapılmayan durumla kıyaslandığında vaka sayıları yaklaşık %17 oranında azalmıştır. Tek doz aşılama için en küçük etkinlik seviyesi %70 olarak belirlenmiştir. Bu seviyede dahi tek doz halinde uygulanan aşılama sonucu oluşan hasta ve ölü sayısı, çift doz uygulanma sonrası oluşan vaka sayılarından küçüktür. Çıkan sonuçlar arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlıdır. Etkinlik düzeyi arttığında beklendiği gibi hasta ve ölüm sayıları da azalmaktadır. Sayılar arasındaki farklar, sadece tek ve çift doz arasındaki fark için değil, farklı etkinlik düzeylerindeki tek doz aşı uygulaması sonucu ortaya çıkan hasta ve ölü sayıları için de istatistiki olarak anlamlıdır. 60 günlük aşılama sürecinde sadece %75 ve %80 etkinlik oranlarındaki tek doz aşılamada sonuçlar birbirine yakındır. Aşı sayıları arttıka sonuçlar arasındaki farklar daha belirgin olmaktadır. İki y¼z bin aşı kullanıldığında %70 etkinlik düzeyinde tek doz aşılama çift doz aşılamaya göre vaka sayılarını %4 oranında azaltırken; aşı miktarı iki kat arttığında vaka sayıları %7; üç kat arttığında ise vaka sayıları %10 civarında azalmaktadır. Etkinlik oranı %80 olduğunda, tek doz uygulama yapılması halinde vaka sayılarındaki azalma, sırasıyla %11, %19 ve %22 olmaktadır.

Tablo 3. Bir milyon kişilik nüfus için 60 gün boyunca dağıtılan farklı miktar, doz ve etkinlik oranlarındaki aşılamanın vaka sayılarına etkisi ve sonuçların anlamlılığını ölçmek için yapılan t testleri sonuçları

Aşı Miktarı		Hasta	Ölüm	Bağımsız Örneklem T-testleri			
Aşısız	...	74.937	1.764	2 Doz	1 Doz (%70)	1 Doz (%75)	1 Doz (%80)
200.000	2 Doz	57.763	1.325	...	9,9E-03	7,8E-07	8,9E-10
	1 Doz (%70)	55.361	1.160	9,9E-03	...	7,1E-03	4,4E-05
	1 Doz (%75)	53.055	1.128	7,8E-07	7,1E-03	...	2,7E-02
	1 Doz (%80)	51.549	1.103	8,9E-10	4,4E-05	2,7E-02	...
400.000	2 Doz	44.262	1.012	...	4,3E-05	2,9E-14	1,0E-18
	1 Doz (%70)	41.072	755	4,3E-05	...	1,8E-08	1,3E-13
	1 Doz (%75)	36.895	690	2,9E-14	1,8E-08	...	2,4E-02
	1 Doz (%80)	35.784	684	1,0E-18	1,3E-13	2,4E-02	...
600.000	2 Doz	34.899	768	...	7,6E-08	2,1E-18	3,6E-22
	1 Doz (%70)	31.637	489	7,6E-08	...	6,7E-07	5,8E-12
	1 Doz (%75)	29.010	478	2,1E-18	6,7E-07	...	9,8E-05
	1 Doz (%80)	27.267	460	3,6E-22	5,8E-12	9,8E-05	...

Tablo 4, 120 günlük dağıtım zamanı için farklı dozlarda ve etkinlik seviyelerinde yapılan aşılamanın ve t testlerinin sonuçlarını göstermektedir. Altmış günlük dağıtım zamanıyla kıyaslandığında, vaka sayılarının biraz daha yükseldiği görünmektedir. Bazı durumlarda çift doz ve tek doz aşılama sonucu oluşan vaka sayıları arasındaki farklar istatistiksel olarak anlamlı değildir. Örneğin 200.000 doz aşı için çift doz veya tek doz uygulanması sonuçları etkilememiştir. Benzer şekilde 400.000 aşı için, etkinlik oranlarının %70 ve %75 olmasının vaka sayılarına anlamlı bir etkisi gözlenmemiştir. Diğer sonuçlar arasındaki farklar p değerlerinden gözüküceği üzere istatistiksel olarak anlamlıdır. Sırasıyla %70, %75 ve %80 etkinlik seviyelerinde tek doz aşı uygulamalarının, çift doz aşı uygulamasıyla karşılaştırıldığında vaka sayılarını iki y¼z bin doz için %0.5 (anlamlı değil), %5, %9, dört y¼z bin doz için %9, %12, %16 ve altı y¼z bin doz için %10, %16, %21 oranlarında düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Tablo 4. Bir milyon kişilik pop¼lasyon için 120 gün boyunca dağıtılan farklı miktar, doz ve etkinlik oranlarındaki aşılamanın vaka sayılarına etkisi ve sonuçların anlamlılığını ölçmek için yapılan t testleri sonuçları

Aşı Miktarı		Hasta	Ölüm	Bağımsız Örneklem T-testleri			
Aşısız	...	74.937	1.764	2 Doz	1 Doz (%70)	1 Doz (%75)	1 Doz (%80)
200.000	2 Doz	59.105	1.364	...	3,5E-01	4,3E-04	8,8E-09
	1 Doz (%70)	58.770	1.244	3,5E-01	...	4,2E-03	1,0E-06
	1 Doz (%75)	56.072	1.203	4,3E-04	4,2E-03	...	7,5E-04
	1 Doz (%80)	53.744	1.159	8,8E-09	1,0E-06	7,5E-04	...
400.000	2 Doz	48.095	1.093	...	2,3E-06	1,1E-11	4,3E-16
	1 Doz (%70)	43.957	838	2,3E-06	...	1,3E-02	3,2E-06

Tablo 4 (devam). Bir milyon kişilik pop¼lasyon için 120 gün boyunca dağıtılan farklı miktar, doz ve etkinlik oranlarındaki aşılamanın vaka sayılarına etkisi ve sonuçların anlamlılığını ölçmek için yapılan t testleri sonuçları

Aşı Miktarı		Hasta	Ölüm	Bağımsız Örneklem T-testleri			
400.000	1 Doz (%75)	42.311	818	1,1E-11	1,3E-02	...	7,5E-04
	1 Doz (%80)	40.323	796	4,3E-16	3,2E-06	7,5E-04	...
600.000	2 Doz	39.449	885	...	2,1E-08	5,0E-15	8,7E-19
	1 Doz (%70)	35.359	599	2,1E-08	...	2,9E-04	4,3E-08
	1 Doz (%75)	32.992	575	5,0E-15	2,9E-04	...	5,4E-03
	1 Doz (%80)	31.308	573	8,7E-19	4,3E-08	5,4E-03	...

4. Sonuç ve Tartışma

İnsanlık tarihi boyunca bulaşıcı hastalıklar medeniyetleri etkilemiş, çok sayıda insanın hasta olmasına ve hayatını kaybetmesine neden olmuşlardır. Son olarak dünyayı etkisi altına alan COVID-19 salgını şimdiye kadar milyonlarca insanın hastalanmasına ve ölmesine neden olmuş, bunun yanında yarattığı büyük iş gücü kayıpları, üretim faaliyetlerindeki aksamalar, arz talep dengesindeki bozulmalar yüzünden birçok ülke ekonomik krizlerle boğuşmak zorunda kalmıştır. Salgının başlamasından itibaren yapılan aşı çalışmaları meyvelerini vermeye başlamış olsa da, üretilen aşı miktarı hala gerekenin çok altındadır. Biontech, Moderna, Sinovac gibi önde gelen aşı üreticilerinin COVID-19'a karşı geliştirdiği aşı, etkinlik oranlarını mümkün olduğu kadar yukarı taşımak için iki doz halinde uygulanmaktadır. Son yapılan çalışmalarda, aşılarda tek doz uygulandığı takdirde, yine önemli oranlarda etkinlik sağladığı görülmüştür. Bu da, kıt olan aşı kaynaklarını daha iyi kullanmak ve daha fazla insanın aşıya erişimini mümkün kılmak adına aşılarda tek doz uygulanması gerektiği tartışmalarını beraberinde getirmiştir. Bu çalışmada, Biontech aşısının çift doz ve farklı etkinlik oranlarında tek doz olarak uygulandığında, toplam hasta ve ölüm sayısını nasıl etkileyeceği konu alınmıştır. Salgının modellenmesi için SIR (Korunmaz-Hasta-İyileşen) Ağ (Network) modeli geliştirilmiştir. Bir yıllık bir salgın süreci ve bir milyon kişilik bir nüfusun düşünüldüğü modelimiz, birçok stokastik parametre içerdiğinden, her senaryo için 30 koşum yapılmış ve çıkan sonuçlar arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını anlamak için bağımsız örneklem t testleri uygulanmıştır.

Sonuçlar 60 ve 120 günlük dağıtım süreçleri düşünülerek değerlendirilmiştir. Her dağıtım süreci için iki yüz, dört yüz ve altı yüz bin doz aşı mevcudiyeti düşünülmüştür. Altmış günlük dağıtım zamanı için bütün doz mevcudiyetlerinde, tek doz aşı dağıtımı iki doza göre daha düşük vaka sayıları sağlamıştır. Doz miktarları arttıkça sonuçlar arasındaki farklar orantısız olarak artmaktadır. Yapılan t testi sonuçlarına göre sonuçlar arasındaki farklar ekseriyetle istatistiksel olarak anlamlıdır. 120 günlük dağıtım zamanı için de tek doz aşı uygulaması iki doza göre vaka sayılarını düşürmesine rağmen, iki yüz bin dozluk uygulama için sonuçlar arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. Bunun yanında bazı etkinlik oranları için sonuçlar anlamlı değildir. Ancak genel olarak sonuçlara bakıldığında tek doz aşı uygulaması aşağıda belirtilen varsayımlar da göz önüne alınmak şartıyla iki doz aşı uygulamasına göre hasta ve ölüm sayılarını azalttığını söyleyebiliriz. Karar vericiler açısından baktığımızda, özellikle aşı sayısı, uygulanacak kişi sayısına oranla kısıtlı olduğunda tek doz aşı uygulaması tavsiye edilebilir. Herkesin bir dozda olsa aşılabilmesi, sürü bağışıklığına daha hızlı ulaşmak adına büyük önem arz etmektedir. Yeni bir virüse karşı geliştirilen aşılarda test, üretim ve dağıtım süreçlerinin önemli vakit alması, salgının ilk dönemlerinde insanların aşıya ulaşımını zorlaştırmaktadır. Daha sonraki süreçlerde geliştirilen aşılarda farklı bölgelerde ve yüksek miktarlarda üretilmesi ve dağıtım kanallarının genişletilmesi, muhakkak aşıya erişimi daha kolaylaştıracaktır. Bu nedenle, başlangıçta tek dozda olsa fazla kişiye aşısının ulaştırılabilmesi, yeterli aşı sayılarına ulaşıldığında ise ikinci dozların uygulanması makul bir seçenek olarak görünmektedir.

Çalışmamızdaki en önemli ön kabuller aşı çalışmalarının çok yeni olmasından ileri gelmektedir. Özellikle tek ve çift doz için kabul edilen etkinlik oranları ve bu etkinlik oranlarına ulaşılacak sürelerle ilgili farklı sonuçlar bulunmaktadır. Özellikle tek doz aşı için kabul edilen etkinlik düzeylerine ulaşma süresi ile ilgili çok net bilgilere ulaşılamamıştır. Bu yüzden iki doz için belirtilen etkinlik oranına ulaşma zamanı, tek doz aşı için de aynı kabul edilmiştir. Ayrıca tek doz aşı uygulanan bireyler için hastanelik olma ve ölüm olasılıkları ile ilgili araştırmalara ulaşılamadığından, çift doz için kabul edilen veriler kullanılmıştır. Son olarak, model ile ilgili, kişilerin birbirleriyle etkileşime geçtiği yerler olarak sadece ev, okul ve işyerinin düşünülmesi, hastalık geçiş olasılığının yaşa, kronik hastalığa ve başka faktörlere bakılmadan her birey için eşit kabul edilmesi gibi varsayımlar yapılmıştır. Gelecek çalışmalarda dağıtılacak aşılarda, kişilerin yaşına, kronik hastalığına, mesleğine göre, vaka sayılarını minimuma indirecek şekilde optimize edilmesini içeren çözüm yöntemleri geliştirilebilir.

Referanslar

BBC News, "One Covid vaccine cuts infection rate in all age groups", BBC News, 23 Nisan 2021, Available: <https://www.bbc.com/news/health-56844220>, [Accessed: 2 Eylül 2021].

- Calvó-Armengol A. and Jackson M. O. (2007). Networks in labor markets: Wage and employment dynamics and inequality, *J. Econ. Theory*, 132(1), 27–46. Doi.org/10.1016/j.jet.2005.07.007
- Carey Goldberg, "COVID-19 survivors may need just one shot of a two-dose vaccine", *The Japan Times*, 18 Nisan 2021, Available: <https://www.japantimes.co.jp/news/2021/04/18/world/coronavirus-vaccine-doses/>, [Accessed: 2 Eylül 2021].
- Catherine Schuster-Bruce, "How much protection you get from one shot of the Pfizer, AstraZeneca, and Moderna vaccines, according to the best available data", *Insider*, 9 Temmuz 2021, <https://www.businessinsider.com/covid-vaccine-one-shot-effectiveness-pfizer-moderna-astrazeneca-vaccines-dose-2021-3>, [Accessed: 2 Eylül 2021].
- Cedars Sinai, "COVID-19 Survivors Might Need Just One Dose of Two-Part Vaccine", *Cedars Sinai*, 1 Nisan 2021, Available: <https://www.cedars-sinai.org/newsroom/covid-19-survivors-might-need-just-one-dose-of-two-part-vaccine/>, [Accessed: 2 Eylül 2021].
- Chaney T. (2014). The network structure of international trade, *Am. Econ. Rev.*, 104(11), 3600–3634. DOI: 10.1257/aer.104.11.3600
- Chao, D.L., Halloran, M.E., Obenchain, V.J. and Longini Jr, I.M., (2010). FluTE, a publicly available stochastic influenza epidemic simulation model. *PLoS computational biology*, 6(1), 1–8. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1000656
- Craig B. R., Phelan T., Siedlarek J. P., and Steinberg J. (2020). Improving Epidemic Modeling with Networks, *Econ. Comment. (Federal Reserv. Bank Cleveland)*, 1–8. DOI: 10.26509/frbc-ec-202023
- Demirbilek M. (2020). YAYsim: Salgın Modelleme ve Karar Destek Sistemi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilim. Dergisi*, 7(1), 104–112. DOI: 10.35193/bseufbd.675734
- Demirbilek, M. (2021). The Effect of School/Workplace Closures on COVID-19 Related Incidents. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (23), 62-69. Doi.org/10.31590/ejosat.842793
- Demirbilek, M. (2021). Tam ve Kısmi Kapanma Stratejilerinin COVID-19 Salgını Üzerinden Karşılaştırılması. *El-Cezeri*, 8 (2) , 1024-1034, DOI: 10.31202/ecjse.909927.
- Elliott M., Golub B., and Jackson M. O. (2014). Financial networks and contagion, *American Economic Review*, 104(10), 3115–3153. DOI: 10.1257/aer.104.10.3115
- Grefenstette, J.J., Brown, S.T., Rosenfeld, R., DePasse, J., Stone, N.T., Cooley, P.C., Wheaton, W.D., Fyshe, A., Galloway, D.D., Sriram, A. and Guclu, H., (2013). FRED (A Framework for Reconstructing Epidemic Dynamics): an open-source software system for modeling infectious diseases and control strategies using census-based populations. *BMC public health*, 13 (1), 940. DOI: 10.1186/1471-2458-13-940
- Hethcote, H.W. (2000). The mathematics of infectious diseases, *SIAM review*, 42(4), 599-653. Doi.org/10.1137/S0036144500371907
- Hladish, T., Melamud, E., Barrera, L.A., Galvani, A. and Meyers, L.A., (2012). EpiFire: An open source C++ library and application for contact network epidemiology. *BMC bioinformatics*, 13(1), 76. DOI: 10.1186/1471-2105-13-76
- Joydeep Bose, "Covid-19 vaccine: One dose isn't enough. Govt explains why you need both", *India News*, 16 Nisan 2021, Available: <https://www.hindustantimes.com/india-news/covid19-vaccine-one-dose-isn-t-enough-govt-explains-why-you-need-both-101618552568387.html>, [Accessed: 2 Eylül 2021].
- Lindsey Dawson, "What Does a Multi-Dose Series Mean for the COVID-19 Vaccination Effort?", *KFF*, 5 Şubat 2021, <https://www.kff.org/coronavirus-covid-19/issue-brief/what-does-a-multi-dose-series-mean-for-the-covid-19-vaccination-effort/>, [Accessed: 2 Eylül 2021].
- Liu, S., Poccia, S., Candan, K.S., Chowell, G. and Sapino, M.L., (2016). epiDMS: data management and analytics for decision-making from epidemic spread simulation ensembles. *The Journal of infectious diseases*, 214, 427-432. DOI:10.1093/infdis/jiw305
- Mary Van Beusekom, "Real-world trial of Pfizer COVID vaccine finds high 2-dose, good 1-dose protection", *CIDRAP*, 24 Şubat 2021, <https://www.cidrap.umn.edu/news-perspective/2021/02/real-world-trial-pfizer-covid-vaccine-finds-high-2-dose-good-1-dose>, [Accessed: 2 Eylül 2021].
- Medlock, J. and Galvani, A.P. (2009). Optimizing influenza vaccine distribution, *Science*, 325(5948), 1705-1708. DOI: 10.1126/science.1175570
- Oluwatosin Goje, "Why It's Important to Get Your Second COVID-19 Vaccine Dose", *Cleveland Clinic*, 4 Mayıs 2021, <https://health.clevelandclinic.org/why-its-important-to-get-your-second-covid-19-vaccine-dose/>, [Accessed: 2 Eylül 2021].

Ramírez-Ramírez, L.L., Gel, Y.R., Thompson, M., de Villa, E. and McPherson, M., (2013). A new surveillance and spatio-temporal visualization tool SIMID: SIMulation of Infectious Diseases using random networks and GIS. *Computer methods and programs in biomedicine*, 110(3), 455-470. DOI: 10.1016/j.cmpb.2013.01.007

Siegrist, C. A. (2008). Vaccine immunology. *Vaccines*, 5(1), 17-36.

Worldometers.info, "COVID19 Statistics", Worldometers, 24 Mayıs 2021, Available: <https://www.worldometers.info/coronavirus/>, [Accessed: 24 Mayıs 2021].

WHO, <https://covid19.who.int/>, 24 Mayıs 2021.

Zaria Gorvett, "How effective is a single vaccine dose against Covid-19?", BBC Future, 15 Ocak 2021, Available: <https://www.bbc.com/future/article/20210114-covid-19-how-effective-is-a-single-vaccine-dose>, [Accessed: 2 Eylül 2021].

Zaric, G.S. and Brandeau, M.L. (2001). Resource allocation for epidemic control over short time horizons, *Mathematical Biosciences*, 171(1), 33-58. Doi.org/10.1016/S0025-5564(01)00050-5



Çok Yüksek Hacimde Uçucu Kül İçeren Sentetik ve 5D Çelik Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mühendislik Özellikleri

Engineering Properties of Very High Volume Fly-ash Cementitious Composites Reinforced with Synthetic and 5D Steel Fibers

Oğuzhan Öztürk¹

¹Konya Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya, Türkiye

Başvuru/Received: 23/09/2021

Kabul / Accepted: 19/11/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Çimento esaslı kompozitlerde yüksek hacimlerde kullanılan uçucu küller ekonomik bir tasarımın yanında çeşitli taze ve sertleşmiş özellikleri modifiye etmektedir. Kullanılacak uçucu kül tipine göre değişmekle birlikte, istenen mühendislik özelliklerine göre seçilecek bir karışım tasarımı yüksek oranda uçucu külün kullanımını mümkün kılarak, çimento esaslı kompozitlerin içerisinde matris ile lif arasındaki ilişkiyi değiştirebilir. Bu çalışmada, toplam bağlayıcı ağırlığınca çok yüksek oranda (%80) uçucu kül içeren çimento esaslı kompozitler polyamid lif (PL) ve beş boyutlu çelik liflerle (5D-ÇL) tekli ve hibrit formda geliştirilerek mühendislik özellikleri açısından araştırılmıştır. Bunun yanında, lif donatılı kompozitlerin basınç mukavemetleri 7, 28, 60 ve 90 günlük kür yaşlarında belirlenmiştir. Tekli ve hibrit formda farklı tür lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin mühendislik özellikleri, ilk çatlak gerilmesi ve kırılma noktalarındaki yük ve sehim değerleri, maksimum taşıma kapasitesi, süneklik oranı, rijitlik ve enerji yutma kapasitesi parametreleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar bir arada kullanılan PL ve 5D-ÇL liflerinin tek formda kullanılmalarına göre matris-lif bağ davranışı açısından sinerji meydana getirdiğini ve buna bağlı olarak süneklik, başlangıç rijitlik ve enerji yutma kapasitelerini artırdığını işaret etmektedir. Ayrıca tekil olarak lifler irdelendiğinde, 5D-ÇL'lerin PL liflerine göre mühendislik özelliklerini iyileştirmede daha etkili olduğu düşünülmektedir. Uçucu kül/çimento oranı ağırlıkça 4,0 olan kompozitlerin, erken yaş mekanik özelliklerin belirleyici olmadığı inşaat mühendisliği uygulamalarında ekonomiklik ve yapısal performans açısından sürdürülebilir bir tasarım olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler

“Uçucu kül, sentetik lifler, beş boyutlu çelik lifler, çimento esaslı kompozitler, mühendislik özellikleri”

Abstract

In cement-based mortars, using high volume of fly ash modifies several fresh and hardened properties besides an economical design. Although it varies according to the type of fly ash to be used, mixture design proving high amount of fly ash which is pre-targeted according to engineering properties may modify the relationship between matrix and fibers in the cement-based mortars. In this study, cement-based composites containing a very high percentage of fly ash (80%) by total binder weight were developed with polyamide fiber (PL) and five-dimensional steel fibers (5D-ÇL) in single and hybrid forms and investigated in terms of engineering properties. In addition, compressive strength of fiber reinforced composites were assessed at the curing ages of 7, 28, 60 and 90 days. The engineering properties of cementitious composites reinforced with single and binary use of different fibers were obtained by considering load and displacement values at yield and fracture points, maximum load-carrying capacities, ductility, rigidity and energy dissipation capacity. Results reveal that binary use of PL and 5D-ÇL provided a synergy in terms of matrix-fiber bond behavior compared to their single use thus increasing the ductility, initial rigidity and energy dissipation capacities. In addition, in the case of examining single use of fibers, it was found that 5D-ÇL was more effective than PL fibers for improving the engineering properties. It is considered that composites having fly ash/cement ratio of 4.0 by weight are sustainable in terms of economically and performance in the civil engineering applications where early-age mechanical properties is not significant.

Key Words

“Fly ash, synthetic fibers, five dimensional steel fibers, cementitious composites, engineering properties”

1. Giriş

Farklı tipteki çeşitli lif türleri bu zamana kadar çimento esaslı kompozitlerin çekme bölgesindeki davranışı iyileştirmek için araştırılmıştır (Nawy, 2001; Balaguru & Shah, 1992). Harç veya beton gibi çimento esaslı kompozitlerde lif donatısı, karışımın taze halinden başlamak üzere meydana gelen çekme gerilmelerine karşı koymak amacıyla kullanılmaktadır. Farklı nedenlerle meydana gelen gerilmelerini aşmak için gerekli olan enerji ancak lif matris arasındaki bağ dayanımını aşmakla mümkün olmaktadır (Johnston, 2001). Endüstriyel olarak lif donatılı çimento esaslı malzemelerin kullanım alanları incelendiğinde; kaldırım, püskürtme beton, park alanları, apron, yükleme rampaları, dolu savak, prekast elemanların kullanıldığı tünel inşaatları, zirai yapılar, kanalizasyon elemanları, yol bariyer elemanları, döşemeler, temel ve drenaj elemanları gibi pek çok alan görülmektedir (Kumbhar vd. 2014). Son yıllarda, lif donatılı çimento esaslı kompozitler (LDÇK [fiber-reinforced cementitious composites]) alanında ortaya konulan çalışmalar dayanım ve dayanıklılık açısından yüksek performansla sahip sünek çimento esaslı malzemelerin geliştirdiğini göstermektedir (Li, 2003). Tercih edilen lif tipleri sadece mekanik özellikleri değil aynı zamanda karışımların boyutsal kararlılığını da (örn. büzülme) modifiye etmektedir (Al-Kamyani vd. 2018). Konu ile ilgili başat çalışmalar liflerin meydana getirdiği performansın karışımlar içerisinde en çok dağılımı, türü ve narinlik oranı ile ilgili olduğunu göstermektedir (Mobasher vd. 1990; Betterman vd. 1995; Lawler vd. 2003). Kullanılan lif tipleri ise metalik liflerden; çelik, galvanize demir, alüminyum, mineral liflerden; cam, sentetik liflerden polyester, naylon, polietilen, doğal liflerden; ise bambu, ahşap, selüloz liflerin kullanıldığı görülmektedir (Dehghani & Aslani 2020; Liu, 2018; Öztürk & Roig-Flores, 2021a; Öztürk & Stefanidou, 2021b). Her ne kadar farklı tür mikro veya makro boyutlardaki lif donatıları çatlak tutma davranışı gösterse de, meydana gelen davranış kullanılan tek tip lifin bireysel özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. LDÇK'ler alanında güncel son çalışmalar tek bir lif türünün hacim, narinlik ve diğer karakteristik özelliklerinin etkisinin daha az belirleyici olması için hibrit lif donatılı çimento esaslı kompozitleri (HLDÇK) ele almaktadır (Yoo & Banthia, 2019; Zhang vd. 2021). Hibrit lif donatılandırılması, en az iki adet farklı tür ve özellikteki liflerin karışımların mühendislik özellikleri üzerinde aynı liflerin toplamda aynı hacimde tek tipte meydana getirebileceği ortalama performansı aşmayı amaçlamaktadır. Uygun bir hibrit lif donatısı sonucu ortaya çıkan bu olgunun adı liflerin "sinerjisi" olarak tanımlanmaktadır (Li vd. 2019; Wei vd. 2021). İlave maliyet ve karışım geliştirme zahmeti gerektirmeyen bu tasarımda birtakım yaklaşımlarda bulunmak zaruridir. Bunlar ilk olarak bir lifin daha rijit seçilerek makul bir ilk çatlak ve nihai dayanım sağlanması, diğer lifin ise görece daha sünek ve post-kırılma bölgesinde şekil değiştirme sağlayabilmesidir. İkinci olarak ise bir lif türünün belirgin olarak daha düşük boyutlarda tercih edilerek mikro çatlakları köprülemesidir. Buna bağlı olarak farklı çatlakların birleşmesinin geciktirilmesi daha büyük boyutlu diğer lifin makro çatlakları bir arada tutarak kırılma tokluğunu iyileştirmesi de beklenebilir. Son olarak, bir lif türü taze ve erken yaş özelliklerini düzenlerken (üretileme kolaylığı ve plastik büzülme), diğer lif türü ileri mekanik özelliklerin düzenlenmesi ile ilgili kriterlere göre seçilebilir.

Hibrit lif kullanımının yanında, iyileştirmek istenen mühendislik özellikleri (ilk çatlak gerilmesi ve kırılma noktalarındaki yük ve deplasman değerleri, maksimum taşıma kapasitesi, süneklik, rijitlik ve enerji yutma kapasitesi) tercih edilen diğer karışım kompozisyonları ile de yakından ilişkilidir. Örneğin yüksek hacimlerde kullanılan çeşitli mineral katkıları tamamen Portland çimentosu (PÇ) içeren sistemlere göre lif-matris arasındaki bağ dayanımını daha yüksek şekil değiştirme kapasitesi sağlayacak şekilde iyileştirmektedir. Bu durum özellikle yüksek hacimlerde kullanılması durumunda F-sınıfı uçucu küller (düşük CaO içeren) içeren karışımlarda rapor edilmiştir (Wang & Li 2007). Karışım bünyesinde hidrate olmamış halde bulunan uçucu küller, lif donatılı karışımlarda lif-matris arasındaki kimyasal bağ dayanımını düşürmekte ve matris tokluğunu aşağıya çekmektedir. Öte yandan uçucu küller azalan kimyasal bağ dayanımına karşılık lif-matris arasındaki sürtünme kuvvetini artırarak daha yüksek bir çekme şekil değiştirmesi elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Ancak, F sınıfı uçucu küller çok daha yüksek oranlarda kullanıldığında (toplam bağlayıcı ağırlığınca 50%'den fazla) düşük CaO içeriği ile puzolanik kapasitesi C sınıfı uçucu küllere göre daha yavaş olmakta ve erken yaş dayanım problemleri ile karşılaşmaktadır. Ancak bu noktada mineral katkı tipinin yanında incelik derecesinin de çok etkili olduğu belirtilmelidir. Özellikle toplam bağlayıcı miktarınca %80'e kadar F-sınıfı uçucu kül kullanıldığı karışımlarda yeterli basınç dayanımını (>25 MPa [TBDY, 2019]) sağlamak 28 günün çok ötesinde uzun kür süreleri (180 güne varan) gerektirmektedir (Hannesson vd. 2012). F sınıfı uçucu külün lif donatılı çimento esaslı sistemlerde avantaj sağladığı lif ile matris arası artan içsel sürtünme davranışını koruyarak yeterli mekanik özellikleri optimize etmek daha fazla hacimde uçucu kül kullanımını mümkün kılabilir. Bu durum daha ekonomik ve çevresel etkileri düşük bir karışım tasarımı sağlarken aynı zamanda yüksek şekil değiştirme kapasitesi korunabilir. C-sınıfı uçucu küller daha yüksek CaO içeriğine sahip olması nedeniyle aynı oranda F sınıfı uçucu kül kullanımına göre lif donatılı sistemlerde daha düşük sünekliğe neden olacağı beklenebilir. Ancak, C-sınıfı uçucu küllerin çok daha fazla hacimde kullanılması, F sınıfı uçucu küllerdeki puzolan olarak yer alan içeriklerin de ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) aynı anda daha fazla yer almasına neden olacağından benzer bir lif-matris ilişkisi için uçucu kül kullanım oranı çok daha üst hacimlere çıkarılabilir (Liu vd. 2018).

Bu çalışmanın amacı, ekonomik ve çevre dostu bir tasarımın yanında, süneklik ve şekil değiştirme kapasitesini iyileştirmek için bütün karışımlarda tercih edilen sabit bir yüksek hacimdeki uçucu kül varlığında, hibrit lif donatılandırılması ile sürdürülebilir, ekonomik ve ileri mühendislik özelliklerine sahip yeni nesil çimento esaslı kompozitler geliştirmektedir. Bu amaçla, çok yüksek hacimde uçucu kül kullanılarak (uçucu kül/çimento oranı ağırlıkça 4.0 [toplam bağlayıcı ağırlığınca %80]) bütün karışımlarda düşük yoğunlukta tekli ve hibrit lif donatısı ile çimento esaslı kompozitlerin mühendislik özellikleri açısından kritik performansları (ilk çatlak gerilmesi ve kırılma noktalarındaki yük ve deplasman değerleri, maksimum taşıma kapasitesi, süneklik, rijitlik ve enerji yutma kapasitesi) ele alınmıştır. Araştırmada, lif türü olarak polyamid (PL) ve beş boyutlu çelik lif (5D-ÇL) donatıları kullanılmıştır. Bütün karışımların yüksek oranda uçucu kül içermesi nedeniyle erken ve nihai yaştaki mekanik özellikleri bu tip kompozitlerin kullanılabilirliği açısından belirleyici olmaktadır. Bu nedenle bütün karışımların 7, 28, 60 ve 90 günlük yaşlardaki basınç dayanımları da ayrıca dikkate alınmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Malzemeler

Karışımlarda EN 197-1 standardına göre uyumlu sıradan Portland çimentosu (PÇ) CEM I 42.5R kullanılmıştır. C-sınıfı uçucu küller (C-UK) toplam bağlayıcı ağırlığının %80'i oranında kullanılmış olup PÇ ve C-UK'ya ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Karışımlarda maksimum tane boyut dağılımı 500 µm olan silis kumu kullanılmıştır. Araştırmada ince agrega tane boyutu karışımlarda daha sünek performans elde edilmesi amacıyla sınırlandırılmıştır. Bilindiği üzere lifler arası boşluk mesafesi agrega ortalama tane boyutundan büyük olduğu durumlarda liflerin matris içerisinde topaklanma derecesi artmaktadır. Bu nedenle homojen dağılmama riski olan liflerin sünek bir tasarım için gereken çatlak köprüleme performansları azalmaktadır. Kullanılan silis kumuna ait elek analiz dağılımı Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Portland çimentosu (PÇ), C sınıfı uçucu külün (C-UK) ve silis kumunun özellikleri

Kimyasal içerik, %	PÇ	C-UK	Silis kumu
SiO ₂	20.8	35.5	98.86
Al ₂ O ₃	5.45	12.95	0.24
Fe ₂ O ₃	3.25	11.78	0.15
MgO	2.42	2.33	0.10
CaO	61.6	17.76	0.01
Na ₂ O	0.19	0.15	0.02
K ₂ O	0.77	1.44	0.03
Kızdırma kaybı	2.20	2.84	0.07
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	29.7	60.23	99.25
Fiziksel özellikler			
Özgül ağırlık	3.06	2.40	2.60

Tablo 2. Silis kumunun tane dağılımı

Elek çapı	500-710 µm	355-500 µm	250-355 µm	180-250 µm	0-180 µm
Geçen (%)	0.08	0.28	2.53	31.08	99.67

Karışımlar yoğun olarak ince taneli kuru malzemeler (PÇ+C-UK+ince silis kumu) ve farklı lifler içermektedir. Bu nedenle, her karışım tipi için yeterli bir akıcı yayılma sağlamak ve taze karışımların yayılma özelliklerini modifiye etmek amacıyla polikarboksilik-eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Polyamid lif (PL) ve beş boyutlu çelik liflerin (5D-ÇL) özgül ağırlıkları sırasıyla 1,14 ve 7,80'dir. PL'lerin uzunlukları 12 mm, 550 µm çapında ve nominal çekme dayanımı 900 MPa'dır. İki ucu kanca 5D-ÇL ise 39 narinlik oranına sahip olup nominal çekme dayanımı 2300 MPa'dır. Karışımlarda kullanılan PL ve 5D-ÇL liflerin görüntüsü Şekil 1'de verilmiş olup liflere ait özellikler Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. PL ve 5D-ÇL'lerin özellikleri

Özellikler	PL	5D-ÇL
Narinlik oranı	308	39
Çap	550 (µm)	0.9 (mm)
Nominal çekme dayanımı	900 MPa	2300 MPa
Özgül ağırlık	1.14	7.80



Şekil 1. Tekil ve hibrit lif donatılı çimento esaslı kompozitlerde kullanılan farklı tür ve özellikte PL (solda) ve 5D-ÇL'ler (sağda)

2.2. Karışım Oranları ve Üretimi

Hibrit lif donatılı çimento esaslı kompozit (HLDÇK) karışımlarına ait içerikler Tablo 4'te verilmiştir. Deneyle daha önce bahsedildiği üzere hibrit lif donatılı kirişler üretmek amacıyla PL ve 5D-ÇL birlikte kullanılmıştır. Aynı zamanda karşılaştırma yapmak amacıyla tekil olarak PL ve 5D-ÇL'in yer aldığı karışımlar da üretilmiştir (Tablo 4). Yüksek oranda kullanılan C-sınıfı uçucu kül miktarı (toplam bağlayıcı ağırlığının %80'i) çalışmanın ana amacı olan kompozitlerin hibrit ve tekil lif etkisindeki davranışını belirlemek için sabit tutulmuştur. Karışımlarda kum/toplam bağlayıcı (Kum/TB) oranı 0,46'dır. Aynı şekilde bütün karışımlarda su (S) /toplam bağlayıcı miktarı (PÇ+C-UK) oranı (S/TB) 0,37 olarak sabit tutulmuştur. Toplam uçucu kül ağırlığı/Portland çimentosu oranı (C-UK/PÇ) ise 4,0'dır.

Karışımların üretimi sırasında, ilk olarak Portland çimentosu (PÇ), C sınıfı uçucu kül (C-UK) ve kum ile kuru karışım iki dakika boyunca dakikada 60 çevrim olacak şekilde (60 rpm) çimento harç mikserinde yapılmıştır. Ardından karışım suyu ve toplam kullanılan yüksek oranda su azaltıcı katkının (YOSAK) yarısı ilave edilmiş ve üç dakika boyunca aynı şekilde 60 rpm'de karışım sürdürülmüştür. Ardından PL ve/veya 5D-ÇL devam eden karışımlara eklenmiştir. Liflerin karışımlara eklenmesinin ardından YOSAK'ın diğer yarısı ilave edilmiş ve karışım 120 rpm'de ilave beş dakika boyunca devam ettirilmiştir. Küp ve kiriş kalıpları için toplamda 80,1 litre olmak üzere üç farklı karışımda üretim yapılmıştır. Hazırlanan taze karışımlar ardından $360 \times 75 \times 50$ mm (uzunluk \times yükseklik \times genişlik) kiriş ve bir boyutu 100 mm olan küp kalıplara dökülmüştür. Kalıplara alınan taze karışımların üstü plastik örtülerle kapatılmış ve laboratuvar şartlarında ortam kürrü $50 \pm 5\%$ bağıl nem ve $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de beş gün süresince uygulanmıştır. Üretilen harçların kalıplarda beş gün boyunca bekletilme nedeni bütün karışımların yüksek hacimde uçucu kül içermesi (%80) nedeniyle kalıp alma süresinin genel yaklaşımlara kıyasla (1-2 gün) daha uzun olmasıdır. Kalıplardan alınan numuneler ardından test edileceği farklı kür yaşlarına kadar suda kür edilmiştir.

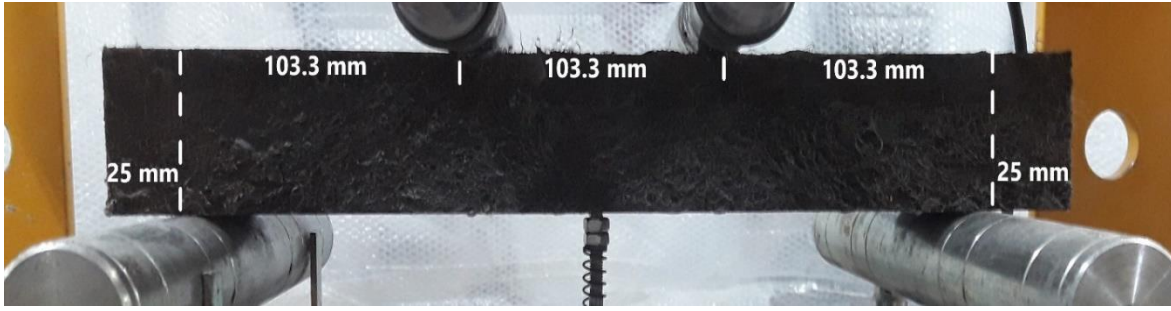
Tablo 4. Yüksek oranda uçucu kül içeren tekil ve hibrit lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin karışım miktarı ve oranları

Karışım Adı	PÇ ¹	C-UK ¹	Kum ¹	Su ¹	5D-ÇL ¹	PL ¹	YOSAK ¹	Kum/TB ²	C-UK/PÇ ²	S/TB ²
PL/DÇK	218	866	500	400	-	13	40	0,46	4,0	0,37
HBL/DÇK	218	866	500	400	36	6,5	40	0,46	4,0	0,37
5DÇL/DÇK	218	866	500	400	72	-	40	0,46	4,0	0,37

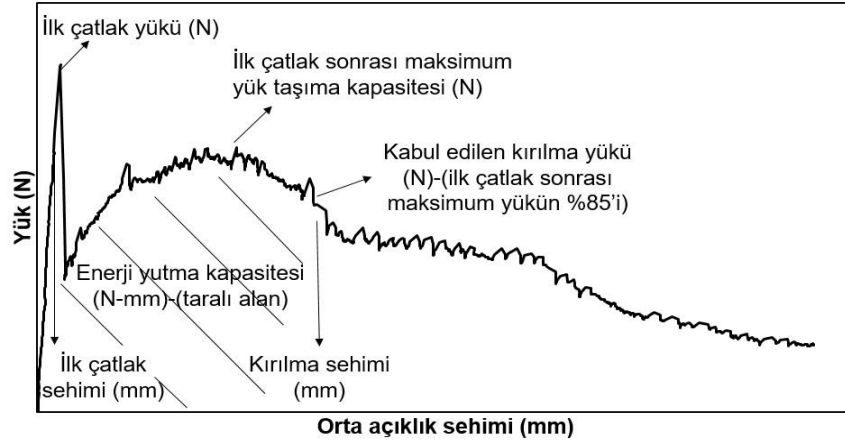
¹kg/m³; ²ağırlıkça oran

2.3. Deneysel Program

Üç farklı karışıma ait küp numunelerin basınç dayanımları 7, 28, 60 ve 90 günlük kür yaşlarında belirlenmiştir. Her bir karışımdan altı adet numune ilgili kür yaşlarında basınç deney presi altında 1,0 kN/s. hızda test edilmiştir. 28 günlük $360 \times 75 \times 50$ mm (uzunluk \times yükseklik \times genişlik) boyutlarındaki kiriş numuneler ise her karışımdan ikişer adet olmak üzere dört noktalı eğilme deneyi altında test edilmiştir. Yükleme hızı 0.05 kN/s. hızda yapılmıştır. Dört noktalı eğilme deneyinde kiriş numuneler alt mesnetlere numune kenarlarından 25 mm mesafede olup üst mesnetler ise orta açıklık eşit aralıklı üç parçada ($L/3=100,3$ mm) olacak şekilde düzenlenmiştir (Şekil 2). Yük verileri (N) maksimum 30 ton kapasiteli yük hücresi tarafından 0,001 N hassasiyetinde kaydedilirken orta açıklık sehimi (mm) ise doğrusal değişken diferansiyel transformatör (LVDT) aracılığıyla 0,0001 mm hassasiyetinde kaydedilmiştir. Bu verilerden yararlanılarak kiriş numunelerin yük-orta açıklık sehim grafikleri elde edilmiş ve yüksek hacimde uçucu kül içeren farklı tür liflerle donatılmış kiriş numunelerinin mühendislik özellikleri irdelenmiştir. Geliştirilen lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin mühendislik özelliklerine dair parametreler ilk çatlak gerilmesi ve kırılma anındaki yük ve sehim performansları, süneklik oranı, rijitlik ve enerji yutma kapasitesi olarak belirlenmiştir. Kiriş numunelerinin ilk çatlak gerilmesi noktaları (yük [N] ve sehim [mm]), yük-orta açıklık sehim eğrisinde ilk çatlağın meydana geldiği ve eğrinin doğrusallığının bozulduğu nokta olarak belirlenmiştir. Rijitlik değerleri ise ilk çatlak gerilme bölgesine kadar meydana gelen ve elastik olduğu varsayılan yük-orta açıklık sehim eğrisi dikkate alınarak belirlenmiştir (N/mm). Bu aşamadan sonra meydana gelen sehime karşılık yük taşıma kapasitesinin azalması ve ardından kirişlerin tekrar artan yük altında sehim yapmaya devam etmesi (şekil değiştirme sertleşmesi) sırasında süneklik ve maksimum enerji yutma kapasiteleri belirlenmiştir. Kiriş numunelerinin ilk çatlak gerilme noktasından sonra şekil değiştirme sertleşmesi gösterdiği maksimum yükün %85'ine karşılık gelen nokta kırılma noktası olarak belirlenmiştir (Öztürk, 2021). Süneklik oranları her bir kiriş için kırılma noktasındaki sehim kapasitesinin (mm) ilk çatlak gerilme noktasındaki sehim kapasitesine (mm) oranı olarak dikkate alınmıştır. Enerji yutma kapasitesi ise yük başlangıcından kırılma noktası olarak belirlenen yere kadar dikkate alınan yük-orta açıklık sehim eğrisinin altında kalan alanın tamamı olarak hesap edilmiştir. Bu değerlendirmelerde ASTM C1609 (Lif donatılı betonların eğilme performansı için test yöntemi) dikkate alınmıştır. Söz konusu parametreler Şekil 3'te ayrıca sunulmuştur.



Şekil 2. Tekil ve hibrit lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin dört noktalı eğilme deneyi



Şekil 3. Lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin tipik yük (N) - orta açıklık sehimi (mm) eğrisi ve hesap parametreleri

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Karışımların Basınç Mukavemetleri

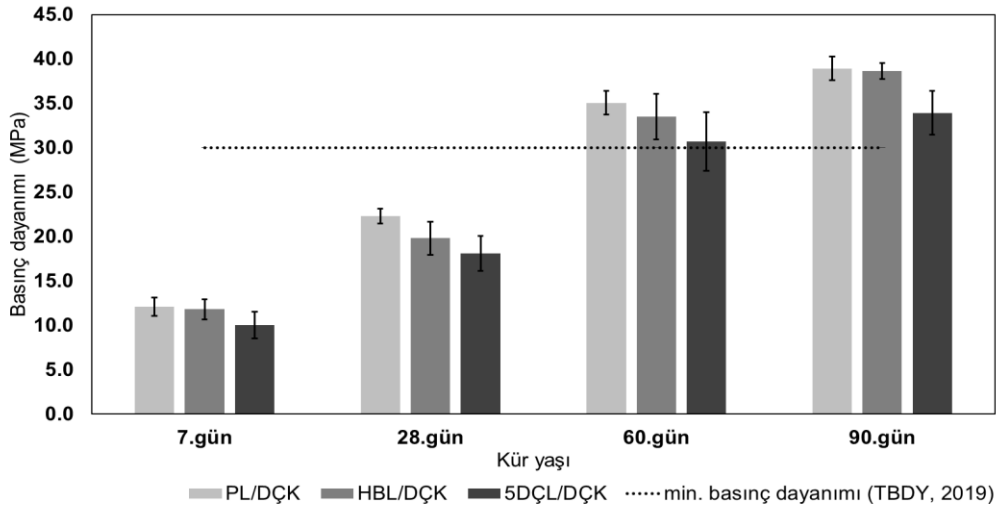
Tekil ve hibrit halde liflerle donatılmış ve yüksek hacimde uçucu kül içeren çimento esaslı kompozitlerin basınç mukavemetleri Şekil 4'te sunulmuştur. Şekil 4'te görüleceği üzere, PL/DÇK, HBL/DÇK ve 5DL/DÇK karışımlarına ait altışar numunenin ortalama basınç dayanımları 7. Gün sonunda sırasıyla 12,1, 11,8 ve 10,0 MPa olarak kaydedilmiştir. Aynı şekilde ilerleyen kür yaşlarında PL/DÇK karışımı için 28, 60 ve 90 günlük ortalama basınç dayanımları 22,3 35,1 ve 38,9 MPa elde edilmiştir. HBL/DÇK ve 5DL/DÇK karışımları için ise sırasıyla aynı kür yaşlarında 19,8, 33,5 38,6 MPa ve 18,1 30,7, 33,9 MPa olarak ortalama basınç mukavemet değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlarda, geleneksel hazır betonların 7 günlük kür yaşlarına kıyasla elde edilen basınç dayanım gelişimleri düşük olarak yorumlanabilir. Aynı şekilde bütün karışımların 28 günlük ortalama basınç mukavemetleri değerlendirildiğinde, PL/DÇK, HBL/DÇK ve 5DL/DÇK karışımları için elde edilen ortalama basınç mukavemetlerinin (sırasıyla 22,3, 19,8 18,1 MPa) Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY, 2019) beton küp numuneler için verilen 28 günlük basınç mukavemeti şartının (<30 MPa) altında olduğu görülmektedir (Şekil 4). Ancak ilerleyen kür yaşlarında (60 gün) tekil veya hibrit lif donatılı çok yüksek hacimde uçucu kül (C-UK/PÇ: 4,0) içeren harçların tamamının ortalama 30 MPa'dan daha yüksek bir basınç dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Aynı şekilde 90 günlük numunelere bakıldığında PL/DÇK, HBL/DÇK ve 5DL/DÇK karışımlarının teorik olarak kabul edilen minimum yapısal beton basınç mukavemet değerinden (30 MPa, [TBDY, 2019]) sırasıyla %29,6 %28,7 ve %13 daha yüksek olduğu görülecektir (Şekil 4).

Elde edilen sonuçlarda özellikle erken yaş dayanımların geleneksel betonların 7 günlük yaşlardaki basınç mukavemetlerine kıyasla düşük olması beklenen bir durum olarak değerlendirilmektedir. Bu durumun nedeni karışımlarda yoğun bir şekilde kullanılan (%80 oranında) uçucu küllerle ilişkilendirilebilir. Her ne kadar uçucu kül inceliği, morfolojisi ve hidrolik bağlayıcılık yeteneği (CaO içeriği) erken yaşlardaki hidratasyon kazanma hızına etki etse de, özellikle bağlayıcı olarak PÇ ile %50'den daha fazla bir yer değiştirme oranında kullanıldığında genellikle uçucu küller en az 7 günden sonra hidratasyon derecesini arttırmaktadır (Moon vd. 2016). Bu durum bütün kür yaşları incelendiğinde özellikle 7 ile 28 gün arasında meydana gelen artış oranlarında daha belirgin olarak görülmektedir. Örneğin PL/DÇK, HBL/DÇK ve 5DL/DÇK karışımları için 28. Gündeki basınç dayanımı, 7 günlük basınç dayanımlarından sırasıyla %84,3, %67,8 ve %81 daha büyüktür. Her ne kadar 60 günlük numuneler 28 günlük numunelerle, 90 günlük numuneler ise 60 günlük numunelerle karşılaştırıldığında açıkça görülen bir artıştan söz edilse de basınç mukavemetinin yönelimindeki artış hızı azalarak devam etmiştir. Karışımların erken yaşlarda göstermiş oldukları düşük basınç dayanımı gelişimleri uçucu küllerin genel olarak puzolanik reaksiyon kapasitesinin yavaş olması ile ilgilidir. Bu durum özellikle her üç karışımında yüksek oranda uçucu kül içermesi durumunda

çok daha belirgin hale gelmiştir. Bu çalışmanın ana amacı, tekil ve hibrit liflerin çimento esaslı kompozitlerdeki mühendislik özelliklerine etkisini irdelemek olduğundan, uçucu küller yüksek oranda ancak tek seviyede (C-UK/PÇ: 4,0) kullanılmıştır. Bu nedenle erken yaşlardaki basınç mukavemetlerinde uçucu kül muhtevası etkisi farklı dozajlarda sınanarak özellikle 28.gündeki basınç mukavemet değerleri istenen seviyelere (>30 MPa) çıkarılabilir. Bunun yanında %80 uçucu kül muhtevası korunarak agrega tane paketlenme (Sunayana & Barai 2017) tasarımı, mikronize kalsit (Demirel & Demirhan, 2021) veya nano silis (Öztürk vd. 2020) gibi katkılarla yoluyla da hidrasyon derecesi hızlandırılabilir.

Uçucu küller ile ilgili olarak CaO içeriğinden bağımsız olarak yapılan genel kanılar, her ne kadar erken yaşta puzolanik olarak hidrasyon derecesini üzerinde az etkisi olsa da PÇ'ye göre genellikle daha ince taneli olmasından dolayı dolgu ve çekirdeklenme etkisi ile ilgilidir (Lawrence vd. 2003; Rahhal & Talero 2005). Ancak bu çalışmada, her ne kadar çalışmanın ana amacı gereği karşılaştırmalı olarak farklı dozajlarda uçucu küller araştırılmasa da, söz konusu incelik etkisine bağlı erken yaşlarda (7.gün) olumlu bir hidrasyon derecesi artışının meydana gelmediği söylenebilir. Bu durumun temel nedeni Çoban Yıldızı Termik Santralinden (Konya) temin edilen C-sınıfı uçucu külün (%17,76-CaO) incelik derecesinin çalışmada kullanılan Portland Çimentosundan dahi (325 m²/kg) iri olması ile ilişkilendirilebilir. Öte yandan, Türkiye genelinde çeşitli F veya C sınıfı uçucu küllere bakıldığında, bu çalışmada kullanılan uçucu küllerin aksine, daha ince taneli uçucu kül tiplerinde de mevcut karışımlar ileriye dönük olarak tekrar sınanabilir. Örneğin, Orhaneli Termik Santralinden (Bursa) elde edilen F sınıfı, (>400 m²/kg), Kangal Termik Santralinden (Sivas) elde edilen C sınıfı (>330 m²/kg) veya Tunçbilek Termik Santralinden (Kütahya) elde edilen F sınıfı uçucu küller (>370 m²/kg) mevcut karışımlara dolgu ve çekirdeklenme etkisi açısından daha fazla avantaj sunabilir. Bununla birlikte %80 oranında uçucu kül muhtevasına sahip bir harç karışımının bu çalışmada test edilen en geç kür yaşı olan 90 günün de ötesinde basınç dayanımı gelişimi gösterebileceği düşünülmektedir. Örneğin Hannesson vd. (2012) araştırmasında toplam bağlayıcı hacminin %80'i oranında C sınıfı uçucu küllerin kullanıldığı karışımlarda kontrol karışımlarına kıyasla (%100 PÇ içeren) aynı basınç mukavemetinin elde edilmesinin 168 gün sürdüğünü rapor edilmiştir. Benzer şekilde inşaat mühendisliği alanındaki çeşitli altyapı uygulamalarının ihtiyaçlarına bağlı olarak kalıp alma süresi ve hizmete açılacağı gün gibi kriterler dikkate alınması şartıyla, yoğun uçucu kül kullanımının harç ve betonlarda daha önce bahsedildiği üzere mekanik, dürabilite ve ekonomik bir tasarım açısından uzun dönemde çok çeşitli avantajlar sunacağı düşünülmektedir. Öte yandan, mevcut çalışma yoğun uçucu kül içeren karışımların erken yaş dayanımını 7.Gündeki basınç mukavemet değerlerini dikkate alarak değerlendirmiştir. Ancak bilinmektedir ki, yavaş gelişen hidrasyon derecesi mekanik etkiden daha çok özellikle çok daha erken yaşlarda değişen çevresel koşullar altında daha kritik bir hal alabilir. Örneğin geleneksel betonun priz süresinin tamamlanması sırasında yaklaşık olarak 0.7 MPa basınç dayanımının belirtildiği durumlarda (Mehta, 2005), %80 uçucu kül içeren sistemler için priz süresinin tamamlanmasının çok daha uzun olacağı açıktır. Bu nedenle bu tip karışımlar için uzun bakım ve kür gerektiren durumlarda, özellikle donma/çözünme olaylarının etkisindeki matriste suyun donması durumunda hidrasyonun bir daha devam etmemesi ya da düzensiz hidrasyon gelişimleri riski oluşabileceğinden daha dikkatli bir kür ve korumanın zaruri olduğu belirtilmelidir.

Şekil 4'te verilen sonuçlara göre, tekil ve hibrit lif içeren karışımların basınç dayanımına etkileri de ayrıca irdelenebilir. Örneğin, deney sonuçlarından elde edilen verilerin tamamında görüleceği üzere, her bir kür yaşında en yüksek basınç mukavemeti PL/DÇK karışımı ile elde edilmiş olup daha sonra bu karışımı sırasıyla HBL/DÇK ve 5DL/DÇK numuneleri takip etmiştir. Her ne kadar karışımların ortalama basınç mukavemet değerlerinde belirgin bir farklılık izlenmese de, genel olarak bütün kür yaşlarında makro tipte (5D-ÇL) çelik lifin kullanıldığı durumlarda, mikro tipteki (PL) liflere göre basınç mukavemetlerinde azalış meydana geldiğinden bahsedilebilir. Bu durum özellikle daha yüksek oranda 5D-ÇL'in kullanıldığı (%1) 5DL/DÇK karışımı ile daha düşük 5D-ÇL'in kullanıldığı (%0,5) HBL/DÇK karışımları arasında dahi izlenebilir (Şekil 4). Elde edilen bu sonuçlar makro liflerin üniform ve eksenel olarak etkileyen basınç yükleri altında meydana getirdiği daha yüksek oranda bozulan çelik lif-matris ara yüzü ile ilgili olabilir. Elde edilen bulgulara literatürde makro liflerin basınç dayanımına etkisi ile ilgili çalışmalarda da rastlanmaktadır (Şahmaran & Yaman, 2007; Öztürk vd. 2021). Bunun yanında Zheng et al. (2018) çalışmalarında düşük-orta dayanımlı betonlardan ziyade yüksek dayanımlı betonlarda çelik liflerin daha olumlu etkisi olduğunu rapor etmişlerdir. Bu çalışmadaki karışımların ortalama basınç dayanımları 7 ve 28 günlük yaşlarda görece daha düşük (<30 MPa) dayanımda, 60 ve 90 günlük yaşlarda ise orta dayanımlı basınç mukavemeti sergilediğinden (>30 MPa) farklı lif tip ve dozajındaki karışımlar ayrıca daha yüksek dayanımlı betonlarda irdelenebilir. Ancak basınç mukavemet değerleri karşılaştırılırken, TBDY 2019'da kıyas edilen dayanım değerlerinin 150 mm'lik küp numuneler için geçerli olduğu ve bu çalışmadaki basınç testlerinin bir boyutu 100 mm olan küp numunelerle yapıldığı da dikkate alınmalıdır.

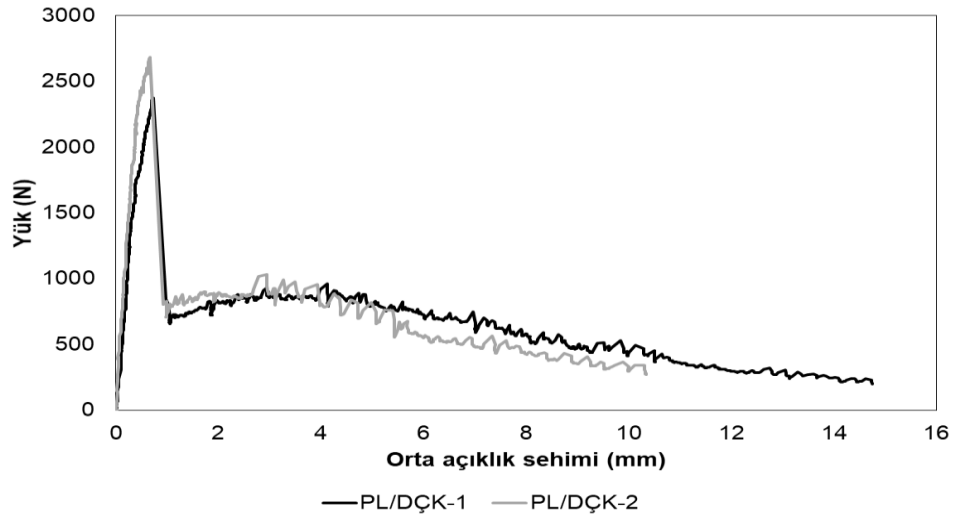


Şekil 4. Tekil ve hibrit lif donatılı yüksek hacimde uçucu kül içeren çimento esaslı kompozitlerin farklı kür sürelerindeki ortalama basınç mukavemetleri

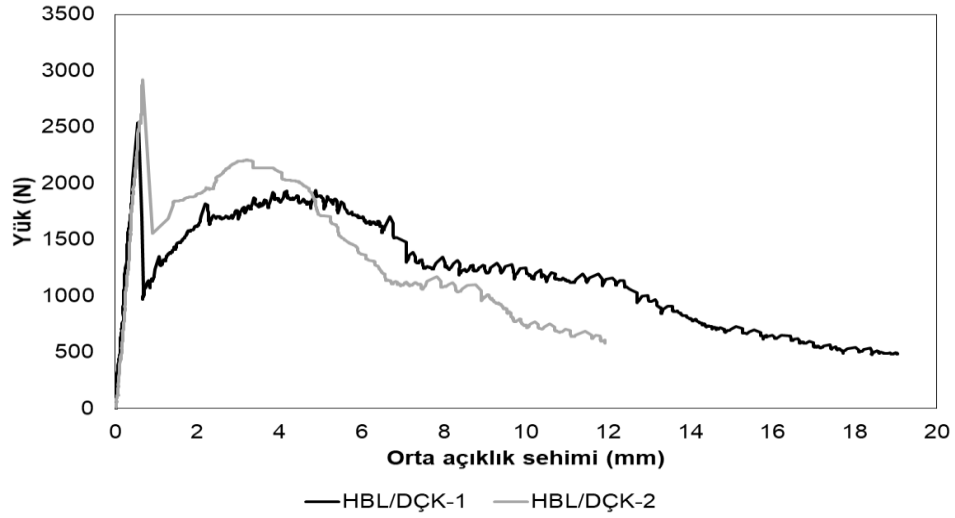
3.2. Tekil ve Hibrit Lif Donatılı Kirişlerin Mühendislik Özellikleri

Farklı tür liflerle tekil ve hibrit olarak üretilen kiriş numunelerin 4 noktalı eğilme yükleri altında meydana gelen yük (N) ve orta açıklık sehimi (mm) grafikleri Şekil 5.a-c’de verilmiştir. Her bir karışıma ait numunelerin yük (N) ve orta açıklık (mm) grafiklerinden belirlenen çeşitli mühendislik özellikleri ayrıca Tablo 5’te detaylı olarak sunulmuştur. Öncelikle kirişlerin yük-orta açıklık grafikleri genel olarak incelendiğinde, PL/DÇK kirişlerinin meydana gelen ilk çatlakın ardından eğilme yük taşıma kapasitesinde diğer karışımlara ait kirişlere kıyasla daha fazla düşüş meydana gelmiştir. İlk çatlakın meydana gelmesinin ardından, orta açıklık sehimine karşılık yük ekseninde her ne kadar pekleşme meydana gelmişse de bu durum diğer kiriş numunelerine kıyasla (Şekil 5.b-c) sınırlı olmuştur. Öte yandan, yük taşıma kapasitesi ise diğer kiriş numunelerinden daha uzun orta açıklık sehimi yaparak devam etmiş olup ortalama 4,68 mm deformasyon seviyesinde deney sona ermiştir (Tablo 5). Hibrit lif donatılı çimento esaslı kompozitler (HBL/DÇK) incelendiğinde ise ilk çatlak gerilme noktası olarak kabul edilen ilk çatlakın meydana gelmesinin ardından eğilme yük ekseninde düşüş PL/DÇK karışımlarına kıyasla sınırlı kalmış ve HBL/DÇK kiriş numunelerinin her ikisi de çok belirgin şekilde ilk çatlak gerilmesi sonrasında pekleşme göstermiştir (Şekil 5.b). Meydana gelen daha yüksek pekleşme seviyesinin yanında, pekleşme süresi ve pekleşme sonrası davranış incelendiğinde PL/DÇK içeren karışımlara HBL/DÇK kirişleri yük taşıma kapasitelerini daha uzun süre devam ettirmiştir. Ortalama olarak HBL/DÇK kirişleri için orta açıklık sehimi (mm) seviyesi 5,63 mm’ye geldiğinde ise (Tablo 5) deney cihazı durarak kirişlerin yük taşıma kapasitesi sona ermiştir. Beş boyutlu çelik lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin (5DÇL/DÇK) davranışına genel olarak bakıldığında ise (Şekil 5.c) kirişlerin ilk çatlak gerilmesi noktalarının eğilme yük seviyesi olarak daha yüksek noktalarda meydana geldiği görülecektir. İlk çatlak gerilmesi sonrası yük taşıma kapasitesindeki düşüş ise HBL/DÇK kirişlerine benzer şekilde daha sınırlı meydana gelmiştir. Ancak her iki 5DÇL/DÇK karışımına ait kirişlerin pekleşme performansları diğer iki tip karışıma göre (PL/DÇK ve HBL/DÇK) daha üst eğilme yük seviyesinde meydana gelmiştir. Öte yandan 5DÇL/DÇK kirişlerinin pekleşme aralığı, ilk çatlak gerilmesi sonrası maksimum taşıma seviyesi ve kırılmaya kadar devam eden orta açıklık sehimi kapasiteleri dikkate alındığında ise tekil PL (%1) ve hibrit olarak PL (%0,5) ve 5DÇL (%0,5) içeren kirişlere göre daha düşük bir sehimi kapasitesi gösterdiği görülmektedir. Daha önce bahsedildiği üzere PL/DÇK ve HBL/DÇK kirişlerinin ortalama nihai sehimi kapasitesi sırasıyla 4,68 ve 5,63 mm elde edilmesine karşın, 5DÇL/DÇK kirişlerinin ortalama nihai sehimi kapasitesi 2,87 olarak kaydedilmiştir (Tablo 5).

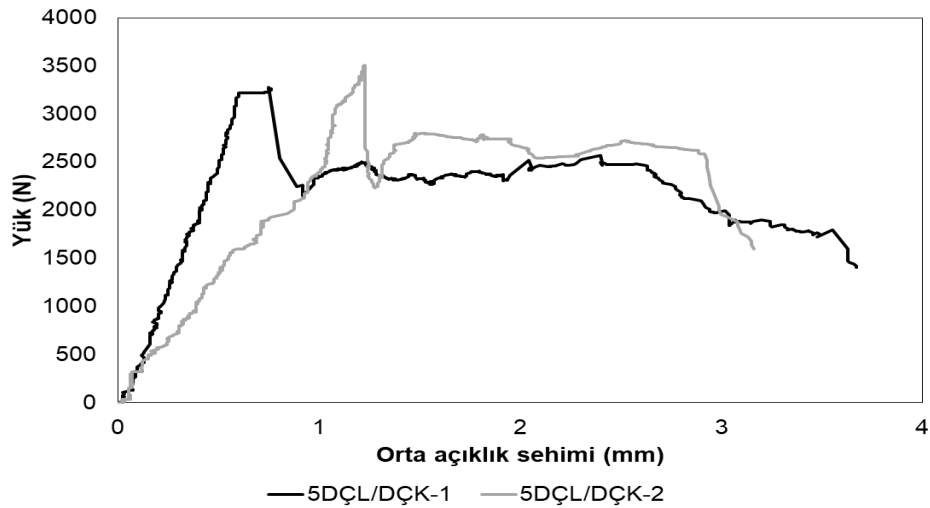
Şekil 5’e genel olarak bakıldığında, PL/DÇK ve HBL/DÇK’e ait farklı kiriş numunelerinin yük (N) ve orta açıklık sehimi (mm) grafiklerinin kendi içerisinde birbirine daha benzer olduğu görülecektir. Ancak, 5DÇL/DÇK kirişlerine ait grafiklerdeki yük (N) ve orta açıklık sehimi (mm) ilişkisinin ise birbirinden daha fazla fark içerdiği görülecektir (Şekil 5.c). Bu durumun temel sebebi, makro boyuttaki 5DÇL etkisinin, mikro boyutta tek bir tipte lif içeren (PL/DÇK) ve daha az miktarda 5DÇL içeren (HBL/DÇK) karışımlara kıyasla meydana gelen farklılıklardan daha büyük olması ile ilişkilendirilebilir.



a) %1 polyamid (PL) lif donatılı çimento esaslı kompozitler



b) %0,5 polyamid (PL) ve %0,5 beş boyutlu çelik (5D-ÇL) lif donatılı çimento esaslı kompozitler



c) %1 beş boyutlu çelik (5D-ÇL) lif donatılı çimento esaslı kompozitler

Şekil 5. Tekil ve hibrit lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin yük (N) – orta açıklık sehim (mm)

Tablo 5. Yüksek oranda uçucu kül içeren tekil ve hibrit lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin mühendislik özellikleri

Kiriş adı	İlk çatlak noktası			Kırılma				
	Yük (N)	Orta açıklık sehimi (mm)	İlk çatlak sonrası maks. yük (N)	Yük (N)	Orta açıklık sehimi (mm)	Süneklik Oranı	Başlangıç rijitlik (N/mm)	Enerji yutma kapasitesi (N.mm)
PL/DÇK-1	2372	0,73	962,2	813,7	5,10	6,98	3249,3	4842,7
PL/DÇK-2	2684	0,66	1035,4	886,9	4,26	6,45	4066,7	4521,5
Ortalama	2528	0,70	998,8	850,3	4,68	6,72	3658,0	4682,1
HBL/DÇK-1	2546	0,58	1937,3	1646,0	6,44	11,14	4407,1	10662
HBL/DÇK-2	2923	0,66	2208,0	1876,8	4,82	7,30	4428,8	9167,2
Ortalama	2734,5	0,62	2072,7	1761,4	5,63	9,22	4417,5	9914,6
5DÇL/DÇK-1	3276,5	0,75	2568	2182,7	2,80	3,73	4368,6	6294,4
5DÇL/DÇK-2	3503,5	1,23	2801,4	2380,8	2,94	2,39	2848,4	6490,2
Ortalama	3390	0,99	2684,7	2281,8	2,87	3,06	3608,5	6392,3

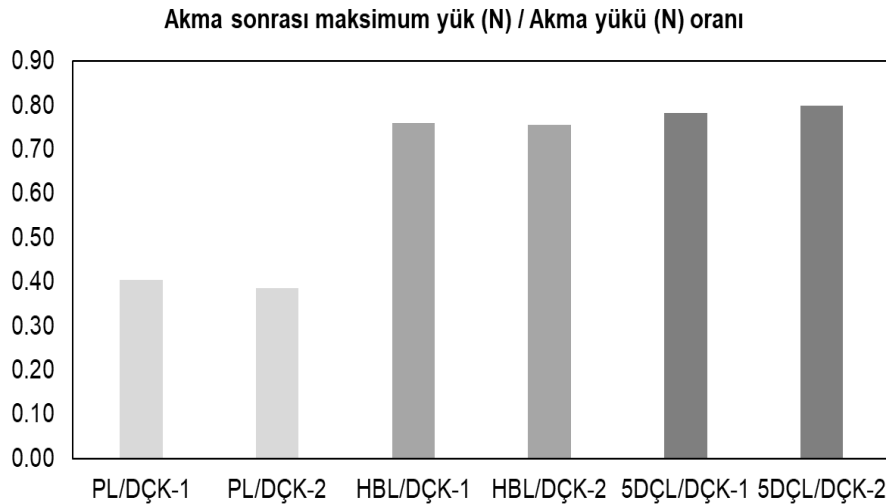
Bu çalışma, yüksek oranda uçucu kül ihtiva eden çimento esaslı kompozitlerde kullanılan tekil ve hibrit lif donatılarının numunelerin ilk çatlak gerilme noktası (yük [N] ve orta açıklık sehimi [mm]), ilk çatlak gerilmesi sonrası maksimum yük seviyesi, kırılma noktası (yük [N] ve orta açıklık sehimi [mm]), süneklik oranı, başlangıç rijitlik (N/mm) ve enerji yutma kapasitelerine (N.mm) etkisini irdelemiş olup numunelere ait mühendislik özelliklerinin tespitinde daha önce verilen (Şekil 3) parametreler kullanılmıştır. Farklı karışımların ilk çatlak gerilme noktasındaki yük seviyesi irdelendiğinde (Tablo 5), 5D çelik lif içeren karışımlara ait kirişlerin (5DÇL/DÇK) ortalama ilk çatlak gerilme yüklerinin en yüksek olduğu görülecektir (3390 N). Bu karışımı sırasıyla HBL/DÇK (2734,5 N) ve PL/DÇK (2528 N) takip etmiştir. Görüleceği üzere, sırasıyla daha yoğun (%1), orta yoğunluklu (%0,5) ve 5D çelik lifinin kullanılmadığı PL/DÇK karışımlarına doğru gidildikçe ilk çatlak gerilme yükünün meydana geldiği seviye düşmektedir. Bu durumun en temel sebebi 5D-ÇL etkisi olup bir sentetik lif olan PL'ye kıyasla daha az uzama seviyesine ve daha yüksek elastik modüle sahip olması ile ilişkilidir. Belirli bir çatlak genişliğine karşılık gelen yük için PL'ler daha az ilk çatlak gerilme yükü ile bu çatlağı karşılarken, çelik lif içeren numunelerde ilk çatlak gerilme yük seviyesi daha üst noktalarda meydana gelmiş olabilir. Her ne kadar bu duruma karşılık beklenen ilk çatlak gerilme noktasına karşılık gelen ilk çatlak gerilme sehminin (mm) daha düşük olması beklense de HBL/DÇK için ilk çatlak gerilme seviyelerinin oluştuğu söylenebilir (Tablo 5). Bu durum daha çok beş boyutlu çelik liflerin ilk çatlak gerilme yükünü çok daha fazla yükte karşılarken, farklı liflerin çalışma özelliklerinin tam olarak ayırt edilmeye başlaması ile ilgili olabilir. Örneğin, ilk çatlak noktasında meydana gelen PL'lerinin bazılarının muhtemel sıyrılmasının daha erken bir ilk çatlak gerilme sehimi meydana getirdiği düşünülmektedir. Benzer durum ilk çatlak gerilme noktasından sonra da görülebilir. İlk çatlak gerilme noktasından sonra meydana gelen maksimum yük seviyeleri incelendiğinde, davranış üzerinde giderek daha fazla oranda 5D-ÇL'lerin etkili olmaya başladığı görülecektir. Bu durum ilk çatlak gerilme sonrası en yüksek yük taşıma kapasitesinden görülebilir (Tablo 5). Örneğin, 5DÇL/DÇK, HBL/DÇK ve PL/DÇK kirişlerinin ortalama maksimum yükleri sırasıyla 2684,7, 2072,7 ve 998,8 N olarak kaydedilmiştir. Ancak ilk çatlak gerilmesinin ardından devam eden şekil değiştirme yumuşamasının başladığı bölge (ilk çatlak gerilme noktası sonrası maksimum yük seviyesinden bu yükün %85'ine kadar devam eden bölge [Şekil 3]) dikkate alındığında, ilk çatlak gerilme noktası sonrası maksimum yük seviyesinde 5DÇL/DÇK kirişlerinin daha düşük sehim yaptığı görülecektir (Tablo 5). Bu durum ilk çatlak gerilmesi sonrasında kırılma bölgesine kadar çelik liflerin yüksek elastisite modülüne bağlı olarak en yüksek çekme gerilmesini (2684,7 N) daha düşük şekil değiştirme kapasitesi ile taşıdığını göstermektedir (Al-Kamyani vd. 2018).

HBL/DÇK kirişleri incelendiğinde ise çimento esaslı kompozitlerin hibrit lif donatısı ile gevrek davranıştan çok uzaklaştığı görülmektedir. Aynı şekilde, ilk çatlak gerilmesi sonrasında pekleşme bölgesine ve devamında maksimum yük seviyesinden bu yükün %85'ine kadar devam eden bölge dikkate alındığında hibrit lif donatılı her iki kirişinde diğer karışımlara oranla daha yüksek orta açıklık sehimine (mm) sahip olduğu görülecektir. Sayısal olarak ifade etmek gerekirse HBL/DÇK kirişleri, 5DÇL/DÇK ve PL/DÇK kirişlerinden kırılma noktasında ortalama olarak sırasıyla %96,1 ve %20,3 daha fazla sehim yapma performansı göstermiştir. İlk çatlak gerilme noktasında HBL/DÇK kirişlerinin daha az miktarda ilk çatlak gerilme sehimine karşılık, devam eden pekleşme ve pekleşme sonrası davranışında meydana gelen bu çok belirgin değişikliğin temel sebebi, farklı tür liflerin eğilme yükleri altında farklı görev yaparak bir sinerji meydana getirdiği ve buna bağlı olarak söz konusu mühendislik özelliklerini iyileştirmesidir. Hibrit lif kullanımında PL ve 5D-ÇL'lerin sinerjisi ise PL liflerinin erken yüklenme döneminden itibaren çelik liflerle beraber matris etkiyen gerilmeyi ve numunenin alt yüzeyinden üst kısmına kadar giderek genişleyen çatlak gelişimini ortak olarak paylaşmasıdır. Bu durum sırasında çatlak genişlikleri arttıkça PL lifleri sıyrılma veya daha ileri yüklerde liflerin bireysel olarak kopma sonucu çatlak genişlikleri sınırlı tutulmuştur. Bu esnada makro boyutta 5D-ÇL'ler devam eden eğilme yükleri altında başarılı bir şekilde yük taşıma kapasitesi için katkıda bulunurken artan yük altında daha fazla sehim yapma kapasitesi mümkün olmuştur. Giderek artan eğilme yükleri ile sehim derecesi artmış ve bu noktada makro boyuttaki 5D-ÇL lifler ilk çatlak gerilmesi sonrası maksimum yükten kırılmaya kadar giderek artan çatlak genişliklerinde rol oynamıştır. Bir başka deyişle, yüklemenin başından sonuna kadar HBL/DÇK kirişlerinin davranışı

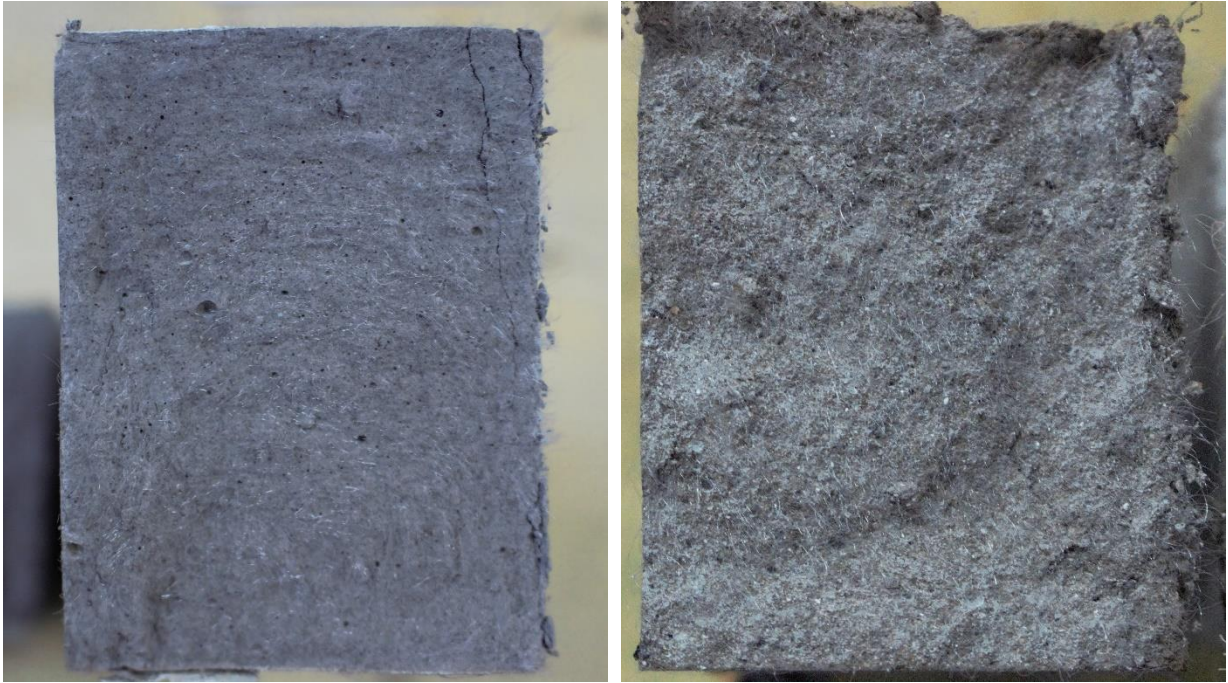
değerlendirildiğinde, nominal dayanımı 900 MPa olan PL lifler ilk olarak daha düşük genişlikteki çatlak uçlarında eğilme yüklerine bağlı gerilemeyi azaltmıştır. Gerilme konsantrasyonlarının çatlak uçlarında PL aracılığıyla dağılmasının ardından, diğer karışımlara kıyasla daha dar çatlak genişliğinde daha fazla yükü 5D-ÇL'ler karşılamıştır. Böylece, yüklemenin giderek artması ile lokalize olan çatlak gelişimlerini 5D-ÇL'ler daha fazla enerjinin gerektiği kırılma yükleri altında taşıma kapasitesine sahip olmuştur. Benzer bulgular literatürdeki bazı çalışmalarla da örtüşmektedir (Wei vd. 2021). Öte yandan bu gelişimin yaşanmadığı tekil olarak 5D çelik liflerin yer aldığı karışımlarda (5DÇL/DÇK) sözü edilen davranış gözlemlenmemiştir (Şekil 5).

Tekil olarak PL liflerinin yer aldığı PL/DÇK karışımlarına ait kirişler incelendiğinde 5DÇL/DÇK kirişlerine kıyasla daha yüksek ortalama kırılma sehimi kapasitesi (4,68 mm [Tablo 5]) elde edilse de, ilk çatlak gerilmesi noktasından başlamak üzere, ilk çatlak sonrası maksimum yük taşıma kapasitelerinde önemli düşüşler mevcuttur. Bu durum mikro çatlakların genişlemesini engelleyen PL liflerinin artan eğilme yükleri neticesinde daha geniş çatlakları köprüleme yeteneğinin ortadan kalktığını göstermektedir. Bu noktada daha rijit ve nominal çekme gerilmesi PL liflerine göre yaklaşık 2,5 kat daha fazla olan (2300 MPa) çelik liflerin karışımda yer almaması daha sünek ancak yük taşıma kapasitesi açısından en düşük karışımın PL/DÇK kirişlerine ait olmasına sebep olmuştur. Tablo 5'e bakıldığında, PL/DÇK kirişlerinin, ortalama ilk çatlak gerilme yükü (2528 N), ortalama ilk çatlak gerilmesi sonrası maksimum yük (998,8 N) ve ortalama kırılma yükü (850,3) açısından en düşük yük kapasitesinin kaydedildiği karışım olduğu görülecektir.

Bireysel olarak karışımların analizlerinin yanında elde edilen değerlere göre Tablo 5'te sunulan süneklik oranı, başlangıç rijitlik (N/mm) ve enerji yutma kapasitesi, (N.mm) gibi özellikler üzerinden kirişlerin ortalama performansları sayısal olarak irdelenebilir. Daha önce bahsedildiği üzere daha yüksek yük seviyesinde daha fazla sehimi yapma kapasitesi gösteren HBL/DÇK'ler, kırılma anındaki sehimin (mm) ilk çatlak anındaki sehime (mm) oranı olarak ifade edilen süneklik derecesinde 5DÇL/DÇK kirişlerinden yaklaşık 3 kat, PL/DÇK kirişlerinden ise yaklaşık 1,4 kat daha fazla sünektir. Bunun yanında, her ne kadar süneklik oranı ve enerji yutma kapasiteleri kadar (N.mm) belirgin olmasa da, HBL/DÇK'lerin başlangıç rijitlikleri sırasıyla PL/DÇK ve 5DÇL/DÇK kirişlerinin ortalama değerlerinden yaklaşık %20 ve %22 daha fazladır. Daha önce detaylı olarak bahsedildiği üzere, hibrit lif kullanımında meydana gelen bu iyileşmeler ile kirişlerin yük (N) – orta açıklık sehimi (mm) eğrilerinin altında kalan alan olarak tanımlanan enerji yutma kapasitesi (N.mm) HBL/DÇK kirişleri için 9914,6 N.mm olarak elde edilmiştir (Tablo 5). Öte yandan enerji yutma kapasiteleri, 5DÇL/DÇK ve PL/DÇK kirişleri için sırasıyla 6392,3 N ve 4682,1 N olarak kaydedilmiştir. Tablo 5'in yanında, kirişlerin ilk çatlak gerilme davranışı sonrası kaybettikleri yük taşıma kapasitesini geri kazanma oranını gösteren ilk çatlak gerilmesi sonrası maksimum yük (N)/ ilk çatlak gerilmesi yükü (N) oranı Şekil 6'da ayrı olarak sunulmuştur. Farklı türde tekil ve hibrit lif donatılı kirişlerin kırılma sonrasına ait görüntülerine bakıldığında genel olarak liflerin tamamının (PL ve 5D-ÇL) homojen dağıldığından söz edilebilir (Şekil 7). Örneğin Şekil 7.a'ya bakıldığında, gözle yapılan muayene sonucu %1 oranında kullanılan PL liflerinin kiriş kesit yüzeylerinde flokülleşme meydana getirmediği görülebilir. Benzer olarak, Şekil 7.c'de verildiği üzere 5D çelik liflerin bulunduğu yönler açısından kesit genelindeki oryantasyona bakıldığında rastgele bir dizilimin başarılı olduğundan söz edilebilir. Hibrit formda kullanılan PL ve 5D çelik liflerinin ise diğer iki karışıma kıyasla gözle yapılan muayene sonucu tek bir çatlak noktasından ayrılma yerine, ilk çatlağın başladığı noktadan çatlağın lokalize olduğu noktaya kadar çeşitli yan çatlaklar meydana getirdiği tespit edilmiştir. Bunun yanında, kırılma esnasında 5D çelik lifleri sahip olduğu çatlak ucu avantajı ile (5D) kirişleri parçalayarak sıyrılmıştır. Bu durum hibrit formdaki kirişlerin daha fazla yük altında daha fazla sehimi yaptığını ve sonuç olarak Şekil 5-6 ve Tablo 5'te detaylı olarak aktarılan mühendislik özelliklerinin iyileştirildiğini doğrulamaktadır.



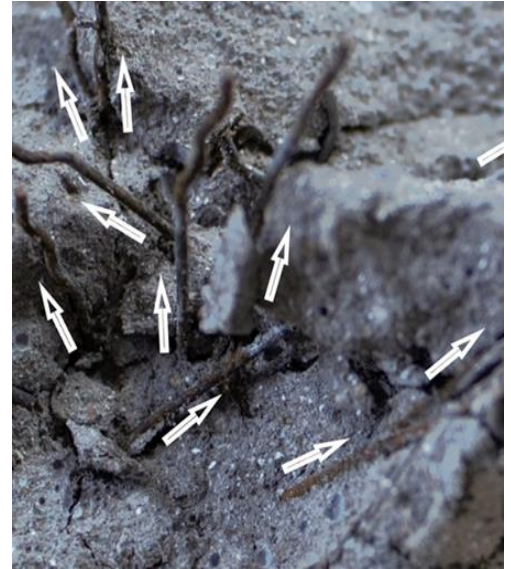
Şekil 6. Tekil ve hibrit lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin pekleşme performansları



a) PL/DÇK



b) HBL/DÇK



c) 5DÇL/DÇK

Şekil 7. Yüksek hacimde uçucu kül varlığında (%80) üretilen tekil ve hibrit formdaki kiriş numunelerin deney sonrası gözle muayeneleri

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, çimento esaslı kompozitlerde yüksek hacimde kullanılan uçucu küllerin varlığında tekil ve hibrit formda lifler kullanılmıştır. Geliştirilen çimento esaslı kompozit karışımları polyamid lif (PL) ve beş boyutlu çelik liflerle (5D-ÇL) donatılmış ve mühendislik özellikleri irdelenmiştir. Bunun yanında, farklı tür ve oranda lif donatılı kompozitlerin mekanik özellikleri 7, 28, 60 ve 90 günlük kür yaşlarında belirlenmiştir. Mühendislik özellikleri, ilk çatlak gerilmesi ve kırılma noktalarındaki yük ve deplasman değerleri, maksimum taşıma kapasitesi, süneklik oranı, rijitlik ve enerji yutma kapasitesi parametreleri üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgulardan aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Toplam bağlayıcı ağırlığınca %80 oranında uçucu kül ile ikame edilen farklı lif donatılı çimento harç karışımlarının basınç mukavemetleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, her bir karışıma ait altı farklı numunenin ortalama basınç mukavemetlerine göre bütün karışımlar erken yaşta (7.gün) düşük basınç mukavemeti sergilemiştir (10,0-12,1 MPa). 28 günlük kür yaşlarında ise gerekli basınç mukavemetini (>30 MPa) gösterememiştir (18,1-22,2 MPa). Ancak 60 günlük (30,7-35,1 MPa) ve 90 günlük (33,9-38,9 MPa) kür yaşlarında bütün lif donatılı karışımlar yeterli basınç mukavemeti değerlerine sahiptir. Her ne kadar araştırma kapsamında olmasa da, daha ileri kür yaşlarında (>90 gün) karışımlar yoğun uçucu kül ihtiva ettiği için yapılacak testler sonucu basınç dayanımlarında artışın devam etmesi beklenebilir.
- Basınç mukavemet değerleri karışımlar özelinde değerlendirildiğinde, erken yaştan (7.gün) başlamak üzere 90. Güne kadar bütün kür yaşlarında en yüksek basınç dayanımı sırasıyla PL/DÇK, HBL/DÇK, 5DÇL/DÇK karışımlarında elde edilmiştir. Bu noktada kür yaşından bağımsız olmak üzere, makro liflerin (5D-ÇL) mikro liflere göre (PL) basınç dayanımını kötüleştirdiği tespit edilmiştir.
- Sonuçlar bir arada kullanılan PL (%0,5) ve 5D-ÇL (%0,5) liflerinin tek formda (%1) kullanılmalarına göre, matris ile lif arasındaki bağ davranışına kıyasla sinerji meydana getirdiğini ve buna bağlı olarak süneklik performansını ve enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde arttırdığını işaret etmektedir. Bunun yanında tekil olarak kullanılan 5D-ÇL'lerin PL liflerine göre başlangıç rijitlik ve enerji yutma kapasitesi gibi davranışlarda daha olumlu olduğu düşünülmürken, PL lifleri ise süneklik sağlama da 5D-ÇL'ye göre daha fazla avantaj sunmaktadır.
- Araştırma sonuçları, uçucu kül/çimento oranı ağırlıkça 4,0 olan çimento esaslı lif donatılı kompozitlerin, erken yaş mekaniik özelliklerin belirleyici olmadığı ve daha hassas kür imkanlarının mümkün olduğu inşaat mühendisliği altyapılarında ekonomik, kalıcı ve yapısal performans açısından uygun bir tasarım olarak kullanılabilceğini göstermektedir.

Referanslar

Al-Kamyani, Z., Figueiredo, Fabio P., Hu, H., Guadagnini, M. & Pilakoutas K. (2018). Shrinkage and flexural behaviour of free and restrained hybrid steel fibre reinforced concrete, *Construction and Building Materials*. 189(20), 1007-1018.

Balaguru, P.N & Shah S.P. (1992). *Fiber Reinforced Cement Composites*. McGraw-Hill Inc. 37–84.

Betterman, L.R., Ouyang, C. & Shah, S.P., (1995). Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar, *Advanced Cement-Based Materials* (2), 53-61.

Demirel, Ö. & Demirhan, S. (2021). Mikronize kalsit içeren yüksek hacimde uçucu kül katkılı çimento harçlarının mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(4), 2250-2269.

Dehghani, A. & Aslani, F. (2020). The effect of shape memory alloy, steel, and carbon fibres on fresh, mechanical, and electrical properties of self-compacting cementitious composites, *Cement and Concrete Composites* (112), 103659.

Doo-Yeol & Yoo Banthia N. Impact resistance of fiber-reinforced concrete – A review (2019). *Cement and Concrete Composites* (104), 103389.

Hannesson, G., Kuder, K., Shogren, R. & Lehman, D. (2021). The influence of high volume of fly ash and slag on the compressive strength of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*. (30), 161-168.

Johnston, C.D. (2001). *Fiber-reinforced cement and composites*. Gordon and Breach Science Publishers, 24–49.

Kumbhar, D., Ganbavale, M., Jain, A., Reddy R & Gayathri, S. (2014). *Compressive Strength of Hybrid fibre reinforced concrete*. Birla Institute of Technology and Science, Pilani, India.

Lawler J.S., Wilhelm T., Zampini D & Shah SP. (2003). Fracture process of hybrid fiber reinforced mortar. *Materials and Structures* (36); 197–208.

Lawrence, P. Cyr, M. & Ringot, E. (2003). Mineral admixtures in mortars—effect of inert materials on short-term hydration, *Cement and Concrete Research*. (33), 1939–1947.

Li Ye, Tan, K.H & Yang, H. (2019). Synergistic effects of hybrid polypropylene and steel fibers on explosive spalling prevention of ultra-high performance concrete at elevated temperature. *Cement and Concrete Composites*. (96), 174-181.

Li, V. (2003). On Engineered Cementitious Composites (ECC) A Review of the Material and Its Applications. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 1(3), 215-230.

Liu, J., Chen, H., Guan, B., Liu, K., Wen, J. & Sun, Z. (2018). Influence of mineral nano-fibers on the physical properties of road cement concrete material, *Construction and Building Materials*. 190 (30), 287-293.

- Liu, J., Tan, K. H., Fan, S. (2018). Residual mechanical properties and spalling resistance of strain-hardening cementitious composite with Class C fly ash, *Construction and Building Materials*. (181), 30, 253-265.
- Mehta, P.K. & Monteiro, P.J.M. (2005) *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, McGraw-Hill Education, 659.
- Mobasber, B., Stang, H. & Shah, S.P. (1990). Microcracking in fiber reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, (20), 665-76.
- Moon, G.D., Oh, S. & Choi, Y.C. (2016). Effects of the physicochemical properties of fly ash on the compressive strength of high-volume fly ash mortar. *Construction and Building Materials*. (124), 1072-1080.
- Nawy, E.G. (2001). *Fundamentals of high-performance concrete*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc. 246–289.
- Öztürk, O & Roig-Flores, M. (2021a). Effect of binary-use mineral admixtures for the advanced autogenous self-healing behavior of fiber-reinforced cementitious composites. *International RILEM Conference on Early-age and Long-term Cracking in RC Structures*, 389-401. Springer.
- Öztürk, O & Stefanidou M. (2021b). Sorptivity and mechanical properties of micro-fibrillated cellulose reinforced cementitious composites. *Conference: International Conference on Cement-based Materials Tailored for a Sustainable Future, In the honour of Prof. Surendra P. Shah and Prof. Turan Özturan, İstanbul*.
- Öztürk O, Yenidünya E & Keskin, Ü.S (2021). Effect of curing regimes on the mechanical and fresh properties of steel fiber-reinforced concrete, *Architecture, Civil Engineering, Environment* (4), 69-81.
- Rahhal, V. & Talero, R. (2005). Early hydration of Portland cement with crystalline mineral additions. *Cement and Concrete Research*. (35);1285–1291.
- Sahmaran M., Yaman I.O. (2007). Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash. *Construction and Building Materials*. (21), 150-156.
- Sanchez, D., & King-Toler, E. (2007). Addressing disparities consultation and outreach strategies for university settings. *Consulting Psychology Journal: Practice and Research*, 59(4), 286-295. doi:10.1037/1065-9293.59.4.286
- Sunayana, S. & Barai, S.V. (2017). Recycled aggregate concrete incorporating fly ash: Comparative study on particle packing and conventional method, *Construction and Building Materials*, 156 (15), 376-386.
- TBDY (2019). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar*. Ankara: 1-416.
- Van Vugt, M., Hogan, R., v Kaiser, R. B. (2008). Leadership, followership, and evolution: Some lessons from the past. *American Psychologist*, 63(3), 182-196. doi:10.1037/0003-066X.63.3.182
- Wang, S. & Li V.C. (2007) *Engineered Cementitious Composites with High-Volume Fly Ash*, *Materials Journal*. 104(3) 233-241.
- Wei, J., Li, J. Wu, C., Liu, Z. & Li, J. (2021). Hybrid fibre reinforced ultra-high performance concrete beams under static and impact loads, *Engineering Structures*. 245(15), 112921.
- Zhang, D., Yu Tan, G. & Tan, K.H. (2021). Combined effect of flax fibers and steel fibers on spalling resistance of ultra-high performance concrete at high temperature. *Cement and Concrete Composites*. (121), 104067.
- Zheng, Y., Wu, X., He, G., Shang, Q., Xu, J. & Sun, Y. (2018). Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete by vibratory mixing Technology. *Advances in Civil Engineering*. 025715, 1-11



Yenilenebilir Hibrit Enerji Santrali Uygulamasında Tesis Yer Seçimi

Facility Location Selection in Renewable Hybrid Power Plant Implementation

Mert Kara¹, Yiğitcan Ercan¹, Rabia Yumuşak¹, Ahmet Cürebal², Tamer Eren¹

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 71305 Kırıkkale/TÜRKİYE

²Institute of Information Systems, University of Hamburg, GERMANY

Başvuru/Received: 18/10/2021

Kabul / Accepted: 21/12/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte artan enerji talepleri, ülkeleri yeni enerji kaynakları arayışına itmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sınırlı olması nedeniyle çalışmalar yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yoğunlaşarak devam etmektedir. Bu bağlamda, birden çok yenilenebilir enerji kaynağını tek bir tesis içinde bir araya getiren hibrit enerji sistemlerine yönelik girişimler gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmada, Kırıkkale ilinde güneş ve rüzgâr enerjisinden sürdürülebilir bir şekilde yüksek verimli enerji elde etmek amacıyla kullanılacak hibrit enerji santrali kurulumu için optimal bölgenin bulunması hedeflenmiştir. Bu değerlendirme yapılırken eğim, güneş radyasyon değerleri, rüzgâr değerleri, trafo merkezi uzaklık, arazi maliyetleri ve arazi kullanımı oranları olarak altı kriter ele alınmıştır. Yürütülen çalışmada Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), Technique for Order Preference by Similarity to An Ideal Solution (TOPSIS) ve COMplex PROportional ASsessment (COPRAS) kullanılmıştır. Altı kriterin göz önüne alındığı problemde Keskin ilçesinin hibrit enerji santrali kurulum için en uygun bölge olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışma; Kırıkkale ilinde hibrit enerji konusu üzerine yapılmış ilk uygulama özelliği taşımaktadır. Ek olarak, çözüm yaklaşımı sunulan problem için AHP, TOPSIS ve COPRAS yöntem sonuçlarının karşılaştırılması literatüre katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler

“Hibrit enerji santrali, enerji santrali yer seçimi, AHP, TOPSIS, COPRAS”

Abstract

Today, the increasing energy demands with the developing technology causes countries to search for new energy sources. Due to the limited number of non-renewable energy sources, processes run by focusing on renewable energy sources. In this context, enterprises on the hybrid energy system, which collects multiple renewable energy sources in a single facility, are increasing day by day. In this study, it is aimed to find the optimal region for the installation of a hybrid power plant to be used in order to obtain high efficiency energy from solar and wind energy in a sustainable way in Kırıkkale province. In the study, Analytical Hierarchy Process (AHP), Technique for Order Preference by Similarity to An Ideal Solution (TOPSIS) and COMplex Proportional ASsessment (COPRAS) from Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods were used. In the problem where six criteria were taken into consideration, it was concluded that Keskin is the most suitable region for hybrid power plant installation. It is the first case on hybrid energy in Kırıkkale province. In addition, the comparison of results from AHP, TOPSIS and COPRAS methods for the problem for which a solution approach is presented contributes to the literature.

Key Words

“Hybrid power plant, power plant location selection, AHP, TOPSIS, COPRAS”

1. Giriş

Günümüzde sanayinin gelişmesi ve nüfusun çoğalmasıyla birlikte oluşan enerji ihtiyacının artması, ülkeleri yeni çözüm arayışına itmektedir. Artan enerji talepleri ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının (kömür, petrol, doğalgaz vb.) sınırlı kaynaklar olması, son yıllarda ilginin yenilenebilir enerji kaynaklarına çevrilmesine neden olmuştur (Akçay & Atak, 2018).

Son yıllarda ilgi odağı haline gelen başlıca yenilenebilir enerji kaynakları güneş ve rüzgar enerjileridir (Uyan, 2017). Gelişmekte olan teknoloji ile birlikte güneş enerjisi sistemleri günümüzde yaygın olarak kullanılmakta ve 2020 yılı sonu itibari ile dünyada toplam kurulu gücün 702 GW olduğu belirtilmektedir. Türkiye 2021 yılı itibari ile dünya genelinde en fazla güneş enerjisi santrali bulunan 49 ülke arasından 15. sıradadır ve kurulu güneş enerjisi gücü 7.065 MW' a ulaşmıştır (Ülkelere göre güneş enerjisi). İkinci yenilenebilir enerji alternatifi olan rüzgar santralleri dünyada ve Türkiye'de ana enerji kaynaklarından biri olma yolunda hızla mesafe kat etmektedir. 2020 yılı sonu itibari ile dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü 710 GW üzerinde olup, 2021 yılı mayıs ayı verilerine göre Türkiye'nin kurulu rüzgar santrali gücü 9.253 MW olarak belirtilmiştir (Ülkelere göre rüzgar enerjisi). Çeşitli enerji kaynaklarından yararlanılması ve tek bir enerji kaynağına bağımlı kalınması enerji arz güvenliğini artırmaktadır. Enerji arz güvenliğinin yanı sıra sürdürülebilir enerji arzı için çeşitli enerji kaynaklarının kullanılması gerekmektedir. Birden fazla enerji kaynağının bir arada kullanılarak enerji üretiminin gerçekleştirildiği sistemler hibrit enerji sistemleri olarak adlandırılır. Ülkemizde çeşitli enerji kaynakları ile büyük ölçekli elektrik üretimi yapılarak şebekelere aktarılmaktadır fakat hibrit enerji sistemleri, yeni gelişen bir sistem olduğu için bu büyük ölçekli elektrik üretiminde payı küçük bir kısmı kapsamaktadır. Hibrit enerji sistemlerinin öncelikli olarak küçük ve makro üretimlerde kullanılması sistemin ihtiyaç duyduğu elektrik miktarını kendisinin karşılamasını ve kesintisiz enerji üretimini sağlamaktadır (Yıldız ve Bingöl, 2019).

Geçmişten günümüze en çok ilgi gören ve geliştirilmekte olan hibrit enerji sistemleri rüzgar ve güneş enerjisinin birlikte kullanıldığı sistemlerdir. Günümüze kadar yapılmış çalışmalar çerçevesinde hibrit enerji sistemlerinin birçok açıdan olumlu özellik barındırdığı kanıtlanmıştır. Rüzgarın sürekli olmaması ve güneşten sadece belirli zaman dilimlerinde yararlanılması bu enerji sistemlerinin birbirlerinden bağımsız bir şekilde kullanılmalarından ziyade hibrit bir sistem enerji arz güvenliği açısından avantaj sağlamaktadır. Bu sistemler enerji üretimi yapamadığı durumlarda depolama yaparak ihtiyaç halinde enerjinin kullanılmasına olanak vermektedir (Türkdoğan vd., 2020). Ayrıca kış aylarında daha yüksek bir rüzgar enerjisi ve yaz aylarında daha yüksek bir güneş enerjisi potansiyelinin olması, bir rüzgar-güneş hibrit enerji santralini sürdürülebilir enerji arzı amacı için önemli bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tür hibrit enerji üretim sistemleri, genellikle bağımsız güneş, rüzgar veya trijenerasyon sistemlerinden daha iyi bir verimliliğe ve daha önemli ekonomik ve çevresel değerlere sahiptir (Rezai vd., 2018).

Türkiye'de ve dünyada son yıllarda gerçekleşen girişimlerle hayatın her alanında kendinden söz ettiren yenilenebilir enerji kaynaklarının birden fazla formunun bir tesiste toplayan hibrit enerji sistemleri, dört mevsim yüksek verimli faaliyet gösterebilmesi için tesisin kurulduğu bölgenin belirli kriterleri karşılaması gerekmektedir. Bunlar bölgenin belirli seviyenin üstünde güneş ve rüzgar alması, arazi yapısının mera veya marjinal toprak yapısında olması, trafo merkezine yakın olması, arazi eğimin normal şartlara yüzde 2-3, maksimum şartlarda yüzde 5'e kadar kabul edilebilmesi gibi koşulları içermelidir (Supçiller & Bayramoğlu, 2020). Son yıllarda Kırıkkale ilinde de çeşitli yenilenebilir enerji sistemlerinin girişimleri bulunmakla birlikte, enerji formlarından maksimum verimle yararlanabilmek için tüm kriterlerin sağlandığı en optimal bölge seçilmelidir. Bu durumda ÇKKV ile optimal bölge seçim problemi ortaya çıkmaktadır. Sistemin optimal bölgeye kurulumu sonucunda güneş ve rüzgar enerjisinden maksimum yararlanılması, depolanma ve dağıtım safhasında enerji kaybının minimum da tutulması hedeflenmektedir.

Bu çalışmada rüzgar ve güneş enerjisi sistemlerinden oluşan hibrit enerji santralinin maksimum verimle enerji üretebilmesi için optimal bölge yer seçimi problemi ele alınmıştır. Optimal bölgenin bulunmasında birçok kriterin değerlendirilmesi gerektiği ve bu kriterlerin birbiri ile çelişen değerlere sahip olması nedeniyle bu çalışmada probleme ÇKKV yöntemleri ile üç model önerisinde bulunulmuştur. Önerilen modellerin birincisinde karar vericilerden alınan öznel değerlendirmeyi nesnel değerlendirmeye aktarabilme ve çözüm kolaylığı sağlamasından dolayı AHP yöntemi seçilmiştir (Wu vd., 2019). AHP yöntemi ile kriterler ve alternatifler için ikili karşılaştırma yapılarak hem kriter ağırlıkları hem de alternatiflerin ağırlıkları belirlenmiştir. İkinci modelde yüksek hesaplama verimliliği ve hem en iyi hem de en kötü alternatifleri basit bir matematiksel biçimde ele alması sebebiyle TOPSIS yöntemi tercih edilmiştir (Özcan vd. 2020). Üçüncü modelde ise kriterleri faydalı ve faydasız kriter olarak değerlendirilip zıt yönlü kriterler üzerinde işlem yapma gerekliliğini ortadan kaldırması avantajından dolayı COPRAS yöntemi kullanılmıştır (Özcan vd., 2021). Sonuç olarak birinci modelde AHP yöntemi ile hem kriterler hem de alternatifler değerlendirilmiştir. İkinci modelde AHP yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları TOPSIS yönteminde kullanılmış ve alternatifler değerlendirilmiştir. Üçüncü modelde de AHP yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları COPRAS yönteminde kullanılarak Kırıkkale ilindeki 9 bölge değerlendirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde optimal bölge seçim problemini anlatılmıştır. Üçüncü bölümde ise daha önce literatürde yapılmış benzer çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde problem çözümünde kullanılan ÇKKV yöntemi anlatılmıştır. Beşinci bölümde ise problemin çözümünde ele alınan kriterler ve alternatiflerin ÇKKV yöntemleri ile çözümlenip sonuçlandırılması ve yorumlanması yapılmıştır. Altıncı bölümde çalışma değerlendirilmiş ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. Optimal Bölge Seçim Problemi

Kuruluş yeri, işletmelerin ekonomik faaliyetlerini sürdürdüğü coğrafi konum olarak tanımlanabilmektedir (Akyüz & Soba, 2013). Bir işletmenin kuruluş yeri belirlenirken hammaddeye, pazara ve ulaşım imkanlarına yakın olması ve altyapının gelişmiş olması gibi durumlar göz önünde bulundurulmalıdır. Bu gibi kriterler özelinde en uygun bölgeye karar verilmesine optimal bölge seçimi adı verilmektedir.

Optimal bölge seçimi başlığı altında hibrit enerji santral yer seçim problemi ise iki aşamaya dayanmaktadır. Problemin karmaşıklığı, yatırım maliyetinin büyük ölçekte olması ve hibrit santral gibi kurulduğu yere göre üretim kapasitesinin değişkenlik gösterdiği işletmelerde kararların geniş bir perspektifte değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Optimum yer seçim probleminin kompleks, çok kriterli ve çok amaçlı yapıya sahip olması, araştırmacıları ÇKKV yöntemlerini kullanmaya itmiştir (Sánchez-Lozano vd., 2013). Optimum yer seçiminde sektör farkı olmaksızın ÇKKV tekniklerinden AHP, ANP, ELECTRE, TOPSIS, PROMETHEE vb. kullanılmaktadır (Aydın vd., 2013). İşletmenin kurulurken optimum yer seçimi aşamasında yanlış bir karar verilmesi durumunda hammadde tedarikinde, pazarlamada, taşımada ve altyapıda sorunlar gerçekleşir. Meydana gelen bu sorunlar neticesinde maliyetlerde artış yaşanır ve yaşanan maliyet artışları sonucunda ürünün birim fiyatında da doğru orantılı olarak bir artış gerçekleşir. Mevcut çalışmada hibrit enerji santrali yeri seçiminde alternatifler arasından kriterlere en uygun olanı seçilerek, maliyetlerin minimum, verimliliğin ise maksimum olması amaçlanmaktadır.

Optimal bölge seçimi başlığı altında hibrit enerji santralinin yer seçimi problemi ise iki aşamaya dayanmaktadır. Makro alan seçimi ve mikro alan seçimi olarak iki aşamada çözülen problem, bu yaklaşım ile sadeleştirilmiştir. Makro alan seçimi, geniş alanların doğal kaynakları, şebeke bağlantısı, trafik, coğrafi, çevre, sosyal ve ekonomik koşulları göz önünde bulundurularak en değerli küçük bölgenin seçilmesini ifade eder. Mikro alan seçimi ise makro alan seçimi sonuçlarına dayalı olarak teknoloji ve ekonomi kriterlerinin ele alındığı ve tesisin hangi arazi üzerine kurulması gerektiği sorusuna cevap arandığı bir problemdir (Jun vd., 2014). Bu çalışmada ise Kırıkkale iline kurulacak hibrit enerji santralinin makro alan seçimi ele alınmıştır. Dokuz ilçe alternatif makro alan olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte altı kriter açısından ÇKKV yöntemleri ile değerlendirilmiştir.

3. Literatür Araştırması

Literatürde makro ve mikro ölçekte tesis yeri seçimi problemi sıklıkla ele alınmaktadır. Hangi yatırımın yapılacağına karar verildikten sonraki ilk aşama nereye yapılacağı sorusuna cevap aramak olduğu için optimal bölge seçim problemi, depo yeri seçiminden (Oral vd., 2021) tesis yeri seçimine (Ulutaş ve Karakuş, 2021), güneş santrali yer seçiminden (Schlecht & Meyer, 2021) hibrit santral yer seçimine (Barzehkar vd., 2021) kadar bir çok sektörde ele alınmıştır. Çözüm yöntemleri açısından literatür ele alındığında Monte Carlo simülasyonu (Kannan vd., 2021), bulanık mantık (Aydın vd., 2013; Rezai vd., 2018; Boyacı vd., 2021), doğrusal programlama (İlbahar vd., 2021) ve ÇKKV yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Optimal yer seçimi için literatürde kullanılan yöntemler analiz edildiğinde çoğunlukla ÇKKV yöntemlerinin tercih edildiği tespit edilmiştir. AHP (Carrión vd., 2008; Sánchez-Lozano vd., 2013; Uyan, 2017; Abdel-Basset vd., 2021; Settou vd., 2021), ANP (Lee vd., 2017), TOPSIS (Sánchez-Lozano vd., 2013; Akçay & Atak, 2018; Rezai vd., 2018; Wang vd., 2018), ELECTRE (Jun vd., 2014; Sánchez-Lozano vd., 2014), PROMETHEE (Abdel-Basset vd., 2021; Kheybari vd., 2021) ve VIKOR (Lee vd., 2017) yönteminin kullanıldığı çalışmalar dikkat çekmektedir. ÇKKV yöntemleri ayrı ayrı kullanımın dışında kombinasyonlarının kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. Literatürde yer alan çalışmalar sektör bazlı değerlendirildiğinde bu çalışmanın uygulama alanı olan enerji sektörüne ait birçok çalışmanın olduğu gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, nükleer santrali (Wang vd., 2018), hidroelektrik santrali (Chien vd., 2020), biokütle santrali (Wang vd., 2019; İlbahar vd., 2021; Memari vd., 2021), rüzgar santrali (Ari ve Gencer, 2020; Supçiller vd., 2020; Eroğlu, 2021; Abdel-Basset vd., 2021) ve güneş santrali (Sánchez-Lozano vd., 2013; Sánchez-Lozano vd., 2014; Uyan, 2017; Lee vd., 2017; Akçay & Atak, 2018; Settou vd., 2021) gibi tek kaynaktan üretim yapan tesislerin yer seçimi problemlerine çözüm önerileri sunmuşlardır. Bu santraller arasında en çok ele alınan problem rüzgar santralinin yer seçimi olup Rediske vd. (2021) bu çalışmaları sistematik bir literatür taraması ile derlemiştir. Tek santral tipini ele alan çalışmaların yanı sıra bu çalışmada incelenen hibrit santraller ile ilgili çalışmalar da mevcuttur. Yenilenebilir hibrit santraller arasında literatürde en çok güneş ve rüzgar santralinin entegre edildiği sistemler ele alınmıştır. İlk olarak Janke (2010) Colorado'daki hangi arazi sınıflarının yüksek rüzgar ve güneş potansiyeli ile ilişkili olduğunu belirleyip rüzgar ve güneş hibrit santrali için uygun alanları CBS ile incelemiştir. Ardından Aydın vd. (2013) güneş ve rüzgar hibrit santral için altı ana adımda bulanık ÇKKV yöntemleri ile yer seçimi problemini ele almışlardır. Jun vd. (2014) rüzgar ve güneş hibrit santrali kurulumu için makro alan seçimi problemlerine ELECTRE II yöntemini kullanarak çözüm önermişlerdir. Çalışmada 7 bölge ele alınmış olup 13 gösterge kullanılmıştır. Ulutaş (2015) makalesinde Ordu iline hibrit enerji santrali kurulumu için analiz çalışmaları yapmıştır. Engin vd. (2018) çalışmasında hibrit enerji sistemlerinin neden kullanılması gerektiğine ve kullanım için uygun kriterlerine değinilmiştir. Türkiye için ÇKKV yöntemleri ile yenilenebilir enerji alternatiflerinin analizi içeren bir çalışmadır. Rezaei vd. (2018) Bulanık TOPSIS ve Weibull dağılımı ile İran'ın Fars kentinde bir rüzgar-güneş hibrit santralinin inşası için 7 bölge arasından en iyi yeri belirlemeyi amaçlamışlardır. Son olarak Barzehkar vd., (2021) İran'ın İsfahan kentinde rüzgar ve güneş enerjisi hibrit santrale yer seçimi için karar destek araçları önermişlerdir. Önerilen modelde ÇKKV yöntemlerinden AHP kullanılmıştır.

Bu literatür taraması sonucunda çalışmaların uygulama alanı ve yöntemlerine göre özeti Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Hibrit tesis yeri seçimi literatürü

Yazarlar	Uygulama alanı	Kullanılan Yöntemler
Özkan (2007)	Personel seçiminde karar verme yöntemlerinin kullanılması	AHP, ELECTRE ve TOPSIS
Carrión vd. (2008)	fotovoltaik enerji santrali yer seçimi	AHP, CBS
Ulucan vd. (2009)	Enerji projelerinin değerlendirilmesinde ÇKKV yönteminin belirlenmesi	ELECTRE, PROMETHEE
Janke (2010)	Güneş-rüzgar santrali için yer seçimi	CBS
Çiçek vd. (2011)	Kırıkkale'nin il çevre durumu	Sistem analizi
Aydın vd. (2013)	Güneş-rüzgar santrali için yer seçimi	Bulanık ÇKKV yöntemleri
Sánchez-Lozano vd. (2013)	Fotovoltaik enerji santrali yer seçimi	AHP, TOPSIS ve CBS
Yun-na vd. (2013)	Güneş-rüzgar santrali için yer seçimi	Matter-Element Extension
Jun vd. (2014)	Güneş-rüzgar santrali için yer seçimi	ELECTRE-II
Sánchez-Lozano vd. (2014)	Güneş santrali için yer seçimi	CBS, ELECTRE-III
Ulutaş (2015)	Kırsal tesislerde hibrit sistem tasarımı ve analizi	Sistem analizi
Uyan (2017)	Güneş enerjisi santrali yer seçimi	AHP, CBS
Lee vd. (2017)	Fotovoltaik enerji santrali yer seçimi	Bulanık ANP ve VIKOR
Akçay & Atak (2018)	Güneş enerjisi optimal yer seçimi	AHP, TOPSIS
Rezaei vd. (2018)	Güneş-rüzgar santrali için yer seçimi	Bulanık TOPSIS ve Weibull dağılımı
Wang vd. (2018)	Enerji üretim tesisi yer seçimi	Bulanık ANP ve TOPSIS
Wu vd. (2019)	Enerji depolama alanı yer seçimi	Bulanık TODIM
Supçiller vd. (2020)	Rüzgar santrali yer seçimi	A-GİA, EDAS
Yapıcı vd. (2020)	Medikal depo yeri seçimi	AHP ve ANP
Oral vd. (2021a)	Tehlikeli madde deposu yer seçimi	AHP ve ANP
Oral vd. (2021b)	Tesis yer seçimi	AHP, ANP ve PROMETHEE

Yapılan literatür taraması sonucunda araştırmacıların tesis yeri seçimi probleminin çok kriterli yapısını dikkate alarak ÇKKV yöntemlerine yöneldiği görülmüştür. Tablo 1'de görüldüğü gibi ÇKKV tipi problemlerde ve özellikle yer seçimi problemlerinde en çok AHP yöntemi kullanıldığı anlaşılmaktadır. Hibrit enerji santrali için optimal yer seçim probleminin çözümünde araştırmacılar tarafından çeşitli alternatifler ve kriterler ele alınmıştır. Yenilebilir enerji sistemleri yer seçim problemlerinde literatürde çeşitli kriterler kullanılsa da çoğunlukla güneş enerjisi potansiyeli en önemli kriter olduğu anlaşılmıştır. Tesis yeri seçiminde çalışmaların güneş enerjisi tesisi ve rüzgar tesisi gibi tek bir yenilenebilir enerji türü üzerinde araştırmalar yapılmıştır, hibrit enerji tesisi olarak ele alınan çalışmaların diğer sistemlere nazaran daha az olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın literatüre katkıları aşağıda verilmiştir.

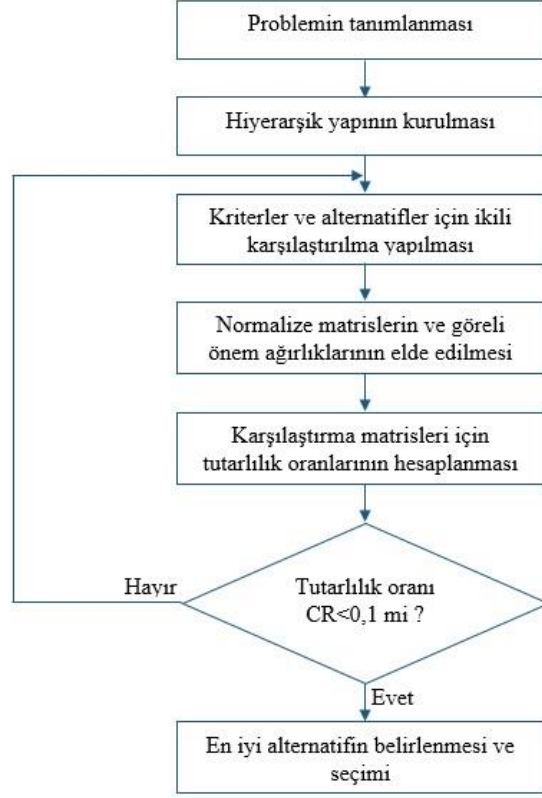
- Literatürde ilk kez hibrit enerji santrali yeri seçimi problemine AHP, TOPSIS ve COPRAS yöntemleri ile üç farklı model önerilmiştir.
- Önerilen modellere duyarlılık analizi yapılarak 30 farklı çözüm ile modellerin geçerliliği sağlanmıştır.
- Literatürde ilk defa hibrit enerji santrali yer seçimi problemi Kırıkkale ilinde değerlendirilmiş olup ele alınan alternatifler yenilik taşımaktadır.
- Ele alınan kriterler literatürde yer almakta olup bu çalışmada ele alınan alternatifler için ilk defa kullanılmıştır.
- Önerilen modellerin sonuçları istatistiksel analiz yöntemleri ile kıyaslanmıştır.

4. Kullanılan Yöntemler

Hibrit enerji tesis yer seçimi çok kriterli bir karar verme problemidir. Çalışma kapsamında güneş santrali yer seçimi ve rüzgar gülleri yer seçim çalışmaları incelenmiş ve bu problemin çözümü için AHP, TOPSIS ve COPRAS yöntemleri kullanılmasına karar verilmiştir.

4.1. AHP Yöntemi

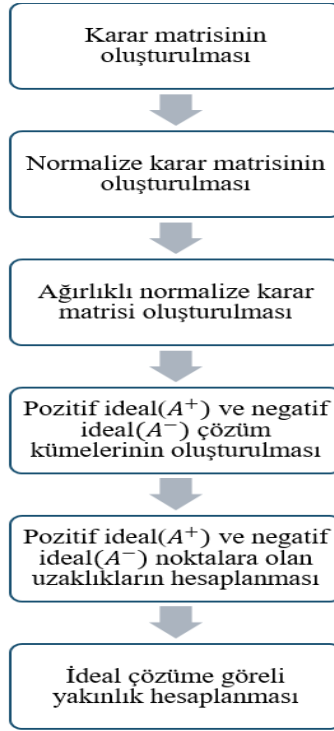
AHP ÇKKV problemlerinde kullanılan bir yöntemdir. AHP tekniğinde en üst düzeyde bir amaç ve bu amacın altında sırasıyla kriterler, alt-kriterler ve alternatiflerden oluşan hiyerarşik bir model kullanılmaktadır. Bu yöntem sayesinde kriterlerin amaca katkısı bulunur, kriter ağırlıkları oluşturulur, önem ağırlıkları elde edilir, karşılaştırma matrislerinin tutarlılık oranları hesaplanır, tutarlılık oranı 0,1'den küçük olma testine tabii tutulur ve alternatiflerin arasından optimum alternatif belirlenir (Özcan vd., 2019). Şekil 1'de AHP yönteminin adımları özet bir şekilde verilmiş olup yöntem adımlarını ayrıntılı bir şekilde anlatan çalışmalar literatürde mevcuttur (Özcan vd., 2019)



Şekil 1: AHP yöntemi akış şeması (Turgut vd., 2020)

4.2. TOPSIS Yöntemi

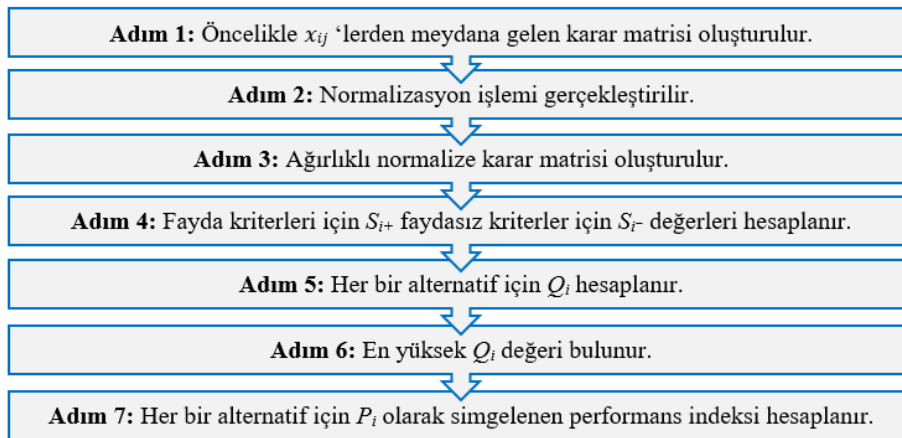
Çok kriterli karar verme yöntemlerinden birisi olan TOPSIS, birçok alanda kullanılmaktadır. Bu yöntem temel olarak negatif ideal çözüm ve pozitif ideal çözüm oluşturmaktadır. Bu yöntem ideal çözüme göre alternatiflerin sıralanması esasına dayanmaktadır. İdeal çözüme görece yakın olan alternatiften başlamak üzere bir sıralama yapıp ardından sırası ile diğer alternatiflerin görece yakınlığı tespit edilmektedir. TOPSIS yönteminin aşamalarından bahsedilirse ilk olarak alternatiflerin, kriterlere göre değerleri yazılmasıyla oluşturulan karar matrisinin ardından her alternatifin, her kriter sütununda hücrel olarak hesaplanması ile normalize matris oluşturulur. Normalize matris tablosu, AHP kriter ağırlıkları ile çarpılarak ağırlıklı normalize karar matrisi oluşturulur. Ağırlıklı karar matrisi tablosundan pozitif ideal ve negatif ideal çözüm kümeleri oluşturulur. Oluşturulan çözüm kümelerine göre pozitif ideal ve negatif ideal noktalara olan uzaklıklar hesaplanır. Hesaplanan uzaklıklar ardından ideal çözüme görece yakınlık hesaplanır (Soba & Eren, 2011). TOPSIS yönteminin adımları özetlenerek Şekil 2’de verilmiştir. Yöntem adımlarını ayrıntılı bir şekilde anlatan çalışmalar literatürde mevcuttur (Özcan vd., 2019).



Şekil 2: TOPSIS yöntemi akış şeması (Özcan vd., 2019)

4.3. COPRAS Yöntemi

ÇKKV yöntemlerinden biri olan COPRAS 1994 yılında geliştirilmiştir (Zavadskas vd., 1994). COPRAS çok kriterli değerlendirmede maksimum ve minimum kriter değerleri için kullanılabilir. COPRAS yöntemi, çok sayıda alternatif ve karmaşık kriterler içeren problemlere kolaylıkla uygulanabilmektedir (Özcan vd., 2021). COPRAS yönteminin uygulama adımları Şekil 3'te verilmiştir. İlk olarak karar matrisi oluşturulur. İkinci adımda normalizasyon işlemi gerçekleştirilir. Ardından kriter ağırlıkları normalize karar matrisi ile çarpılarak ağırlıklı normalize karar matrisi oluşturulur. Dördüncü adımda faydasız kriterler için S_i^- , faydalı kriterler için S_i^+ değerleri hesaplanır. Ardından her bir alternatif için Q_i değerleri hesaplanır. Altıncı adımda maksimum Q_i değeri bulunur. Son adımda ise alternatifler için P_i değerleri hesaplanır. COPRAS yönteminin uygulama adımlarını ayrıntılı bir şekilde anlatan çalışmalar literatürde mevcuttur (Özcan vd., 2021).

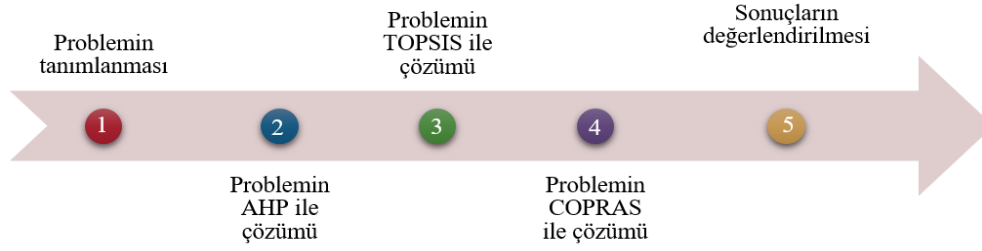


Şekil 3: COPRAS yöntemi akış şeması (Özcan vd., 2021)

5. Uygulama

Bu çalışmada yenilenebilir enerji sistemlerinden birkaçının kombine edilerek kullanıldığı hibrit enerji sistemleri için Kırıkkale ilinde optimal yer seçim problemine bir çözüm yaklaşımı sunulmuştur. Çözüm aşamasında, öncelikle AHP yöntemi ile kriter ağırlıkları

tespit edilmiş daha sonra elde edilen bu kriter ağırlıkları TOPSIS ve COPRAS yöntemlerinde kullanılarak nihai sonuca ulaşılmıştır. Üç yöntemden de elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak hibrit enerji sistemi için optimal yer seçimi yapılmıştır. Uygulamanın süreci Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4: Uygulama akış şeması

5.1. Problemin Tanımlanması

Günümüzde gelişen teknoloji ile artan enerji talebi doğrultusunda ülkeler yeni enerji kaynakları arayışına girmişlerdir. Bu bağlamda birden çok yenilenebilir enerji kaynağını tek bir tesis içinde toplayan hibrit enerji sistemi üzerinde girişimler gün geçtikçe artmaktadır. Kırıkkale ilinde güneş ve rüzgar enerjisinden yüksek verimlilik sağlamak adına yapılan bu çalışmada bilimsel yöntemler kullanılarak hibrit enerji santrali kurulumu için yer seçimi problemi ele alınmıştır.

5.2. Alternatifler

Hibrit enerji santrali kurmak için alternatifler belirlenirken, hibrit enerji santrali kurulumu için potansiyeli olan fakat daha önce bu konuda değerlendirilmeyen Kırıkkale ilinin ilçeleri ele alınmıştır. Alternatifler: Balışeyh, Bahşili, Çelebi, Delice, Keskin, Karakeçili, Kırıkkale Merkez, Yahşihan, Sulakyurt ilçeleri olarak seçilmiştir.

5.3. Kriterler

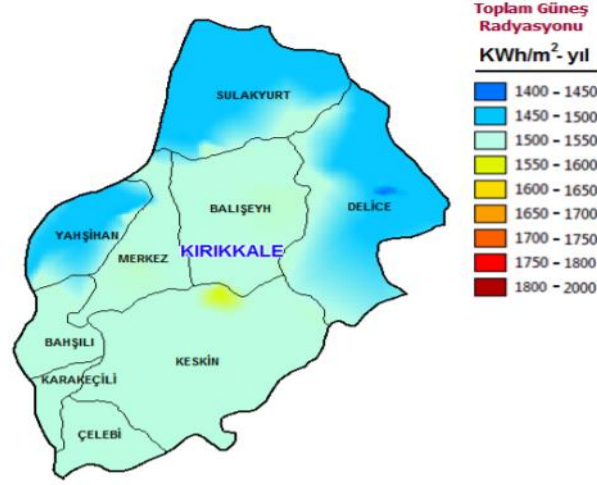
Kriterler belirlenirken daha önce yapılmış çalışmalar ve literatür araştırmalarından yararlanılmıştır. Bu araştırmalara göre güneş ve rüzgar enerjisi santralının kurulumu için ideal bölge seçiminde dikkate alınması gereken kriterler ele alınmıştır. Yapılan literatür araştırmasında literatürdeki Uyan (2017)'in çalışmasındaki kriterler incelendiğinde bu çalışma için güneş enerjisi potansiyeli, trafo merkezine uzaklık, eğim ve arazi kullanımı kriterlerinin kullanılması kararlaştırılmıştır. Hibrit enerji tesisinin bir diğer önemli kriteri olan rüzgar hızının belirlenmesinde ise literatürdeki Pınar vd. (2020) çalışması incelenmiş ve sonuç olarak bu çalışma için rüzgar hızı kriterinin kullanılması kararlaştırılmıştır. Arazi maliyeti kriteri ise santral yer seçimi için önemli olup Azadeh vd. (2011) çalışmasında ele alınmıştır. Buna göre amacımızı etkileyen güneş enerjisi potansiyeli, rüzgar hızı, trafo merkezine uzaklık, eğim, arazi maliyeti ve arazi kullanımı olarak 6 kriter belirlenmiştir. Kriterlerin kullanıldığı çalışmalar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2: Ele alınan kriterlerin kullanıldığı çalışmalar

Kriterler	Kriteri kullanan çalışmalar
Trafo merkezine uzaklık	Carrión vd. (2008); Azadeh vd. (2011); Aydın vd. (2013); Sánchez-Lozano vd. (2014); Uyan (2017)
Güneş enerjisi potansiyeli	Clifton ve Boruff (2010); Aydın vd. (2013); Sánchez-Lozano vd. (2014); Uyan (2017)
Eğim	Carrión vd. (2008); Dawson ve Schlyter (2012); Aydın vd. (2013); Sánchez-Lozano vd. (2014)
Arazi maliyeti	Azadeh vd. (2011)
Arazi kullanımı	Clifton ve Boruff (2010); Uyan (2017)
Rüzgar hızı	Jun vd. (2014); Pınar vd. (2020)

5.3.1. Güneş enerjisi potansiyeli (K1)

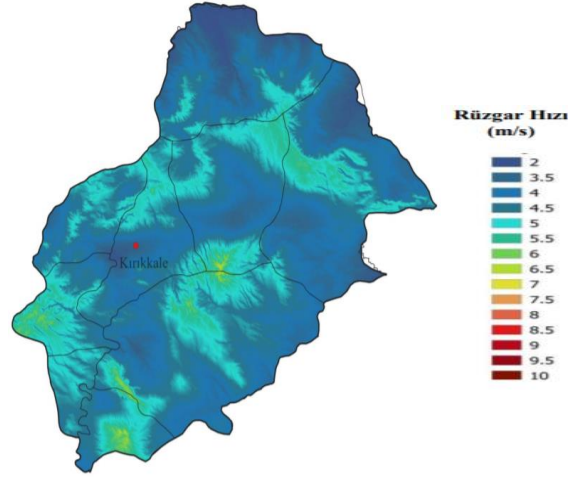
Kırıkkale ili için GEPA ve Ahiler Ajansının çalışmasının (Güneş enerjisi raporu) içinde bulunan toplam güneş enerjisi radyasyonu değerleri kullanılmıştır. Söz konusu değerler Şekil 5’te gösterilmiş ve bu değerler güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan ilçelerin seçimi için uygun olup, santralin kurulmasında önemli rol oynayan bir husustur. Bahsi geçen Şekil 5’teki haritada toplam güneş enerjisi radyasyonu değerleri, yandaki verilen toplam güneş radyasyonu skalasından okunarak tespit edilmektedir. Örnek olarak Yahşihan ilçesinde ortalama 1450-1500 güneş radyasyonu değeri okunmaktadır.



Şekil 5: Kırıkkale Güneş radyasyonu haritası

5.3.2. Rüzgar hızı (K2)

Kırıkkale rüzgar enerjisi potansiyel haritası (Rüzgar enerjisi haritası-Kırıkkale) dikkate alınarak Kırıkkale ilçelerinin rüzgar hızları incelenmiştir. Söz konusu inceleme verileri Şekil 6'da gösterilmiştir. Rüzgar hızı üretilen elektrik enerjisi ile doğru orantılı olduğu için önemlidir. Santralin kurulmasında enerjinin sağlanacağı başka bir kaynak rüzgar olduğu için rüzgar hızı önemli bir kriterdir. Rüzgar hızı ilçelerin farklı bölgelerinde farklı birer değer olarak okunmakla birlikte, ilçe için bir rüzgar değeri belirlenirken yoğunluklu olarak var olan rüzgar hızı ele alınmıştır. Örnek olarak Sulakyurt ilçesinin büyük bir bölümünde rüzgar 4 m/s olduğu için Sulakyurt'un rüzgar hızı değeri 4 m/s'dir.



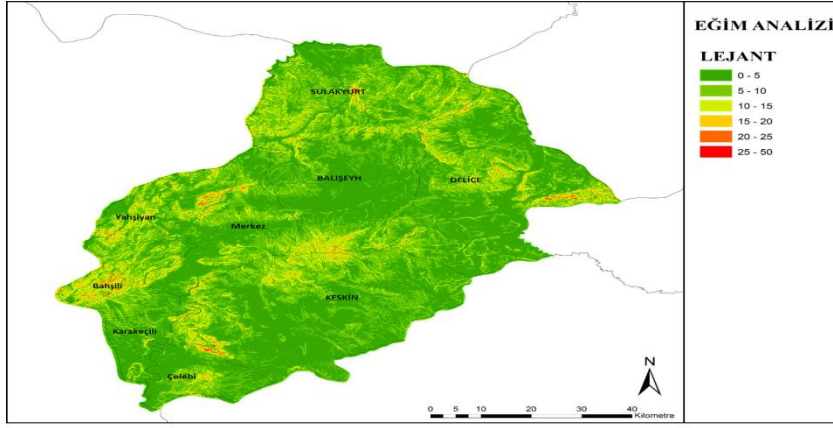
Şekil 6: Kırıkkale rüzgar hızı haritası

5.3.3. Trafo merkezine uzaklık (K3)

Trafo merkezine uzaklık elde edilen elektrik enerjisinin merkezlere ulaşmasına etki eden bir kriterdir. Trafo merkezinden uzaklaştıkça elde edilen elektriğin merkezlere ulaştırılmaya kadar bir kısmı ısı enerjisine dönüşerek kayıp yaşanır ve bu istenmeyen bir durumdur. Kırıkkale'nin trafo adresi, Kırıkkale il çevre durum raporundan merkeze olan uzaklık verileri ile kıyaslanarak sonuca varılmıştır (Kırıkkale ili 2018 yılı çevre durum raporu). Uyan (2017) çalışmasında bahsedilen +10 km uzaklık dağıtımında yüksek enerji kaybına neden olduğu için +10 km uzaklıktaki tüm ilçelere eşit ağırlık verilmiştir.

5.3.4. Eğim (K4)

Eğim, rüzgar ve güneş enerjisinin bulunduğu hibrit enerji santralleri için önemli bir kriterdir. Uygun tesis alanları için eğimin %3'ten küçük olması daha uygundur (Lan, 2008). İlçelerin eğimlerinin farklı olması ve amaca etki etmesi nedeniyle kriter olarak değerlendirilmiştir. Dem haritası eğim bilgileri (Viewfinder Panoramas) ArcGIS programı ile Şekil 7'deki eğim haritasına dönüştürülmüştür. Eğim verileri üzerine hiçbir çalışma bulunmadığı için harita üzerinden puanlama yapılmıştır. Puanlama yöntemi, yüz ölçümü / renk tonlarına göre en eğimsiz ilçeye 100 puan verilip, geriye kalan ilçelere ise 100 puan verilen ile kıyaslanması sonucunda puan verilmesi mantığına dayanmaktadır. Örneğin Balıışeyh ilçesi yüz ölçümü / koyu yeşil oranına bakılınca en az eğim olan ilçe olduğu için 100 puan verilip, Başılı'nın yüz ölçümü / koyu yeşil oranı Balıışeyh ile kıyaslanınca 20 puan alır.



Şekil 7: Kırıkkale eğim haritası

5.3.5. Arazi maliyeti (K5)

Santralin kurulacağı alanın arazi maliyeti, yer seçimine etki etmektedir ve uygun fiyatlı olması istenmektedir. İlçelerin arazi maliyetleri farklı olduğu ve amaca etki ettiği için kriter olarak alınmıştır (Karadağ Albayrak, 2020). Arazi maliyetleri Kırıkkale ili il çevre durum raporunda bulunan verilerden alınarak kullanılmıştır (Çiçek vd., 2011).

5.3.6. Arazi kullanımı (K6)

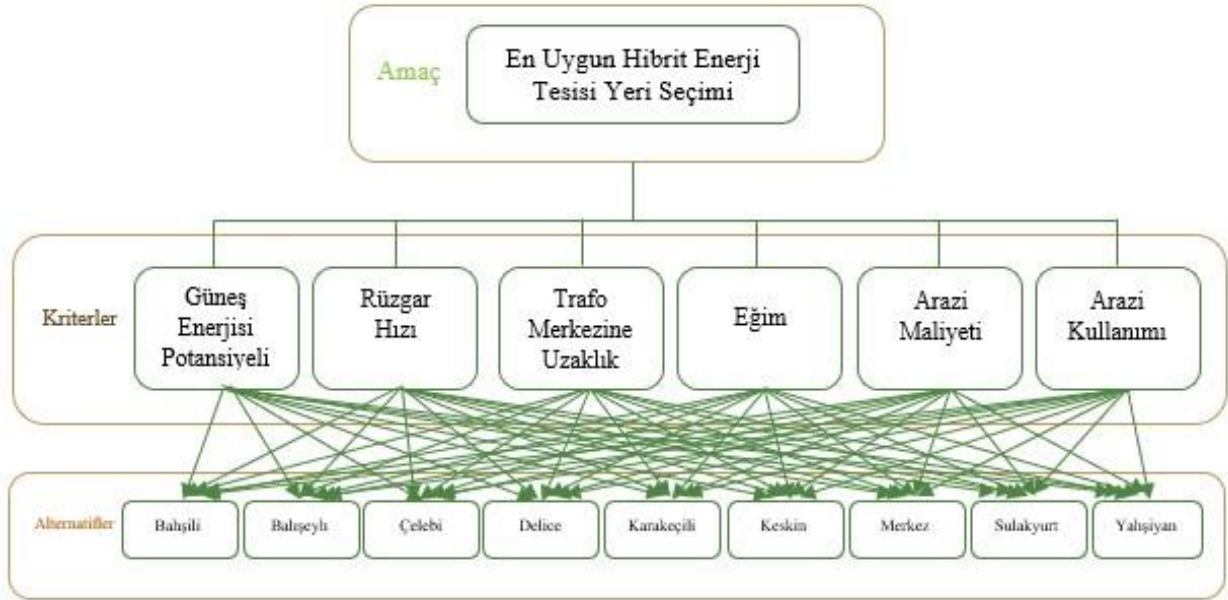
Bu tip santrallerin kurulacağı alanlar tarım arazilerini, canlı ve yerleşik hayatları olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle santral kurulumu için kıraç araziler daha uygundur. İlçelerin kıraç arazi alanları farklı olduğu için önemli bir kriter olarak alınmıştır. Arazi kullanımı verileri Kırıkkale il çevre durum raporunda bulunan verilerden alınarak kullanılmıştır (Çiçek vd., 2011).

5.4. Problemin Çözümü

Karar verilmek istenen problemle ilgili veriler toplanmıştır. Optimal çözüme ulaşabilmek için toplanan veriler AHP, TOPSIS ve COPRAS yöntemlerinde kullanılmaya uygun hale getirilmiştir ve işleme konulmuştur.

5.4.1. Problemin AHP yöntemi ile çözümü

AHP yöntemi adımları, yapılan araştırmalar ve elde edilen veriler doğrultusunda en uygun optimal çözümün bulunması amaçlanmıştır. İlk olarak hiyerarşik yapı oluşturulmuştur. AHP yönteminde hibrit enerji tesisi yeri seçiminde oluşturulan kriterler ve alternatiflerin hiyerarşik yapısı Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 8: AHP karar hiyerarşisi

Hiyerarşik yapı oluşturulduktan sonra Saaty'nin önem skalası baz alınarak Tablo 3'teki gibi kriterler ve kriterler temelinde alternatifler birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Tablo 3: Kriter arası ikili karşılaştırma matrisi

Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6
K1	1	5	3	5	2	3
K2	0,2	1	2	3	0,33	2
K3	0,33	0,5	1	2	0,33	1
K4	0,2	0,33	0,5	1	0,5	1
K5	0,5	3	3	2	1	1
K6	0,33	0,5	1	1	1	1

AHP yöntemi ile kriterler arasında ikili karşılaştırma yapılarak sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Her kriter için oluşturulan ikili karşılaştırma matrisleri Ek 1'de verilmiştir.

Tablo 4: Normalize Karar Matrisi

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
K1	0,39	0,48	0,28	0,36	0,39	0,33
K2	0,08	0,1	0,19	0,21	0,06	0,22
K3	0,13	0,05	0,09	0,14	0,06	0,11
K4	0,08	0,03	0,05	0,07	0,1	0,11
K5	0,19	0,29	0,29	0,14	0,19	0,11
K6	0,13	0,05	0,09	0,07	0,19	0,11

Tablo 4'teki normalize matrisin sonucunda kriter ağırlıkları sırası ile 0.373, 0.144, 0.099, 0.073, 0.204, 0.108 bulunmuş olup toplamları 1 ve tutarlılık oranı 0,07 olarak hesaplanmıştır. Bulunan kriter ağırlıkları ile yapılan AHP uygulaması sonucunu göre Tablo 5'te görüldüğü gibi santral kuruluşu için en uygun yer seçimi Keskin ilçesi seçilmiştir.

Tablo 5: AHP sonuçları

Alternatifler	Ağırlıklar	Sıralama
Keskin	0,207	1
Karakeçili	0,132	2
Bahşili	0,118	3
Bahşeyh	0,110	4
Kırıkkale Merkez	0,107	5
Çelebi	0,106	6
Yahşihan	0,096	7
Sulakyurt	0,065	8
Delice	0,054	9

5.4.2. Problemin TOPSIS yöntemi ile çözümü

AHP yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları, TOPSIS yöntemi aşamasında alternatiflerin sıralanmasında kullanılmıştır. Öncelikli olarak problem tanımlandıktan sonra çözümün ilk aşamasında satırlar karar noktalarını, sütunlar ise faktörleri göstermek üzere Tablo 6'da gösterildiği gibi m x p boyutlu karar matrisi oluşturulmuştur.

Tablo 6: TOPSIS karar matrisi

		Kriterler						
		Kod	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Alternatifler	Bahşili	A1	1480	5,4	4	20	0,15	4668
	Balıseyh	A2	1469	6	23	100	0,12	4248
	Çelebi	A3	1490	5,5	52	40	0,1	2868
	Delice	A4	1454	5,5	55	60	0,12	2000
	Karakeçili	A5	1483	4,5	34	40	0,1	5200
	Keskin	A6	1482	7	26	90	0,1	24527
	Kırıkkale Merkez	A7	1465	5,3	1	70	0,15	4664
	Sulakyurt	A8	1442	4	53	50	0,12	12100
	Yahşihan	A9	1450	5,5	6	30	0,15	9000

Kriterler arasındaki verilerde birim farklılıkları olduğu için Tablo 6'daki veriler kullanılarak korelasyon yöntemi ile 0-100 değerleri arasında puanlandırılması yapılmıştır. Bu puanlandırma Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7: Korelasyon yöntemi ile 0-100 arasında puanlandırılmış karar matrisi

		Kriterler					
		K1	K2	K3	K4	K5	K6
Alternatifler	Bahşili	99,33	77,14	90	20	66,66	19,03
	Balıseyh	98,59	85,71	20	100	83,33	17,32
	Çelebi	100	78,57	20	40	100	11,69
	Delice	97,58	78,57	20	60	83,33	8,15
	Karakeçili	99,53	64,29	20	40	100	21,2
	Keskin	99,46	100	20	9	100	100
	Kırıkkale Merkez	98,32	75,71	100	70	66,66	19,02
	Sulakyurt	96,78	57,14	20	50	83,33	49,33
	Yahşihan	97,32	78,57	80	30	66,66	36,69

Korelasyon yöntemi ile elde edilen Tablo 7'deki puanlandırılmış karar matrisi üzerinde Şekil 2'de gösterilen TOPSIS adımları sırası ile uygulanmıştır.

Tablo 8: Si+, Si- ve İdeal Çözüme Yakınlık Değerleri

Alternatifler	S_i^+	S_i^-	C_i
Bahşili	8.42	4.51	0.349
Balıseyh	8.81	4.05	0.315
Çelebi	9.47	3.39	0.264
Delice	9.66	2.61	0.213
Karakeçili	8.98	3.33	0.271
Keskin	4.85	9.35	0.659
Kırıkkale Merkez	7.81	5.44	0.411
Sulakyurt	7.46	4.09	0.354
Yahşihan	7	4.60	0.397

Tablo 7'deki puanlandırılmış karar matrisi üzerinde sırası ile uygulanan TOPSIS adımları sonucunda Tablo 8'deki pozitif ideal ve negatif ideal çözüm değerlerine olan uzaklık değerleri ve ideal çözüme göreli yakınlık değerleri bulunmuştur. Çözüm aşamalarında problem amacı göz önünde bulundurularak Tablo 9'daki ideal çözüm sonuçlarına ulaşılmıştır.

Tablo 9: TOPSIS sonuçları

Alternatifler	İdeal Çözüm Değerleri	Sıralama
Keskin	0,659	1
Kırıkkale Merkez	0,411	2
Yahşihan	0,397	3
Sulakyurt	0,354	4
Bahşili	0,349	5
Bahşeyh	0,315	6
Karakeçili	0,271	7
Çelebi	0,264	8
Delice	0,213	9

TOPSIS uygulamasına göre hibrit enerji santralinin Keskin'e kurulması uygun görülmüştür.

5.4.3. Problemin COPRAS yöntemi ile çözümü

AHP yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları, COPRAS yöntemi aşamasında alternatiflerin sıralanmasında kullanılmıştır. TOPSIS yönteminin aksine veriler dönüşüm uygulanmadan ham hali ile kullanılmıştır. Başka bir ifade ile Tablo 6'da verilen karar matrisi hiçbir işlem uygulanmadan faydalı faydasız kriter ayırımı yapılarak kullanılmıştır. Güneş radyasyonu, rüzgar hızı, eğim ve arazi kullanımı faydalı kriter, trafo merkezine uzaklık ve arazi maliyeti faydasız kriter olarak dikkate alınmıştır. Trafo merkezinden uzaklaştıkça elde edilen elektriğin merkezlere ulaştırılmaya kadar bir kısmı ısı enerjisine dönüşerek kayıp yaşanır ve bu durumdan dolayı faydasız kriter olarak değerlendirilmiştir. Arazi maliyeti ise ilk yatırım maliyetini etkileyen önemli bir kalem olup karın maksimum seviyeye ulaşması için maliyetin minimum seviyede tutulması gerekmektedir. Bu sebepten dolayı faydasız kriter olarak ele alınmıştır. Yapılan kriter ayırımının ardından normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Normalize karar matrisi Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10: Normalize karar matrisi

	Kriterler					
	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Bahşili	0,112	0,111	0,016	0,040	0,135	0,067
Bahşeyh	0,111	0,123	0,091	0,200	0,108	0,061
Çelebi	0,113	0,113	0,205	0,080	0,090	0,041
Delice	0,110	0,113	0,217	0,120	0,108	0,029
Karakeçili	0,112	0,092	0,134	0,080	0,090	0,075
Keskin	0,112	0,144	0,102	0,180	0,090	0,354
Kırıkkale Merkez	0,111	0,109	0,004	0,140	0,135	0,067
Sulakyurt	0,109	0,082	0,209	0,100	0,108	0,175
Yahşihan	0,110	0,113	0,024	0,060	0,135	0,130

Normalizasyon işleminin ardından AHP yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak ağırlıklı normalize karar matrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan matris Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11: Ağırlıklı normalize karar matrisi

	Kriterler					
	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Bahşili	0,042	0,016	0,002	0,003	0,028	0,007
Bahşeyh	0,041	0,018	0,009	0,015	0,022	0,007
Çelebi	0,042	0,016	0,020	0,006	0,018	0,004
Delice	0,041	0,016	0,021	0,009	0,022	0,003
Karakeçili	0,042	0,013	0,013	0,006	0,018	0,008
Keskin	0,042	0,021	0,010	0,013	0,018	0,038
Kırıkkale Merkez	0,041	0,016	0,000	0,010	0,028	0,007
Sulakyurt	0,041	0,012	0,021	0,007	0,022	0,019
Yahşihan	0,041	0,016	0,002	0,004	0,028	0,014

COPRAS çözümünde son olarak sırasıyla S_i^+ , S_i^- , Q_i ve performans indeksi hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda elde edilen değerler Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12: S_i^+ , S_i^- , Q_i ve performans indeksi değerleri

Alternatifler	S_i^+	S_i^-	Q_i	Performans indeksi
Bahşili	0,068	0,029	0,106	69,266
Balışeyh	0,080	0,031	0,116	75,950
Çelebi	0,069	0,039	0,097	63,652
Delice	0,069	0,043	0,094	61,924
Karakeçili	0,069	0,032	0,104	68,105
Keskin	0,114	0,028	0,153	100,000
Kırıkkale Merkez	0,074	0,028	0,114	74,597
Sulakyurt	0,079	0,043	0,104	68,485
Yahşihan	0,076	0,030	0,112	73,656

5.5. Sonuçların Karşılaştırılması

Yapılan AHP, TOPSIS ve COPRAS uygulamaları sonucunda Keskin birinci sırada yer almıştır. Son sırada ise Delice yer almaktadır. Ara sıralamalar farklı yöntem uygulamalarına göre değişmekle birlikte ilk sırada Keskin ilçesinin çıkması hibrit enerji santralının bu ilçede kurulması gerektiğine işaret etmektedir. Sonuçların karşılaştırılması Tablo 13’te verilmiştir.

Tablo 13: AHP, AHP-TOPSIS VE AHP-COPRAS sonuçlarının karşılaştırılması

Sıralama	AHP sonucu	AHP-TOPSIS sonucu	AHP-COPRAS sonucu
1	Keskin	Keskin	Keskin
2	Karakeçili	Kırıkkale Merkez	Balışeyh
3	Bahşili	Yahşihan	Kırıkkale Merkez
4	Balışeyh	Sulakyurt	Yahşihan
5	Kırıkkale Merkez	Bahşili	Bahşili
6	Çelebi	Balışeyh	Sulakyurt
7	Yahşihan	Karakeçili	Karakeçili
8	Sulakyurt	Çelebi	Çelebi
9	Delice	Delice	Delice

Çalışmada 9 farklı alternatif 3 farklı yöntem kullanılarak sıralanmıştır. Sıralama sonuçları için yöntemler arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amacıyla Spearman sıra korelasyon yöntemi SPSS Statistics programı ortamında kullanılmıştır. Sonuçlar Şekil 9’da sunulmuştur.

Correlations

			AHP	TOPSIS	COPRAS
Spearman's rho	AHP	Correlation Coefficient	1,000	,350	,603
		Sig. (2-tailed)	.	,356	,086
		N	9	9	9
	TOPSIS	Correlation Coefficient	,350	1,000	,795*
		Sig. (2-tailed)	,356	.	,010
		N	9	9	9
	COPRAS	Correlation Coefficient	,603	,795*	1,000
		Sig. (2-tailed)	,086	,010	.
		N	9	9	9

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Şekil 9. Korelasyon Analizi

Şekil 9’da sunulan veriler incelendiğinde TOPSIS ve COPRAS çözümleri arasındaki korelasyon değeri 0,795 ile en yüksek değere sahiptir bu iki yöntem arasındaki pozitif yönlü yüksek bir ilişkinin olduğunu göstermektedir. TOPSIS-COPRAS arasındaki ilişkinin ardından diğer en yüksek ilişki değeri 0,603 ile AHP-COPRAS arasındadır. Tablo 13’te bulunan sonuçlar incelendiğinde de bu pozitif yönlü ilişkiler görülebilmektedir.

5.6. Duyarlılık Analizi

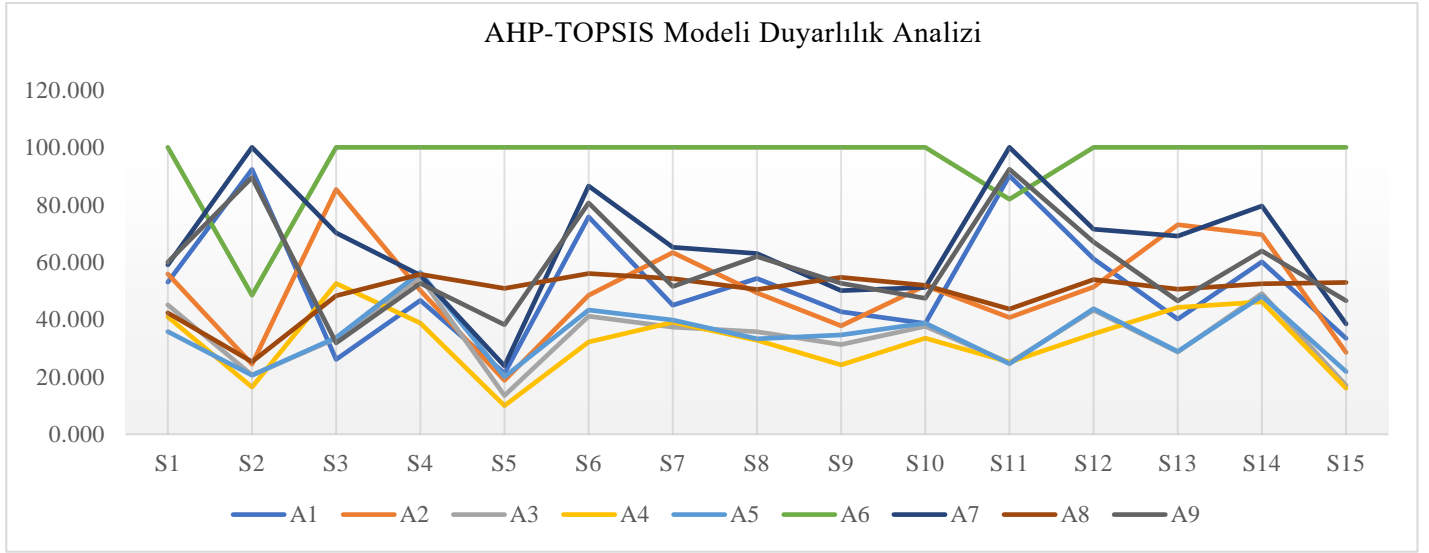
Duyarlılık analizi, önerilen yaklaşımın veya çerçevenin doğruluğunu ve geçerliliğini sorgulamayı sağlar (Bulut & Özcan, 2021). Buradan hareketle, elde edilen sıralamaların istikrarlı olması amaçlanmıştır. Bu amaçla bu çalışmada, hibrit santralin kurulum aşamasında yer seçimi için önerilen yaklaşıma duyarlılık analizi yapılmıştır. AHP ile hesaplanan kriter ağırlıklarının alternatiflerin sıralamasına etkisi farklı senaryolar kullanılarak analiz edilmiştir. Bu senaryolar, ikili sistemde kriter ağırlıkları değiştirilerek üretilmiştir (Bulut & Özcan, 2021). Dolayısıyla 6 farklı kriterin ikili kombinasyonundan dolayı 15 farklı senaryo bulunmaktadır. Bu senaryolar hem TOPSIS yöntemi ile önerilen modelde hem de COPRAS yöntemi ile önerilen modelde uygulanmıştır. Tablo 14’te AHP-TOPSIS modeline ait duyarlılık analizine ait sonuçlar yer almaktadır. Bu analiz sonucunda 15 senaryo içerinden sadece ikisi önerilen AHP-TOPSIS modelinden farklı sonuç üretmiştir. Bunun sebebi ise K3 (trafo merkezine uzaklık) kriterinde en iyi alternatifinin A7 (Kırıkkale-Merkez) olmasıdır. K3 kriter ağırlığının diğerlerine göre daha küçük olduğu senaryolarda A7 alternatifi ilk sırada yer almamaktadır.

Tablo 14: AHP-TOPSIS modelinin duyarlılık analizi sonuçları

Senaryolar	Kriter Ağırlıkları						Sıralama Sonucu	Nihai Sonuç
	K1	K2	K3	K4	K5	K6		
AHP-TOPSIS	0,373	0,144	0,099	0,073	0,204	0,108	A6-A7-A9-A1-A8-A2-A5-A3-A4	A6
S1	0,144	0,373	0,099	0,073	0,204	0,108	A6-A9-A7-A1-A2-A3-A8-A4-A5	A6
S2	0,099	0,144	0,373	0,073	0,204	0,108	A7-A1-A9-A6-A8-A2-A5-A3-A4	A7
S3	0,073	0,144	0,099	0,373	0,204	0,108	A6-A2-A7-A4-A8-A9-A5-A3-A1	A6
S4	0,204	0,144	0,099	0,073	0,373	0,108	A6-A7-A9-A8-A5-A3-A1-A2-A4	A6
S5	0,108	0,144	0,099	0,073	0,204	0,373	A6-A8-A9-A7-A1-A5-A2-A3-A4	A6
S6	0,373	0,099	0,144	0,073	0,204	0,108	A6-A7-A9-A1-A8-A2-A5-A3-A4	A6
S7	0,373	0,073	0,099	0,144	0,204	0,108	A6-A7-A2-A9-A8-A1-A5-A3-A4	A6
S8	0,373	0,204	0,099	0,073	0,144	0,108	A6-A7-A9-A1-A8-A2-A3-A4-A5	A6
S9	0,373	0,108	0,099	0,073	0,204	0,144	A6-A7-A9-A1-A8-A2-A5-A3-A4	A6
S10	0,373	0,144	0,073	0,099	0,204	0,108	A6-A2-A8-A7-A9-A5-A3-A1-A4	A6
S11	0,373	0,144	0,204	0,073	0,099	0,108	A7-A9-A1-A6-A8-A2-A5-A3-A4	A7
S12	0,373	0,144	0,108	0,073	0,204	0,099	A6-A7-A9-A1-A8-A2-A5-A3-A4	A6
S13	0,373	0,144	0,099	0,204	0,073	0,108	A6-A2-A7-A8-A9-A4-A1-A5-A2	A6
S14	0,373	0,144	0,099	0,108	0,204	0,073	A6-A7-A2-A9-A1-A8-A3-A5-A4	A6
S15	0,373	0,144	0,099	0,073	0,108	0,204	A6-A8-A9-A7-A1-A2-A5-A3-A4	A6

AHP-TOPSIS modelinde Tablo 14’te verilen 15 senaryo uygulandığında elde edilen sonuçlar Şekil 8’de verilmiştir. Senaryo 2 (S2) ve Senaryo 11 (S11)’ de oluşan sonuç farklılıkları net bir şekilde görülmektedir.

Şekil 8: AHP-TOPSIS modelinin 15 farklı senaryo sonuçları



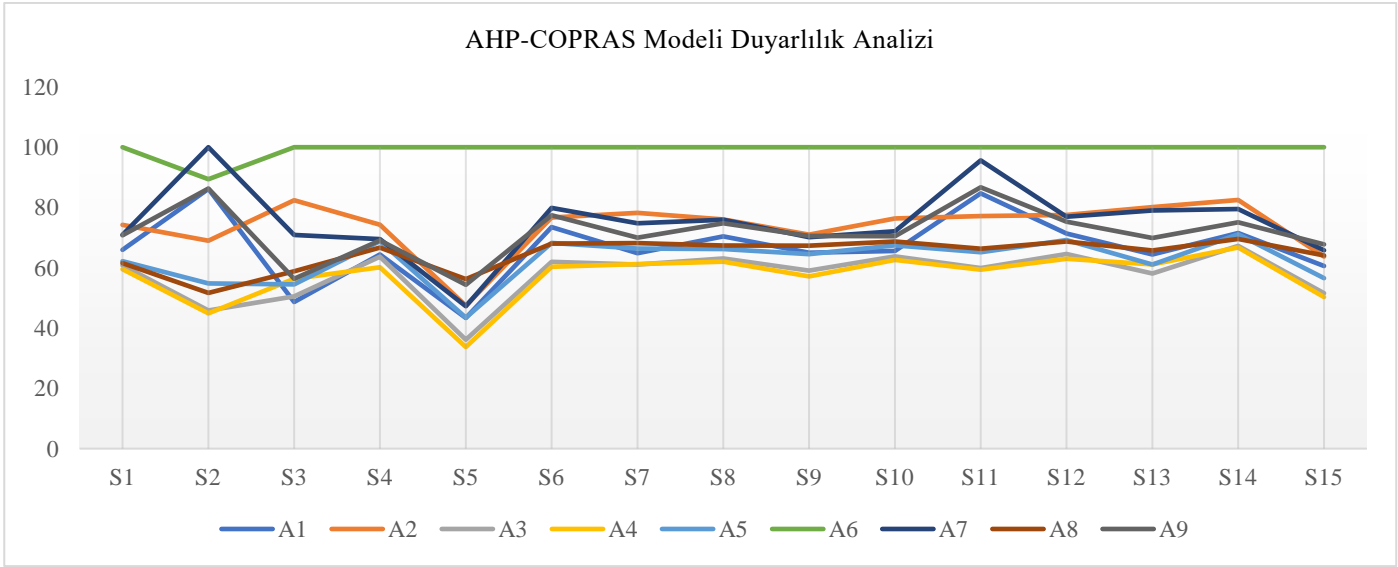
AHP-COPRAS modeline uygulanan duyarlılık analiz sonuçları Tablo 15'te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde AHP-TOPSIS modelindeki gibi K3 kriter ağırlığının yüksek olduğu ikinci senaryoda A7 alternatifi öne çıkmıştır. Fakat Senaryo 11 (S11)'de AHP-TOPSIS modelinin aksine A7 alternatifinin ikinci sırada kaldığı tespit edilmiştir. Bu durum COPRAS yönteminin TOPSIS yöntemine göre kriter ağırlıklarından daha az etkilendiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 15: AHP-COPRAS modelinin duyarlılık analizi sonuçları

Senaryolar	Kriter Ağırlıkları						Sıralama Sonucu	Nihai Sonuç
	K1	K2	K3	K4	K5	K6		
AHP-COPRAS	0,373	0,144	0,099	0,073	0,204	0,108	A6-A2-A7-A9-A1-A8-A5-A3-A4	A6
S1	0,144	0,373	0,099	0,073	0,204	0,108	A6-A2-A7-A9-A1-A5-A8-A3-A4	A6
S2	0,099	0,144	0,373	0,073	0,204	0,108	A7-A6-A9-A1-A2-A5-A8-A3-A4	A7
S3	0,073	0,144	0,099	0,373	0,204	0,108	A6-A2-A7-A8-A9-A4-A5-A3-A1	A6
S4	0,204	0,144	0,099	0,073	0,373	0,108	A6-A2-A7-A9-A5-A8-A1-A3-A4	A6
S5	0,108	0,144	0,099	0,073	0,204	0,373	A6-A8-A9-A7-A2-A1-A5-A3-A4	A6
S6	0,373	0,099	0,144	0,073	0,204	0,108	A6-A7-A2-A9-A1-A5-A8-A3-A4	A6
S7	0,373	0,073	0,099	0,144	0,204	0,108	A6-A2-A7-A9-A8-A5-A1-A3-A4	A6
S8	0,373	0,204	0,099	0,073	0,144	0,108	A6-A7-A9-A2-A1-A8-A5-A3-A4	A6
S9	0,373	0,108	0,099	0,073	0,204	0,144	A6-A2-A7-A9-A1-A8-A5-A3-A4	A6
S10	0,373	0,144	0,073	0,099	0,204	0,108	A6-A2-A7-A9-A8-A5-A1-A3-A4	A6
S11	0,373	0,144	0,204	0,073	0,099	0,108	A6-A7-A9-A1-A2-A8-A5-A3-A4	A6
S12	0,373	0,144	0,108	0,073	0,204	0,099	A6-A2-A7-A9-A1-A7-A5-A3-A4	A6
S13	0,373	0,144	0,099	0,204	0,073	0,108	A6-A7-A2-A9-A8-A1-A5-A4-A3	A6
S14	0,373	0,144	0,099	0,108	0,204	0,073	A6-A2-A7-A9-A1-A5-A8-A3-A4	A6
S15	0,373	0,144	0,099	0,073	0,108	0,204	A6-A9-A7-A8-A2-A1-A5-A3-A4	A6

AHP-COPRAS modelinde Tablo 15'te verilen 15 senaryo uygulandığında elde edilen sonuçlar Şekil 9'da verilmiştir. İlk sıradaki alternatif sadece Senaryo 2 (S2)'de değiştiği dikkat çekmektedir. Bunun dışında Senaryo 11 (S11)'de A7 alternatifi ilk sıraya çok yaklaşıp da ikinci sırada kalmıştır. Grafikte COPRAS modelinde uygulanan kriter ağırlıklarında yapılan değişikliklerden TOPSIS modeline göre daha az etkilendiği tespit edilmiştir.

Şekil 9: AHP-COPRAS modelinin 15 farklı senaryo sonuçları



6. Sonuç ve Öneriler

Yenilenebilir enerji kaynaklarından birkaçının tek bir sistemde toplanarak, mevsim fark etmeksizin verimli çalışması hibrit enerjiye olan ilgiyi arttırmıştır. Hibrit enerji sistemlerinin bir bölgeye kurulumunda etkin rol oynayan 6 adet kriter belirlenmiş ve dokuz adet alternatif bu kriterler özelinde değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmada güneş radyasyon değerleri, rüzgar değerleri, eğim, trafo merkezine uzaklık, arazi maliyetleri ve arazi kullanım oranları ÇKKV yöntemlerinden AHP yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. AHP sonucunda en önemli kriterler sırası ile 0,37, 0,20 ve 0,14 kriter ağırlıklarıyla güneş enerjisi potansiyeli, arazi maliyeti ve rüzgar enerjisi potansiyeli olarak belirlenmiştir. AHP yöntemi ile alternatifler değerlendirildiğinde sonuç sırasıyla Keskin, Karakeçili, Bahşili, Balışeyh, Kırıkkale Merkez, Çelebi, Yahşihan, Sulakyurt ve Delice şeklindedir. AHP yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları TOPSIS yönteminde kullanıldığında ise sonuç Keskin, Kırıkkale Merkez, Yahşihan, Sulakyurt, Bahşili, Balışeyh, Karakeçili, Çelebi ve Delice olarak belirlenmiştir. Son olarak AHP ve COPRAS yöntem entegrasyonu ile yapılan çözümde ise sonuç Keskin, Balışeyh, Kırıkkale Merkez, Yahşihan, Bahşili, Sulakyurt, Karakeçili, Çelebi ve Delice şeklindedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında birinci seçilmesi gereken ilçe Keskin olurken en son seçilmesi gereken ilçe Delice olduğu görülmektedir. Üç çözüm sonucunda da en iyi alternatif yüksek güneş alımı, arazi maliyetinin azlığı ve iyi derece rüzgar alımı ile hibrit enerji santralini Kırıkkale'de en uygun noktaya kurulabilecek ilçesi Keskin alternatifi olarak belirlenmiştir.

Çalışma Kırıkkale ilinde hibrit enerji üzerine ilk defa yapılmış olup, hibrit enerji santrali yer seçimi problemi için AHP, TOPSIS ve COPRAS yöntemlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması ile de literatüre katkı sağlamaktadır. Önerilen 3 modelin ilişkileri Spearman sıra korelasyon yöntemi ile belirlenmiştir. Ayrıca AHP yöntemi ile hesap kriter ağırlıkları üzerinde 15 farklı senaryo uygulanarak duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu çalışmada hem istatistiksel analizin hem de duyarlılık analizinin birlikte yapılması, probleme önerilen çözümlerin analitik seviyesini yükseltmiş olup iki analizin birlikte yapılması açısından literatüre katkı sağlamaktadır.

İleride yapılabilecek projelerde bu çalışmanın sonuçları kullanılarak Keskin ilçesinde kurulacak hibrit santral için mikro alan seçimi çalışmada önerilen modeller ile çözülebilir. Böylece önerilen modellerin performansı farklı problemler üzerinde analiz edilebilir. Ayrıca önerilen modellerde bulanık sayılar kullanılarak klasik ÇKKV yöntemleri ile bulanık ÇKKV yöntemleri kıyaslanabilir.

Keskin ilçesi için probleme alt kriterler eklenerek çözülmesi sonucunda tesis için net bir bölge bulunabilir. Elektrik enerjisinin ulaşımının zor olduğu ve kesinti problemi yaşanan bölgelerde yapılan tarım, hayvancılık gibi sektörlerin enerji ihtiyacını karşılayabilmek için uygun hibrit enerji santrali yer seçimi problemi ele alınabilir.

Referanslar

Abdel-Basset, M., Gamal, A., Chakraborty, R. K., & Ryan, M. (2021). A new hybrid multi-criteria decision-making approach for location selection of sustainable offshore wind energy stations: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124462.

Akçay, M., Atak, M., (2018). Optimal site selection for a solar power plant in Turkey using a hybrid AHP-TOPSIS method, *Celal Bayar University Journal of Science*, 14(4), 413-420.

Akyüz, Y., Soba, M., (2013). ELECTRE yöntemiyle tekstil sektöründe optimal kuruluş yeri seçimi: Uşak ili örneği, *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 9(19): 185-198.

- Arı, E. S., & Gencer, C. (2020). The use and comparison of a deterministic, a stochastic, and a hybrid multiple-criteria decision-making method for site selection of wind power plants: An application in Turkey. *Wind Engineering*, 44(1), 60-74.
- Atıcı, K. B., Ulucan, A., (2009). Enerji projelerinin değerlendirilmesi sürecinde çok kriterli karar verme yaklaşımları ve Türkiye uygulamaları, Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 27(1), 161-186.
- Aydin, N. Y., Kentel, E., & Duzgun, H. S. (2013). GIS-based site selection methodology for hybrid renewable energy systems: A case study from western Turkey. *Energy conversion and management*, 70, 90-106.
- Azadeh, A., Sheikhalishahi, M., & Asadzadeh, S. M. (2011). A flexible neural network-fuzzy data envelopment analysis approach for location optimization of solar plants with uncertainty and complexity. *Renewable energy*, 36(12), 3394-3401.
- Barzehkar, M., Parnell, K. E., Dinan, N. M., & Brodie, G. (2021). Decision support tools for wind and solar farm site selection in Isfahan Province, Iran. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(4), 1179-1195.
- Boyacı, A. Ç., Şişman, A., & Sarıcaoğlu, K. (2021). Site selection for waste vegetable oil and waste battery collection boxes: a GIS-based hybrid hesitant fuzzy decision-making approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(14), 17431-17444.
- Bulut, M., & Özcan, E. (2021). A novel approach towards evaluation of joint technology performances of battery energy storage system in a fuzzy environment. *Journal of Energy Storage*, 36, 102361.
- Carrión, J. A., Estrella, A. E., Dols, F. A., Toro, M. Z., Rodríguez, M., & Ridaio, A. R. (2008). Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: Optimal site selection for grid-connected photovoltaic power plants. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(9), 2358-2380.
- ÇED ve Çevre İzinleri Şube Müdürlüğü, (2019). Kırıkkale ili 2018 yılı çevre durum raporu, T.C. Kırıkkale Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 72.
- Chien, F., Wang, C. N., Nguyen, V. T., Nguyen, V. T., & Chau, K. Y. (2020). An Evaluation Model of Quantitative and Qualitative Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Approach for Hydroelectric Plant Location Selection. *Energies*, 13(11), 2783.
- Çiçek, T., Atar, U., Ünal, T., Üstün, A., Üstün, C. (2011). T.C. Kırıkkale Valiliği Çevre ve Şehircilik Müdürlüğü. Docplayer: <https://docplayer.biz.tr/2834019-Tc-kirikkale-valiligi-cevre-ve-sehircilik-il-mudurlugu.html> adresinden alındı
- Clifton, J., & Boruff, B. J. (2010). Assessing the potential for concentrated solar power development in rural Australia. *Energy Policy*, 38(9), 5272-5280.
- Dawson, L., & Schlyter, P. (2012). Less is more: Strategic scale site suitability for concentrated solar thermal power in Western Australia. *Energy Policy*, 47, 91-101.
- Engin, O., Sarucan, A., Baysal, M. E., (2018). Türkiye için çok kriterli karar verme yöntemleri ile yenilenebilir enerji alternatiflerinin analizi, *Journal of Social And Humanities Sciences Research*, 5(23), 1223-1231.
- Eroğlu, H. (2021). Multi-criteria decision analysis for wind power plant location selection based on fuzzy AHP and geographic information systems. *Environment, Development and Sustainability*, 1-33.
- Güneş Enerjisi Raporu. Ahika: https://www.ahika.gov.tr/assets/upload/dosyalar/ahika_tr71de-gunes-raporu_.pdf adresinden alındı
- İlbarar, E., Kahraman, C., & Cebi, S. (2021). Location Selection for Biomass Plants by Using Fuzzy Linear Programming. *Energy*, 121189.
- Janke, J. R. (2010). Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. *Renewable Energy*, 35(10), 2228-2234.
- Jun, D., Tian-Tian, F., Yi-Sheng, Y., & Yu, M. (2014). Macro-site selection of wind/solar hybrid power station based on ELECTRE-II. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 194-204.
- Kannan, D., Moazzeni, S., mostafayi Darmian, S., & Afrasiabi, A. (2021). A hybrid approach based on MCDM methods and Monte Carlo simulation for sustainable evaluation of potential solar sites in east of Iran. *Journal of Cleaner Production*, 279, 122368.
- Karadağ Albayrak, Ö., (2020). Yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesinde kullanılan çok kriterli karar verme teknikleri ve değerlendirme kriterlerinin incelenmesi: 2017-2020, *Ataturk University Journal of Economics & Administrative Sciences*, 34.4.

- Kheybari, S., Javdanmehr, M., Rezaie, F. M., & Rezaei, J. (2021). Corn cultivation location selection for bioethanol production: An application of BWM and extended PROMETHEE II. *Energy*, 228, 120593.
- Lan, H., (2008). Analysis of zone safety degree of slopes and its application based on FLAC3D, *Journal of China University of Mining & Technology*, 37.4: 570-574.
- Lee, A. H., Kang, H. Y., & Liou, Y. J. (2017). A hybrid multiple-criteria decision-making approach for photovoltaic solar plant location selection. *Sustainability*, 9(2), 184.
- Memari, P., Navazi, F., & Jolai, F. (2021). Hybrid wind-municipal solid waste biomass power plant location selection considering waste collection problem: a case study. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 16(8), 719-739.
- Oral, N. , Yumuşak, R. & Eren, T. (2021a). AHP ve ANP yöntemleri kullanılarak tehlikeli madde depo yeri seçimi: Kırıkkale ilinde bir uygulama. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10 (1) , 115-124
- Oral, N. Yapıcı, S., Yumuşak, R. & Eren, T. (2021b). Pandemi sürecinde sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi için ilaç deposu ve aşı dağıtım merkezi yeri seçimi. *Politeknik Dergisi*, (Basımda).
- Özcan, E.C., Danışan, T., Yumuşak, R., Eren, T., (2020). An artificial neural network model supported with multi criteria decision making approaches for maintenance planning in hydroelectric power plants. *Eksplatacja I Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 21(3), 400-418.
- Özcan, E.C., Yumuşak, R., Eren, T., (2019). Risk Based Maintenance in the Hydroelectric Power Plants, *Energies*, 12 (8): 1502-1523.
- Özcan, E.C., Yumuşak, R., Eren, T., (2021). A Novel Approach to Optimize the Maintenance Strategies: A Case in the Hydroelectric Power Plant, *Eksplatacja I Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 23 (2), 324-337.
- Özgür, E., Türkiye’de güneş enerjisi, Türkiye’de Enerji Görünümü, 297-316, 20, (2018).
- Özkan, Ö., (2007). Personel seçiminde karar verme yöntemlerinin incelenmesi: AHP, ELECTRE ve TOPSIS örneği, *Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi*, İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, 18(9), 198-171.
- Pınar, A., Buldur, A., Tuncer, T., (2020). Türkiye'deki rüzgar enerji santralleri dağılışının coğrafi perspektiften analizi, *Doğu Coğrafya Dergisi*, 25.43: 167-182.
- Rediske, G., Burin, H. P., Rigo, P. D., Rosa, C. B., Michels, L., & Siluk, J. C. M. (2021). Wind power plant site selection: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111293.
- Rezaei, M., Mostafaiepour, A., Qolipour, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2018). Investigation of the optimal location design of a hybrid wind-solar plant: A case study. *International journal of hydrogen energy*, 43(1), 100-114.
- Rüzgar enerjisi haritası-Kırıkkale. Enerji Atlası: <https://www.enerjiatlası.com/ruzgar-enerjisi-haritasi/kirikkale> adresinden alındı
- Sánchez-Lozano, J. M., Antunes, C. H., García-Cascales, M. S., & Dias, L. C. (2014). GIS-based photovoltaic solar farms site selection using ELECTRE-TRI: Evaluating the case for Torre Pacheco, Murcia, Southeast of Spain. *Renewable Energy*, 66, 478-494.
- Sánchez-Lozano, J. M., Teruel-Solano, J., Soto-Elvira, P. L., & García-Cascales, M. S. (2013). Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. *Renewable and sustainable energy reviews*, 24, 544-556.
- Schlecht, M., & Meyer, R. (2021). Site selection and feasibility analysis for concentrating solar power systems. In *Concentrating Solar Power Technology* (99-125). Woodhead Publishing.
- Settou, B., Settou, N., Gouareh, A., Negrou, B., Mokhtara, C., & Messaoudi, D. (2021). A high-resolution geographic information system-analytical hierarchy process-based method for solar PV power plant site selection: a case study Algeria. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(1), 219-234.
- Soba, M., Eren, K., (2011). TOPSIS yöntemini kullanarak finansal ve finansal olmayan oranlara göre performans değerlendirilmesi: şehirlerarası otobüs sektöründe bir uygulama, *Selçuk Üniversitesi İİBF Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 15.21: 23-40.
- Supçiller, A. A., Bayramoğlu, S., (2020). Aralıklı gri sayı tabanlı A-GİA ve gri EDAS yöntemleriyle rüzgar santrali yer seçimi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 1847-1860.

Turgut, Z. N., Danişan, T., Eren, T., (2020). Spor yapanlar için en uygun akıllı saatin AHP ve PROMETHEE yöntemleri ile seçimi, Uluslararası Beden Eğitimi Spor ve Teknolojileri Dergisi, 1.2: 1-11.

Türkdoğan, S., Mercan, M. T., & Çatal, T., (2020). Şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemleri kullanılarak 40 hanelik bir topluluğun elektrik ve termal yük ihtiyacının karşılanması: teknik ve ekonomik analizleri, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (18), 476-485.

Ülkelere göre güneş enerjisi. Enerji Atlası: <https://www.enerjiatlası.com/ulkelere-gore-gunes-enerjisi.html> adresinden alındı

Ülkelere göre rüzgar enerjisi. Enerji Atlası: <https://www.enerjiatlası.com/ulkelere-gore-ruzgar-enerjisi.html> adresinden alındı

Ulutaş, A., & Karakuş, C. B. (2021). Location selection for a textile manufacturing facility with GIS based on hybrid MCDM approach. *Industria textila*, 72(2), 126-132.

Ulutaş, H., (2015). Kırsal Tesisler için hibrit (rüzgâr+ güneş) sistem tasarımı ve analizi Ordu, Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, MS Thesis, 11489-245.

Uyan, M., (2017). Güneş enerjisi santrali kurulabilecek alanların AHP yöntemi kullanılarak CBS destekli haritalanması, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(4), 343-351.

Viewfinder Panoramas. Viewfinder Panoramas: http://www.viewfinderpanoramas.org/Coverage%20map%20viewfinderpanoramas_org3.html adresinden alındı

Wang, C. N., Nguyen, V. T., Duong, D. H., & Thai, H. T. N. (2018). A hybrid fuzzy analysis network process (FANP) and the technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) approaches for solid waste to energy plant location selection in Vietnam. *Applied Sciences*, 8(7), 1100.

Wang, C. N., Su, C. C., & Nguyen, V. T. (2018). Nuclear power plant location selection in Vietnam under fuzzy environment conditions. *Symmetry*, 10(11), 548.

Wang, C. N., Tsai, T. T., & Huang, Y. F. (2019). A model for optimizing location selection for biomass energy power plants. *Processes*, 7(6), 353.

Wu, Y., Zhang, T., Xu, C., Zhang, B., Li, L., Ke, Y., ... & Xu, R. (2019). Optimal location selection for offshore wind-PV-seawater pumped storage power plant using a hybrid MCDM approach: a two-stage framework. *Energy Conversion and Management*, 199, 112066.

Yapıcı, S., Yumuşak, R. & Eren, T. (2020). Çok Kriterli Karar Verme yöntemleri ile medikal depo yeri seçimi. *Trakya Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 9(2), 203-221.

Yıldız, M., Bingöl, F., (2019). Küçük ve mikro ölçekli enerji yatırımı için hibrit enerji modeli, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25(1), 1-6.

Yılmaz, E. A., Can, H., (2018). Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyeli ve gelecek hedefleri, ODÜ Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi, 8(3): 525-535.

Yun-na, W., Yi-sheng, Y., Tian-tian, F., Li-na, K., Wei, L., & Luo-jie, F. (2013). Macro-site selection of wind/solar hybrid power station based on Ideal Matter-Element Model. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 50, 76-84.

Zavadskas E.K., Kaklauskas, A., Sarka, V., (1994). The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects, *Technological and Economic Development of Economy*, 1(3), 131-139.

EK 1

Kriter Kodu	İkili karşılaştırma matrisi										Özvektör	Tutarlılık Oranı
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9			
K1	A1	1	2	2	4	2	0,5	1	5	3	0,169	0,0212
	A2	0,5	1	2	3	1	0,25	0,5	4	3	0,114	
	A3	0,5	0,5	1	2	1	0,5	0,5	2	2	0,087	
	A4	0,25	0,33	0,50	1	0,5	0,25	0,33	1	1	0,046	
	A5	0,5	1	1	2	1	0,5	1	3	3	0,110	
	A6	2	4	2	4	2	1	2	6	4	0,245	
	A7	1	2	2	3	1	0,5	1	3	3	0,143	
	A8	0,20	0,25	0,50	1	0,33	0,17	0,33	1	0,5	0,037	
	A9	0,33	0,33	0,50	1	0,33	0,25	0,33	2	1	0,049	
K2	A1	1	0,33	0,67	0,67	1,5	0,25	1,5	3	0,67	0,070	0,0207
	A2	3,03	1	3	3	4	0,5	3	6	2	0,204	
	A3	1,5	0,33	1	1	3	0,33	3	4	1	0,107	
	A4	1,49	0,33	1	1	3	0,33	3	4	1	0,107	
	A5	0,67	0,25	0,33	0,33	1	0,2	1,5	2	0,33	0,048	
	A6	4	2	3	3	5	1	4	7	3	0,275	
	A7	0,67	0,33	0,33	0,33	0,67	0,25	1	3	0,33	0,050	
	A8	0,33	0,17	0,25	0,25	0,5	0,14	0,33	1	0,2	0,026	
	A9	1,5	0,5	1	1	3	0,33	3	5	1	0,114	
K3	A1	1	4	6	6	5	4	0,5	6	2	0,225	0,0375
	A2	0,25	1	3	3	2	1	0,25	3	0,2	0,076	
	A3	0,17	0,33	1	1	0,5	0,5	0,14	1	0,15	0,031	
	A4	0,17	0,33	1	1	0,5	0,33	0,14	1	0,15	0,030	
	A5	0,2	0,5	2	2	1	0,5	0,2	2	0,18	0,050	
	A6	0,25	1	2	3	2	1	0,25	1	0,2	0,065	
	A7	2	4	7	7	5	4	1	7	2	0,278	
	A8	0,17	0,33	1	1	0,5	1	0,14	1	0,15	0,034	
	A9	0,5	5	6	6	5,5	5	0,5	6	1	0,210	
K4	A1	1	0,2	0,5	0,33	0,2	0,15	0,25	0,5	1	0,033	0,0301
	A2	5	1	3	3	0,5	1	1	2	4	0,162	
	A3	2	0,33	1	0,5	0,25	0,33	2	1	3	0,077	
	A4	3	0,33	2	1	0,33	0,5	1	2	2	0,093	
	A5	5	2	4	3,03	1	1	3	4	5	0,236	
	A6	6	1	3	2	1	1	3	4	5	0,206	
	A7	4	1	0,5	1	0,33	0,33	1	2	3	0,097	
	A8	2	0,50	1	0,5	0,25	0,25	0,5	1	2	0,060	
	A9	1	0,25	0,33	0,50	0,2	0,2	0,33	0,5	1	0,036	
K5	A1	1	0,33	0,17	0,33	0,17	0,17	1	0,33	1	0,033	0,0006
	A2	3	1	0,5	1	0,5	0,5	3	1	3	0,100	
	A3	6	2	1	2	1	1	6	2	6	0,200	
	A4	3	1	0,5	1	0,5	0,5	3	1	3	0,100	
	A5	6	2	1	2	1	1	6	2	6	0,200	
	A6	6	2	1	2	1	1	6	2	6	0,200	
	A7	1	0,33	0,17	0,33	0,17	0,17	1	0,33	1	0,033	
	A8	3	1	0,5	1	0,5	0,5	3	1	3	0,100	
	A9	1	0,33	0,17	0,33	0,17	0,17	1	0,33	1	0,033	
K6	A1	1	4	2	5	0,5	1	3	2	0,33	0,126	0,0201
	A2	0,25	1	0,33	2	0,2	0,25	0,5	0,33	0,17	0,034	
	A3	0,5	3,03	1	4	0,33	0,5	2	1	0,25	0,079	
	A4	0,2	0,5	0,25	1	0,17	0,2	0,33	0,25	0,15	0,025	
	A5	2	5	3,03	6	1	2	4	3	0,5	0,195	
	A6	1	4	2	5	0,5	1	3	2	0,33	0,126	
	A7	0,33	2	0,5	3	0,25	0,33	1	0,5	0,2	0,051	
	A8	0,5	3	1	4	0,33	0,5	2	1	0,25	0,079	
	A9	3	6	4	7	2	3	5	4	1	0,286	



Investigating the Microstructural Properties and Phase Distributions of TIG Welded AISI/SAE 304L Stainless Steel Runners in TNT Filled Ammunitions

Oğuz Akgül¹ , Aziz Barış Başyigit^{2*} 

¹Kırıkkale University, Institute of Science, Department of Defense Technologies, 71450, Kırıkkale, TURKEY

^{2*}Kırıkkale University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Material Engineering, 71450, Kırıkkale, TURKEY

Başvuru/Received: 26/10/2021

Kabul / Accepted: 15/11/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Abstract

Among the stainless steels, the most widely used group is austenitic stainless steels. The prominent reason why austenitic stainless steels are preferred in welded stainless steel fabrications is their good weldability. AISI/SAE 304L austenitic stainless steels exhibit adequate corrosion resistance in oxidizing environments. AISI/SAE 304L austenitic stainless steels are also used in filling interfaces of runners between the Tri-Nitro-Toluen filling vessel and ammunitions in defense industry. For the manufacture of the runners, the stainless steel plates and the stainless steel pipes are mainly joined by fusion welding. These runners are cleaned with hot tapping water at 70°C after each filling of ammunitions by TNT so that cleaning operation can deteriorate the corrosion properties of runners especially weld zones. Austenitic stainless steel weldments include basically delta-ferrite and austenite phases on weld regions. Delta ferrite phase exhibits resistance to chloride bearing medias while austenite phase is more resistive to high temperature oxidizing ambients.

In this study; 3 mm thick 304L austenitic stainless steel plates and rings are welded to each other with two different filler weld wires of ER316L and ER2209 by Tungsten Inert Gas welding method under pure argon shielding gas. Weld metals and heat-affected zones of welded joints were examined using optical metallurgical microscope. It has been determined that the additional filler weld wires have changed the weld metal and the heat affected zone microstructures and phase distributions dominantly. Microstructures of all welded joints have been compared. Besides, phase distributions of weld metals and heat effected zones are made by image analysis software and Schaefflers diagram. ER 2209 welding filler metal increased the phase fraction of delta-ferrite in weld metals while it decreased the austenite phase fraction as compared to ER316L filler metal.

Key Words

“304L stainless steels, TIG welding, Phase analysis, Phase distribution, Schaeffler diagram”

1. Introduction

Stainless steels are a family of iron base alloys having excellent resistance to corrosion. Because of high corrosion resistance, stainless steel sheets are progressively used for kitchen, transportation, building constructions, etc (William et.al. 2014).

The largest group of stainless steels are the austenitic alloys that cannot be transformation hardened. Non-magnetizable austenitic steels; since they retain their austenitic microstructure at both room temperature and elevated temperatures, they cannot be subjected to normalizing and hardening heat treatment. They can only be strengthened by cold working within the limits (Pollard, 1993).

Weldability is one of the required properties of engineering materials (Joseph et.al. 2015 and Talabi et.al. 2014). One of the most important reasons why austenitic stainless steels are preferred in welded stainless steel fabrications is that these types of steels have good weldability properties (Tülbentçi, 1985). Austenitic stainless steels includes dominantly austenite and minor amounts of delta-ferrite phase. Delta-ferrite phase exhibits resistance to basically chloride including medias while austenite phase is more effective in general atmospheric corrosion and elevated temperature corrosion. Welding of these alloys results in weld metal having basically delta-ferrite and/or austenite phases majorly according to the types of filler metals that used (Lippold and Kotecki, 2005). As the total mechanical values of delta-ferrite and austenite phases are quite different so it also plays an important role in selection of the filler metal for determining the mechanical properties of these stainless steels weldments (Gunn, 2003).

The runners are used to increase the production speed and product quality during the liquid TNT filling of ammunitions (Margolin M. and Skettini E., 1958). The runners are in contact with pressurized water at high temperature in order to prevent the TNT, which is in the sensitive explosive class, from easily igniting and exploding. For this reason, all runners are constantly exposed to a corrosive environment. Stainless steels with high corrosion resistance are used in such corrosive environments. Austenitic steels are one of the best choices, as they exhibit good mechanical properties and corrosion performance (Gülenç et.al. 2005). Austenitic stainless steel is the most corrosion resistant and because of that reason it has lots of applications in chemical plants. The austenitic steels generally have low yield strength and high ultimate tensile strength that is why they are often very ductile. They have excellent properties at cryogenic temperature and have higher strengths at 540°C than the 400 series. The microstructures of these steels are either all austenite, or ferrite in a matrix of austenite (Gadewar et.al. 2010). AISI (American Iron And Steel Institute)/SAE (Society of Automotive Engineers) 304L austenitic stainless steel was selected for all these reasons.

Until the end of the 19th century, forge welding was the only welding process the blacksmith had used years together, to join iron and steel by heating and hammering. Arc welding, oxy fuel welding and electric resistance welding processes followed soon after. Due to technology advance, several modern techniques were developed by welding engineers, such as semi automatic and automatic processes, gas metal arc welding, submerged arc welding, and electro slag welding. Among them one of the proper joining technique is gas tungsten arc welding (TIG) (Patel A. and Patel S., 2014). TIG welding method is selected in this research. ER316L TIG welding rod is preferentially used for austenitic stainless steels and ER2209 TIG welding rod is also used for duplex (ferritic-austenitic) stainless steels according to ISO 14343-A and AWS A 5.9 standards. But the effects of both of the two ER316L and ER2209 filler metals on microstructural and phase differences mainly as delta-ferrite and austenite is studied in this work.

In this study, two different filler materials (ER316L and ER2209) are used to investigate for welding AISI/SAE 304L austenitic stainless steel sheets and rings. As austenite phase exhibits corrosion resistance to high temperature oxidizing medias while delta-ferrite phase resists against chloride bearing ambients, so that one can decide whether the dominant phase should be preferred as austenitic or delta ferritic on weldments (Lippold and Kotecki, 2005). Microstructural developments and phase analysis of welded joints are throughly investigated.

2. Experimental Methods

Four samples of 3 mm thick 304L austenitic stainless steel sheets and rings are joined to each other, using TIG welding method.

Optical emission spectral analysis results of raw 304L stainless steel alloy by AmateX Spectromax brand spectrometer are given in Table 1. Experimental materials are consistent with the standard documents (ASM Handbook Vol. 2, 2005; ASTM A240, 2017).

Table 1. Chemical compositions of materials used in this study

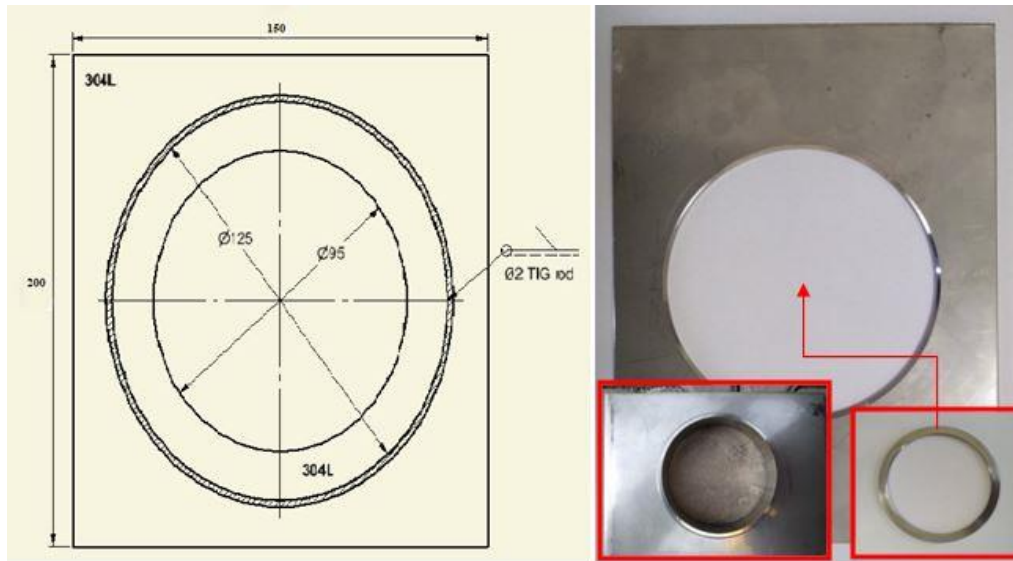
Material	Elements (% Weight)											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	N	Fe	Others
304L (sheet)	0.0180	0.376	1.83	0.020	0.0005<	18.58	0.210	7.93	0.336	0.073	70.4	0.226
304L (ring)	0.0130	0.357	1.24	0.022	0.026	18.46	0.237	7.99	0.553	0.062	70.8	0.240

TIG welding is applied by two passes with direct current (-) under pure argon shielding gas. Chemical compositions of ER316L and ER2209 TIG welding rods are given in Table 2 that provided from manufacturer.

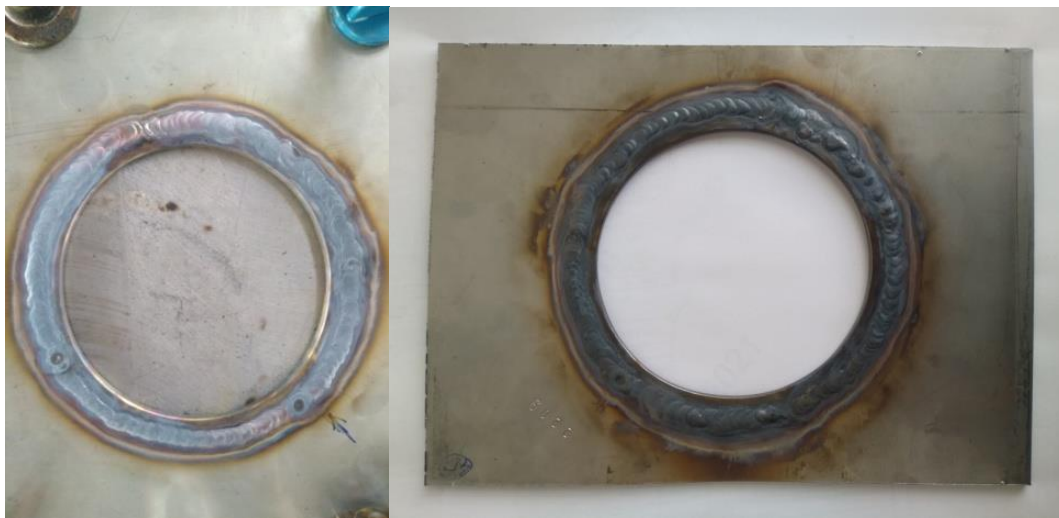
Table 2. Chemical compositions of TIG welding rods provided by manufacturers data

EN ISO 14343-A, AWS A5.9 TIG Rods (ISO14343,2017; AWS A.5.9, 2017)	Elements (% Weight)						
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	N
ER316L	0.025<	1.7	0.3	12	19	2.8	--
ER2209	0.01<	1.5	0.5	8.5	22.75	3.2	0.17

Test samples are prepared as given in Figure 1.



(a)



(b)

Figure 1. Layout diagram and Figures of test specimens (a) before and (b) after (both sides) welding operation

WT20 2% thoriated welding electrode is used in joining operations.

TIG welding operation parameters are given in Table 3.

Table 3. TIG welding parameters

ISO 14343, AWS A5.9 TIG Rods Ø2 mm	Current DC(-) (Amperes)		Welding Voltage (Volts)		Shielding Gas Flow (lt/min)		Welding Speed (mm/sn)		Welding Heat Input (Joule/mm)		Tungsten Electrode
	Root	2 nd	Root	2 nd	Root	2 nd	Root	2 nd	Root	2 nd	
	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	
ER316L	110	105	11	10	12	10	1,81	2,03	467.96	362.07	WT 20 (Red- %2 Thoirated) Ø2.4 mm
ER2209	110	105	11	10	12	10	1,82	2,11	465.38	348.34	

In order to examine the microstructural changes of the samples joined with two different TIG welding rods, a microstructure examination specimen has been prepared for each condition. In order to facilitate the grinding and polishing process, the specimens have been molded in bakelite.

After the grinding and polishing processes, the microstructure examination samples were etched in 20% concentrated sodium hydroxide (NaOH) etching solution at 2.5 volts and 0.3 amperes of current for 15 seconds with the electrolytic etching method. The microstructures have been investigated by a ‘LEICA DM 4000M’ brand metallurgical microscope.

The ‘Kameram’ licensed software is used for phase analysis estimations in laboratory according to ASTM E1245 and ASTM E562 standards. In addition, phase distributions of weld metals on each samples are also investigated by Schaeffler’s diagram.

3. Results and Discussion

3.1. Microstructural examination of the specimens welded by ER316L TIG rod

Microstructural examinations and phase analysis result screens of heat affected zones are shown in Figure 2-(a) and (b) respectively. The dominant phase (lighter colour) in microstructure indicates austenite, and the dark lines indicate the grains of delta-ferrite. According to the phase analysis the delta-ferrite ratio is approximately 21% and the austenite ratio is 77%. As the rolled phase structure on the 304L base material side (right side of the image) approaches HAZ, its linearity disrupts and develops into a partially slightly dendritic structure.

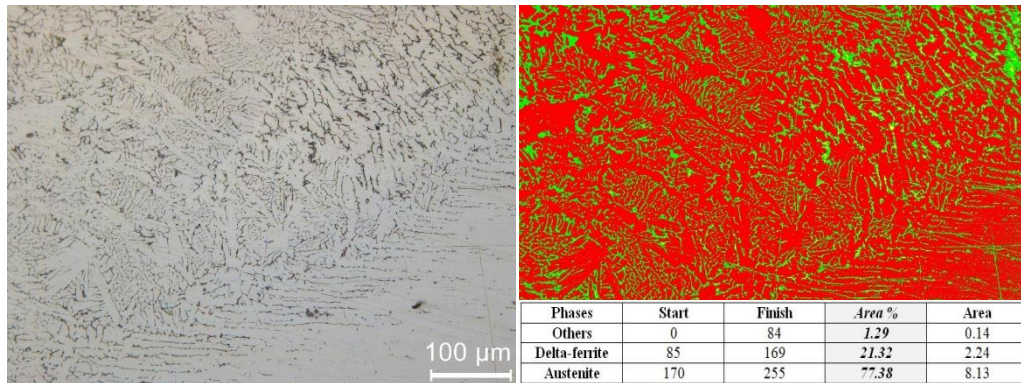


Figure 2. (a) micrograph and (b) phase analysis of HAZ region of the specimens welded by ER316L TIG rod

Microstructural examinations and phase analysis result screens of weld metal are shown in Figure 3-(a) and (b). The lighter regions indicate austenite, and the dark lines indicate delta-ferrite grains. The delta-ferrite ratio is approximately 6.4% and the austenite ratio is 93.6% according to the image analysis by volume.

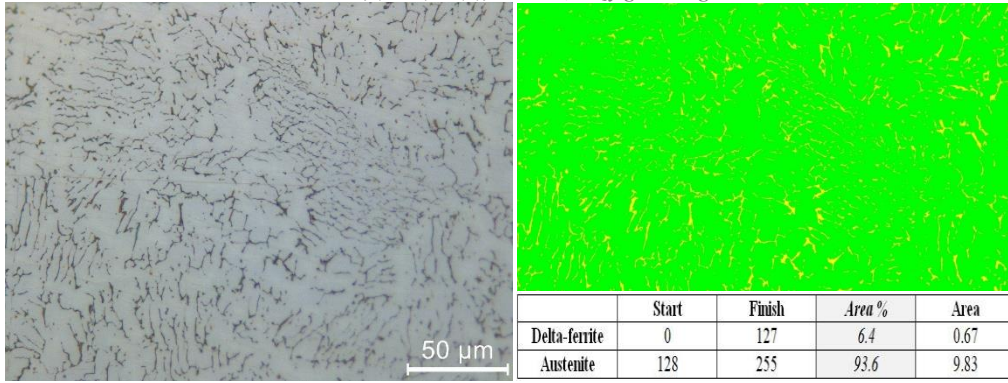


Figure 3. (a) micrograph and (b) phase analysis of weld metal region of the specimens welded by ER316L TIG rod

3.2. Microstructural examination of the specimens welded by ER2209 TIG rod

Microstructural examinations and phase analysis result screens of HAZ are given in Figure 4-(a) and (b) respectively. The austenite ratio is approximately 42% and the delta-ferrite ratio is approximately 55% according to the phase analysis. As the rolled phase structure on the 304L base material side (left side of the image) approaches HAZ linearly and develops into a dendritic structure.

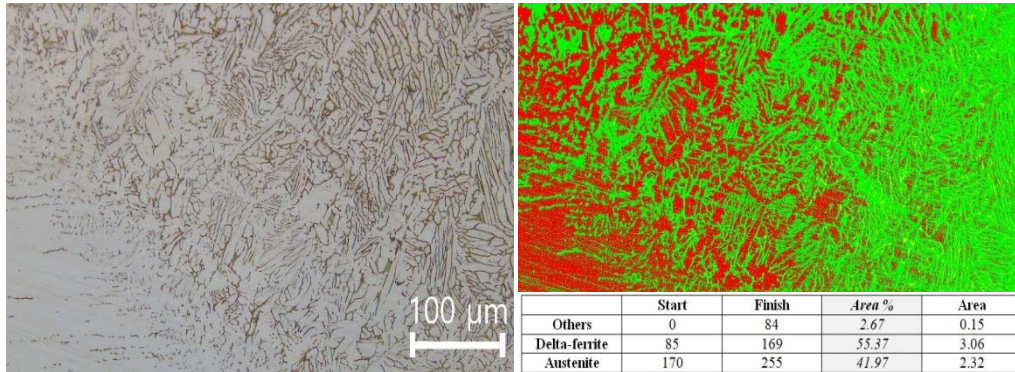


Figure 4. (a) micrograph and (b) phase analysis of HAZ region of the specimens welded by ER2209 TIG rod

Microstructural examinations and phase analysis result screens of weld metal are shown in Figure 5-(a) and (b) respectively.

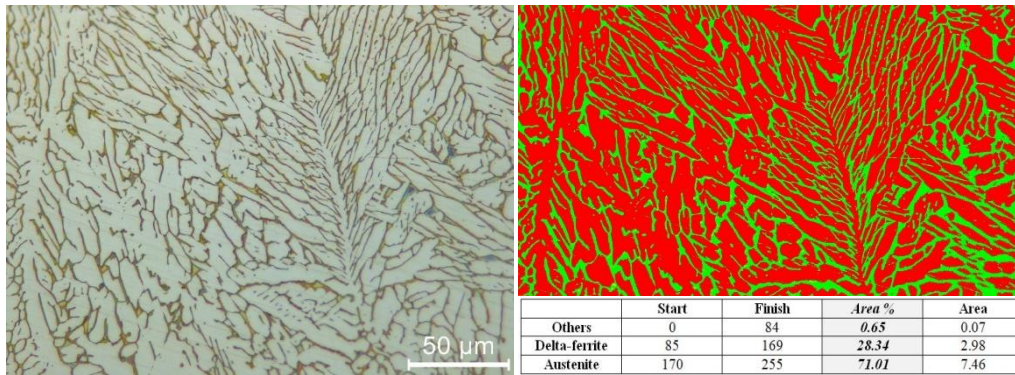


Figure 5. (a) micrograph and (b) phase analysis of weld metal region of the specimens welded by ER2209 TIG rod

The weld metal structure is given in dendritic austenite according to the Figure 5-(a). It has been determined that the main structure consists of approximately 28% delta-ferrite and 71% austenite in the micro-structural phase analyzes in Figure 5-(b).

3.3. Phase Estimation by Schaeffler Diagram

Anton Schaeffler-1949 diagram basically focuses on equations estimating chromium and nickel equivalents (Cr. eq, Ni. eq.) by weights in percentage. Schaeffler's chromium and nickel equivalents by weight for base and weld metals and 2 different TIG rods in percentages are estimated according to Equations 1 and 2 below (Lippold & Kotecki, 2005).

Schaefflers' Chromium Equivalent;

$$Cr_{Eq} = Cr\% + Mo\% + 1,5.Si\% + 0,5.Nb\% \tag{1}$$

Schaefflers' Nickel Equivalent;

$$Ni_{Eq} = Ni\% + 30.C\% + 0,5.Mn\% \tag{2}$$

The equivalent values for 304L sheet metal;

$$Cr_{Eq,304L-S} = 19.41$$

$$Ni_{Eq,304L-S} = 9.38$$

The equivalent values for 304L ring metal;

$$Cr_{Eq,304L-R} = 19.16$$

$$Ni_{Eq,304L-R} = 8.96$$

The equivalent values for ER316L TIG Welding Rod;

$$Cr_{Eq,ER316L} = 22.25$$

$$Ni_{Eq,ER316L} = 13.57$$

The equivalent values for ER2209 TIG Welding Rod;

$$Cr_{Eq,ER2209} = 26.70$$

$$Ni_{Eq,ER2209} = 9.52$$

Base metals of 304L (both ring and sheet) include approximately 82% austenite and remaining delta-ferrite according to Schaeffler's estimations and besides 97% austenite with remaining delta-ferrite according to image (micro-structural) phase analysis.

Although ER316L TIG welding rod contains 12% delta-ferrite, the weld metal of sample joined by ER316L TIG rod contains approximately 14% delta-ferrite and remaining austenite as seen in Figure 6.

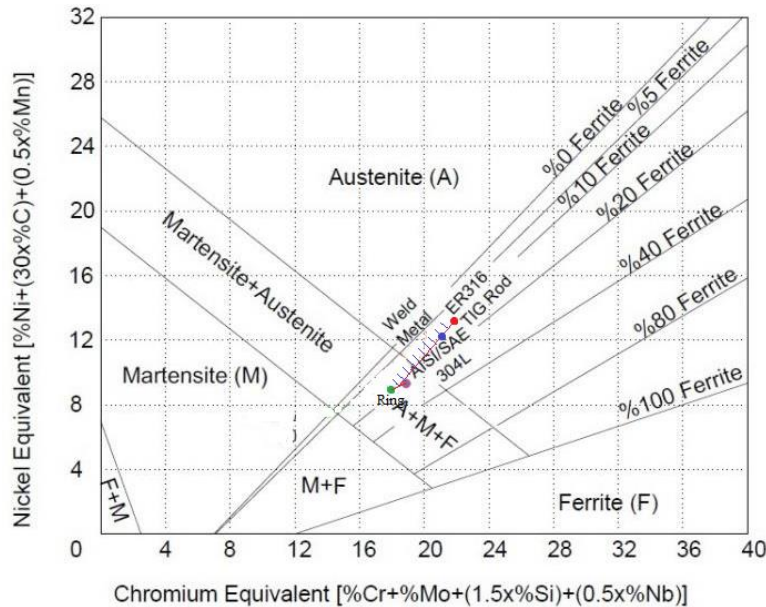


Figure 6. Phase locations of sample joined by ER316L TIG Rod plotted on Schaeffler's Diagram (Brando et.al. 1992)

ER2209 TIG welding rod contains approximately 70% delta-ferrite and remaining austenite by volume according to Figure 7. Weld metal of sample joined by ER2209 TIG rod includes approximately 55% delta-ferrite and remaining austenite.

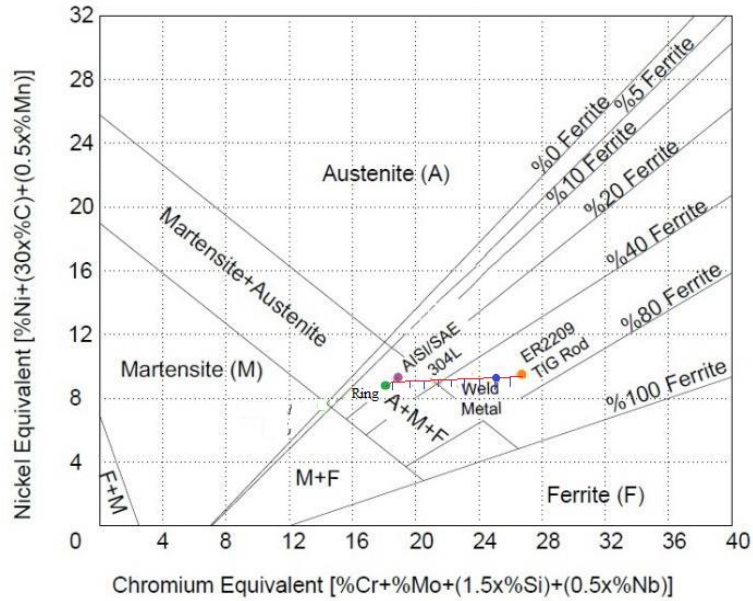


Figure 7. Phase locations of sample joined by ER2209 TIG Rod plotted on Schaeffler's Diagram (Brando et.al. 1992) Results of phase (image) analysis and Schaeffler's estimations are listed in Table 4.

Table 4. Results of Phase Analyzing Results

Analyzing Method	Phases Ratios (by volume) %	304L unwelded Base metals	ER316L TIG Rod	ER2209 TIG Rod	Weld Metal	
					Joined by ER316L TIG Rod	Joined by ER2209 TIG Rod
Image (phase) Analysis	Delta-ferrite	3	Not applicable	Not applicable	6.4	28.34
	Austenite	97	Not applicable	Not applicable	93.6	71.01
	The other minor phases	0	Not applicable	Not applicable	0	0.65
Schaefflers Estimation	Delta-ferrite	18	12	70	14	55
	Austenite	82	78	30	86	45

Comparison of the amounts of delta-ferrite and austenite phases obtained from image analysis and Schaefflers equations in % volume on weld metal is given in Figure 8.

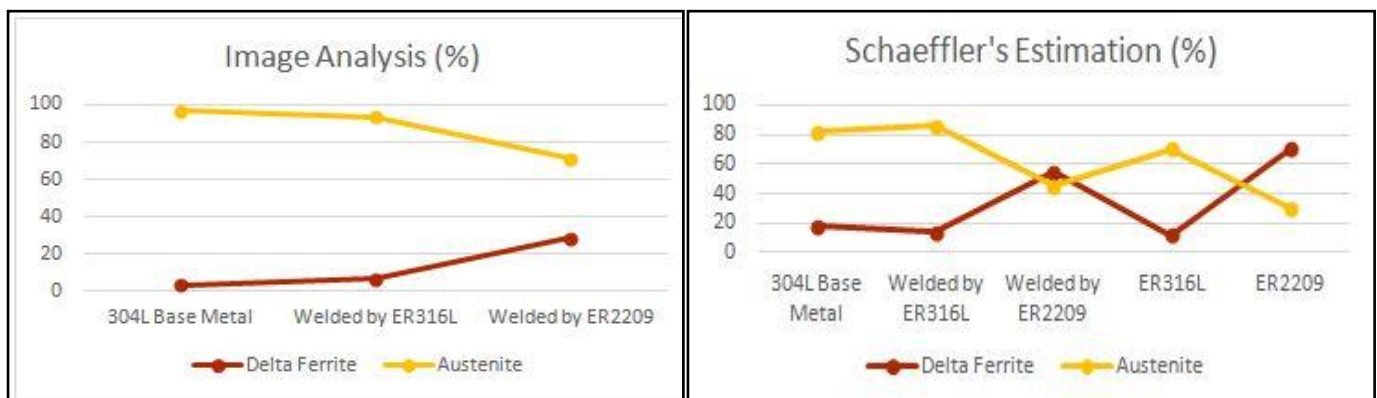


Figure 8. Comparison of the amounts of delta-ferrite and austenite phases

Image analysis results are not quite far from Schaeffler's estimations; however there are some amounts of differences in both of the results that given in Table 4. As chromium is a delta-ferrite stabilizing element so that increasing amounts of chromium element in TIG welding rod also increases the delta-ferrite amounts in weld metals (Lippold and Kotecki, 2005).

ER2209 TIG welding rod has more amounts of chromium element as compared to ER316L so that the delta-ferrite ratios are also determined to be greater than ER316L TIG rod in amounts by volume both seen from image analysis and Schaeffler's estimation results indicated in Table 4 and Figure 8.

4. Conclusions

ER316L TIG welding rod is generally preferred for austenitic stainless steels while ER2209 TIG welding rod is preferred for duplex (ferritic-austenitic) stainless steels according to ISO 14343-A and AWS A 5.9 standards. In this context, such a study was worked out to see the effects and differences on microstructures between two different filler metals. The aim of the study is to examine the effects of different welding rods on microstructure and phase distributions. The following findings were identified in this study.

1. It has been determined that the type of TIG welding rod has a domestic effect on micro-structure form of weld metal zones.
2. When the microstructure of the weld metal of samples joined with ER2209 TIG welding rod is examined, it has been seen that the structure is in the form of branched dendritic austenite. ER2209 filler metal decreased the austenite ratios to 71% by volume as compared to unwelded base metal 304L having 97% of austenite in consequence of filler metal having more amounts of chromium element as a ferrite stabilising effect on weld metal.
3. Predominant austenite and delta-ferrite phases are seen in microstructure of the weld metal center and the heat-affected zones of the welded samples joined with ER316L TIG welding rod. ER316L TIG rod preserved the austenite phase ratios to approximately 94% by volume as compared to base metal 304L having 97% of austenite ratio by volume.
4. When the microstructure of the heat-affected zone of samples joined with ER2209 TIG welding rod is examined, it has been observed that the structure is composed of approximately equidistant austenite and delta-ferrite while partial dendritic structure is observed in HAZ of samples joined by ER316L TIG rod.
5. Increasing amounts of chromium element in TIG welding rod also increased the delta-ferrite phase ratios in welded samples according to the phase (image) analysis and Schaeffler's estimations as chromium is a ferrite stabilizing element.
6. Phase (micro-structural image) analysis and Schaeffler's estimations are concluded in close values between each other owing stable results.
7. As a result, considering the distribution of phases in weld metal and HAZ regions of samples in case of needs for higher amounts of delta-ferrite instead of austenite in consequence of various corrosion and mechanical property demands, it would be more appropriate to use ER2209 TIG welding rod instead of ER316L filler metal for the welded equipments in TNT filling operations of defense industries.

Acknowledgements

Authors express their thanks especially to Mehmet KALKAN and MKE Weapon Factory staff for precious test supports.

References

- Brando W. S., Buchno V. T. L., Marques P. V., Modenesi P. J., Avoiding Problems When Welding AISI 430 Ferritic Stainless Steel, *Welding International*, 6 (9), pp. 713–716, 1992.
- Classification of Welding consumables ISO14343, 2017.
- Classification of Welding consumables AWS A.5.9, 2017.
- Gadewar S., Swaminadhan P., Harkare M., Experimental Investigations of Weld Characteristics for a Single Pass TIG Welding with Stainless Steel, *Journal of Engineering and Technology*, 2(8), pp. 3676-3686, 2010.
- Gunn R.N., Duplex stainless steels microstructure properties and applications, Abington Publishing, p.58, 2003.
- Gülenç B., Develi K., Kahraman N., Durgutlu A., Experimental Study of the Effect of Hydrogen in Argon as a Shielding Gas in MIG Welding of Austenitic Stainless Steel, *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(13), pp. 1475–1481, 2005.
- Joseph O.O., Leramo R.O., Ojudun O.S., *Journal of Materials and Environmental Science* 6-1, p. 101, 2015.
- Lippold J.C., Kotecki D., *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, Wiley Interscience, pp. 56-57, 2005.
- Margolin M., Skettini E., *Ammunition Loading Techniques*, Explosive Development Section Feltman Research and Engineering

Laboratories, p. 2, 1958.

Patel A., Patel S., The Effect of Activating Flux in Tig Welding, International Journal of Computational Engineering Research 4(1) pp. 65-70, 2014.

Pollard B., Welding brazing and soldering, ASM Metals Handbook, V.6, pp. 482-493, 1993.

Properties and Selection; Non-Ferrous Alloys and Special Purpose Materials, ASM International, ASM Handbook Volume 2, pp. 618-627, 2005.

Standard Specification for Welding, Brazing, and Fusing Qualifications, ASME BPVC Section IX, 2015.

Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count; ASM International: Almere, The Netherlands, ASTM E562-11, 2011.

Standard Practice for Determining the Inclusion or Second Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis; ASM International: Almere, The Netherlands, ASTM E1245, 2008.

Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications, ASTM A240, 2017.

Talabi S.I., Owolabi O.B., Adebisi J.A., Yahaya T., Advanced Reservoir and Production Engineering Manual 9-4, p. 181, 2014.

Tülbentçi K., Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı, Böhler Kaynak Dünyası, pp. 5-10, 1985.

William D. Callister J. , Rethwisch D. G., Materials Science and Engineering: An Introduction, John Wiley & Sons Inc., pp. 57-58, 2014.



MÜHENDİSLİK
FAKÜLTESİ

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

UMAGD, (2022) 14(1), 237-245.



10.29137/umagd.1029913

Cilt/Volume:14 Sayı/Issue:1 Ocak/January 2022

Araştırma Makalesi / Research Article

A Linear Programming Model for Latency Minimization and Fault Tolerance in Software Defined Network Controller Placement

Yasin İnağ¹ , Mehmet Demirci¹ 

¹Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Gazi University, 06570, Ankara, TURKEY

Başyuru/Received: 29/11/2021

Kabul / Accepted: 22/12/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Abstract

This study proposes a mathematical model for the controller placement problem(CPP) in Software Defined Networks (SDN). For SDN networks, multiple controllers are often suitable, and the location of these controllers affects the network performance. In case the controller is at fault, the resilience and reliability of the network should be ensured. Therefore, the recommended model optimizes the number and location of the controller(s) in the network while controller(s) is at fault. The model aims to minimize the latency by considering the reliability and resilience of the network. The simulation results show that the average latency is slightly increased whilst providing network resilience. The proposed model can be used to integrate SDN into existing networks or plan a new SDN network.

Key Words

“Controller placement, SDN, capacitated, reliability”

1. Introduction

Traditional IP networks are managed by switches which the control and networking protocols are running them. With this architecture, network management becomes complicated as it is implemented individually, and different commands are required for each device (Kreutz et al., 2014). Furthermore, traditional architectures are not used switches that allow separation of the control plane and the data plane. For this reason, dynamic and flexible solutions are not provided for requirements such as optimization, device errors, security, etc. in networks. SDN is a developed technology to provide resilience and programmability to networks and to facilitate dynamic network management (Benzekki, El Fergougui, & Elbelrhiti Elalaoui, 2016; Kreutz et al., 2014; Nunes, Mendonca, Nguyen, Obraczka, & Turletti, 2014; Xia, Wen, Foh, Niyato, & Xie, 2014).

In recent years, the use of SDN in many new-generation network technology applications such as network function virtualization (NFV) (Li & Chen, 2015), edge computing (Baktir, Ozgovde, & Ersoy, 2017), Internet of Things (Bera, Misra, & Vasilakos, 2017), mobile/wireless networks (Haque & Abu-Ghazaleh, 2016), 5G(Gupta & Jha, 2015) has gained importance. In addition, SDN is increasingly used in data center networks and Wide Area Networks (WAN), and it is used by companies such as Google, Facebook (Michel & Keller, 2017).

The main idea that makes SDN important is that it separates the data and control planes and presents a central controller. The SDN control plane provides the ability to monitor and configure the network. The implementation of a new routing protocol is easily accomplished with the controller.

Early research observed that a single controller suffices for real networks(Heller, Sherwood, & McKeown, 2012). However, in recent studies, the necessity of multiple controllers has emerged due to reasons such as scalability, security, and flexibility(T. Hu, Guo, Yi, Baker, & Lan, 2018). These studies showed the importance of SDN, but many challenges still remain. The Controller Placement Problem (CPP) is how to place controller(s) in the network. In a network with a certain number of nodes, the number and location of controllers are an open issue. When solving this problem, constraints such as latency, flexibility, reliability, energy saving, and load balancing are generally used. Delay is one of the essential criteria in determining the controller position. Delay becomes a critical metric in the developing and rapidly increasing data traffic. For this reason, in this study, we aim to provide the delay at the optimum level.

In the literature, some studies optimize the delay between the controller and the switches. Heller et al.(Heller et al., 2012) addressed the controller placement problem. They examined the effects of placement, taking into account the average delay and worst-case delay. Yao et al. (Yao, Bi, Li, & Guo, 2014) evaluated the latency and load balancing between controllers and switches. Salahi et al. (Sallahi & St-Hilaire, 2014) proposed a solution by determining the average latency time as a constraint.

In multi-controller networks, managing the network in case controller(s) is not working is another important problem. Our study aims to ensure the resilience and reliability of the network with optimum delay when controller errors occur after determining the controller location. The proposed model is called the Controller Position Problem with Capacity and Fault tolerance(CF-CPP).

In CF-CPP, the number of controllers and their positions are determined using the k-median clustering algorithm at the beginning. When determining the number of controllers, controller fault tolerance is considered a constraint. In case of a possible controller fault during network transmission, which switches should be connected to which controllers are solved by linear programming that we recommended. Minimum delay is aimed at restricting the number of controllers and the number of free ports in the controller. While ensuring the network's reliability and minimizing the average delay, the effects of the number of controllers and fault tolerance are examined.

The main contributions of the paper are the following:

- This study proposes a model for determining the controller location and possible controller failure in SDN-supported networks.
- CF-CPP is mathematically formulated and simulated in a GNS3 simulation environment. Although the primary purpose of this study is to minimize the average delay, it is to provide flexibility and dynamism to the network against the controller errors that may occur in the network.
- An algorithm with k-median clustering and linear programming is proposed to ensure the flexibility and reliability of the network.
- In case of possible controller fault in a network where controller locations are determined, the network's reliability is ensured by assigning the switches connected to this controller to other controllers in the system.

The rest of the paper is organized as follows: Section 2 examines the related works on CPP in the literature comprehensively. The details of the proposed models are explained in Section 3. Extensive simulation results are presented and discussed in Section 4. Finally, Section 5 summarizes the paper and presents the future directions to guide the interested readers.

2. Related Works

CPP is one of the important problems in SDN-supported networks and is extensively studied in the literature. While controller placing, different network improvement objectives such as minimum latency, cost, reliability, and durability, etc. are determined. As providing these purposes; the number of controllers, load balancing, controller update cost, etc. different constraints are used (Das, Sridharan, & Gurusamy, 2019; Isong, Molose, Abu-Mahfouz, & Dladlu, 2020; Killi & Rao, 2019; Lu, Zhang, Hu, Yi, & Lan, 2019; Singh & Srivastava, 2018; Wang, Zhao, Huang, & Wang, 2017).

The controller placement problem was first described in the literature by Heller et al.(Heller et al., 2012). They used a k-means clustering algorithm to determine the number and location of controllers. They offered a solution to CPP by optimizing the latency between the switches and the controller. While it was observed that increasing the number of controllers reduces latency, controller fault tolerance and capacity are not examined. In a similar study, Kobo et al.(Kobo, Abu-Mahfouz, & Hancke, 2019) proposed a solution that provides minimum latency and resilience using the k-median algorithm. The simulation results show that better performance was obtained by using local and central controllers and that the controller change has little effect on the average delay.

Guang Yao et al.(Yao et al., 2014) committed a model that considers delay and controller capability. This model was obtained by adapting the K-median (k-center) algorithm to the problem. The simulation results showed that their models reduced the number and load of controllers. Kuang et al. (Kuang, Qiu, Li, & Liu, 2018) produced a solution using the k-means algorithm to determine the controller placement. They divided large-scale networks into subnets and optimized latency by assigning a controller on the subnets. Wang et al. (Wang, Zhao, Huang, Duan, & Li, 2016) optimized the K-means algorithm for CPP and showed that the proposed model results yielded 2347 times faster with the simulation. In the literature, the k-median algorithm is widely used for CPP (Alenazi & Cetinkaya, 2020; Y.-N. Hu, Wang, Gong, Que, & Cheng, 2012; Jimenez, Cervello-Pastor, & Garcia, 2014; Xiao, Qu, Qi, Li, & Xu, 2014).

While SDN produces solutions to the problems encountered in traditional networks, it also exposes new problems. Reliability in determining the number and placement of controllers is an significant problem. One of the problems encountered in networks is the failure of one or more controllers(Chen, Chen, Xu, Yin, & Zhang, 2015; Fonseca & Mota, 2017; Singh & Srivastava, 2018). Yannan et al. (Y.-N. Hu et al., 2012) introduced reliability and resilience in determining the controller placement. According to the authors, the placement and reliability of the controller improved network performance.

In SDN enabled networks, the communication is broken with the failure of the controller. In order to avoid such a problem, the network architecture must be fault-tolerant. Failure of the controller means a brainless network. The authors proposed random insertion, brute force, and greedy algorithms for reliable controller placement on SDN. The greedy algorithm provided better results compared to random insertion and brute force algorithms. Yanan et al. (Y. Hu, Wang, Gong, Que, & Cheng, 2014) tried to solve the problem by specifying the maximum number of controllers when creating the network and connecting more than one controller to each switch. However, latency was not taken into account in this study.

3. Proposed Model

Controller placement, number of controllers, and controller crashes/non-working situations are important problems in SDN networks. In this section of the study, a model that produces solutions to the problems mentioned is introduced. The model we propose determines the controller placement and number using the k-median algorithm. Furthermore, to ensure the network's resilience in case of possible failure of one/many controllers after the network communication, a linear programming model is proposed, which ensures that the switches connected to the broken controller are assigned to other existing controllers of the system.

K-median; It is a clustering algorithm that minimizes the sum of the distances between the k-center and all other points in the cluster. The k-median is considered a revised model of the well-studied k-means approach and minimizes the distance between the center and the cluster points, and the center must be a node of the network (Kobo et al., 2019).

K-median:

Given a network graph $G(V, E)$, let the edge weights represent propagation latency, $d(v, s)$ represent the shortest path from node $v \in V$ to $s \in V$, $n = |V|$, is the number of nodes. S will be the number of controllers to choose from, S' , is the number of controllers to be placed such $|S'| = K$, The average latency for placement of controllers $L_{avg}(S')$ is modeled as

$$L_{avg}(S') = \frac{1}{n} \sum_{v \in V} \min_{s \in S'} d(v, s) \quad (1)$$

When determining the number of controllers with the K-median, the controller fault tolerance was taken into account. Fault tolerance is the percentage of failing of existing controllers in the system. With this ratio, it is calculated at least how many controllers there should be in the network. Experimental studies investigate the effect of this ratio on the average latency.

After the number of controllers determined by the fault tolerance, the problem of a possible controller not working was solved by linear programming. It is defined that the switches connected to the broken/non-working controller will be connected to which controller for the network's resilience. The present of the linear programming formulation for the CF-CPP is as follows:

j , represents the controller number, p , means the port number of the controller, i the number of the switch, ft represents the fault tolerance rate. d_{ij} is latency of switch i to j , M_j is capacity of j controller. Let $x_{ij} = 1$ indicates there is a path between switch i to controller j , 0 otherwise. Let $b_j = 1$, indicates controller fault, 0 otherwise.

$$\text{Min} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} * x_{ij} \tag{2}$$

$$m \geq \frac{i}{p} \quad m \in \mathbb{Z} \tag{3}$$

$$j \geq m(1 + ft) \quad j \in \mathbb{Z} \tag{4}$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \tag{5}$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq M_j(1 - b_j) \quad \forall j \in J \tag{6}$$

$$\sum_{j \in J} b_j = 1 \tag{7}$$

$$x_{ij}, b_j \in \{0, 1\} \tag{8}$$

Objective function Eq. (2) aims to minimize the average delay between switch and controller. Eq. (5) is the constraint that allows each switch to be assigned to only one controller. Eq. (6) is the constraint that prevents the remaining capacities of the selected controller from being exceeded. Eq. (7) is the constraint that ensures that only one of the controllers will fail. Eq. (8) is the integrality constraints.

The proposed model offers a new proposal to CPP by calculating the probability that the controller is a fault in SDN-supported networks. While this model provides communication between the controller and switches with minimum delay, it takes into account the controller capacity (port) and controller crash constraints. At least how many controllers there must be in the network and the effects of increasing the number of controllers on the resilience of the system and the average latency are examined with simulations.

Advantages of the proposed model are the following,

- Determining the required number of controllers that consider the possibility of a controller failure ensures the system's resilience.
- Increases communication performance as it provides minimum latency between switches and controllers.
- Provide the system's resilience by transferring the switch connected to the broken/not working controller to the existing controllers with minimum delay.

The disadvantage of the proposed model is the increase in the operation cost caused by the implemented controller fault tolerance mechanism. In the proposed model, the number of controllers is determined based on a defined controller fault tolerance. Therefore, the number of controllers tends to be greater than a network with no fault tolerance. Thus, the total operation cost increases.

4. Experimental Analysis

In this section, the effect of the CF-CPPP model, which we propose to ensure the resilience of the network and provide a solution to CPP, on the average delay and number of controllers in case of controller failure is examined. In the proposed model, the number of controllers is determined by taking into account the fault tolerance, and the average delay time is calculated. The average delay is calculated for the minimum number of controllers, and it is compared with the average delay time in case of controller failure.

4.1. Evaluation Metrics

This subsection describes the metrics utilized to assess the model discussed in this study. CPP and the proposed models are evaluated based on several metrics which are prevalent in the literature. These metrics are:

- Delay, which is one of the important metrics considered in CPP. It depends on the distance between the nodes and the response time between the controller and the switches.
- The number of controllers is determined based on the number of switches and the controller's location to improve network performance and provide QoS.
- Fault tolerance, which is the probability that there is interrupted communication between switches and controllers. It is usually caused by controller errors.

The results obtained from the simulation experiments regarding these metrics are fully presented and discussed in the next section.

4.2. Results and Discussion

CF-CPP has been tested on the GNS3 platform upon a graph with 45 nodes and 67 edges shown in Fig. 1, Nodes represent switches. It is assumed that the controllers have 6 ports. For this reason, the maximum number of switches that can be connected to the controllers is 6.

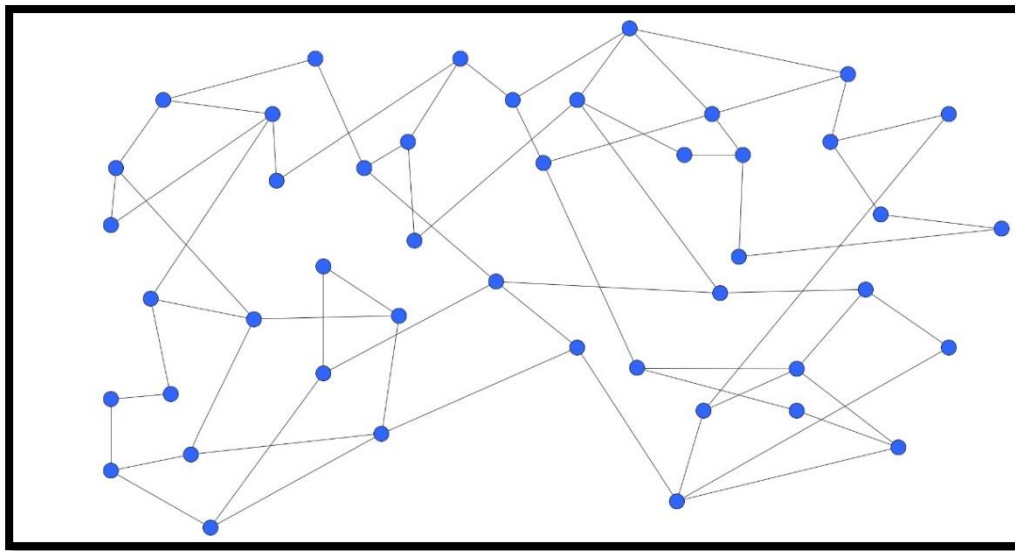


Figure 1. Graph

In K-median clustering, it is necessary to specify how many subsets the network will be divided. With Eq. (1), k-median clustering is performed in the network. With Eq. (3), the number required for each switch to be assigned to at least one controller is calculated. Then, the smallest integer k is chosen, which is greater than the ratio of the total number of switches to the controller port capacity. Controller port capacity is accepted as 6. Therefore, $k=8$ for our 45 switch test environment. The controller position determined by clustering with this k value and the switches connected to the controllers is shown in fig. 2.

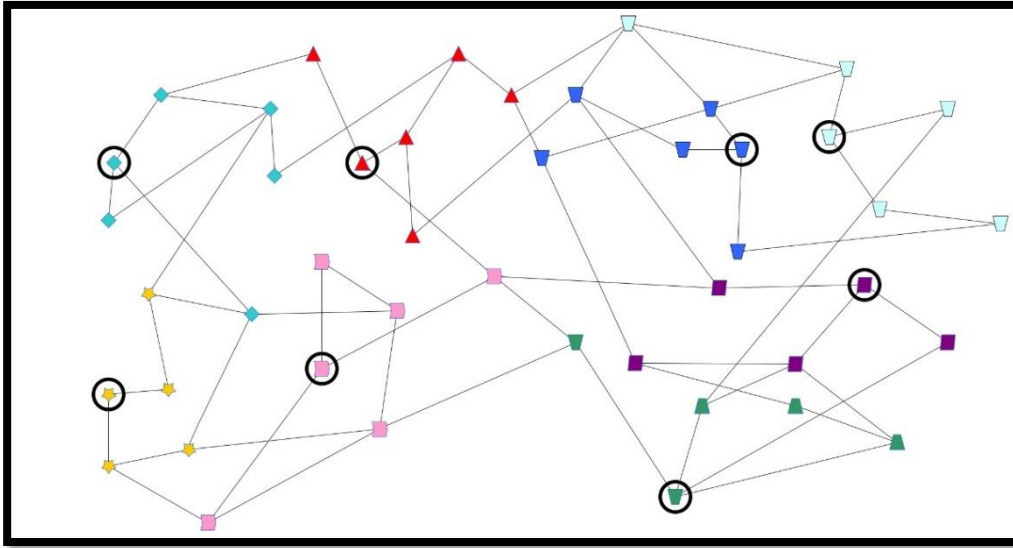


Figure 2. Optimal position selection of controller with 8-median

We add the fault tolerance ratio in CF-CPP as seen in Eq. (4) when calculating the number k . Fault tolerance is the probability of failure of controllers whose location and numbers are determined in the system. The main purpose here is to ensure that a controller that will assign each switch after the corrupted controllers. Table 1 shows the number of controllers according to the fault tolerance ratio for $k = 8$.

Table 1. Number of controllers according to fault tolerance ratio

Fault tolerance (%)	0	10	20	30	40
The number of controllers	8	9	10	11	12

The main purpose of CF-CPP is to ensure the resilience and reliability of the network. CF-CPP0 is the case where no controller is at fault in the proposed model. CF-CPP1 represents the situation where a controller is at fault.

CF-CPP1 is the linear programming model we recommend to ensure the continuity of the network. In case of failure of a dedicated controller, the recommended model is to assign the connected switches to the most suitable controller according to the minimum delay and controller port constraints. However, when calculating the average delay, it is not clear which assigned controller failed. For this reason, all probabilities were tried and averaged.

The $(k-1)$ median represents the clustering again of all switches in the network when a controller fails in the network. The main purpose is to compare the reassignment by disconnecting the network's communication with the proposed model. All assigned controllers were removed from the system, and the delay was calculated and averaged.

As shown in Fig. 3, the average delay of the proposed models is compared according to the fault tolerance. As the fault tolerance rate increases, the average latency decreases. Because as the fault tolerance increases, the number of controllers assigned to the network increases. The average latency of communication in CF-CPP1 is higher than the $(k-1)$ median. However, while the network's resilience is ensured in the proposed model, communication interruption and data loss occur when reassignment is made. While disconnecting the switches makes the system inoperable, it causes incomparable losses with instant data loss during the reassignment of the switches.

SDN provides easier network management by separating the control and data planes; however, they are susceptible to potential failures as with conventional networks. Choosing the number and location of controllers can affect the network's overall performance, as well as its cost and resilience to potential failures. In this model, while ensuring the continuity of the network, hardware, energy, and management costs increase due to the number of controllers. In large-scale networks, determining the number of controllers by optimizing the number of controllers and costs can provide administrative and financial gains.

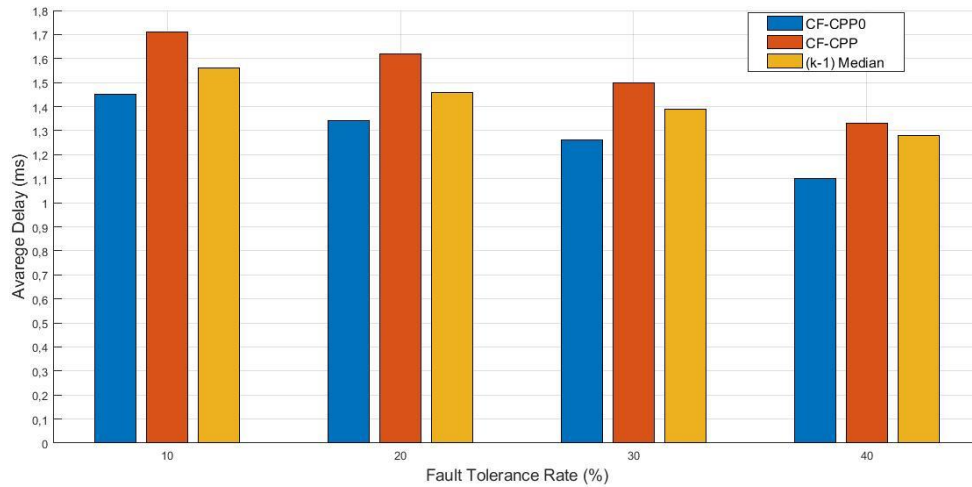


Figure 3. Relationship between average delay and fault tolerance

5. Conclusion

This study, proposes a model that solves the controller placement problem by adding port capacity and network resilience constraints and called the Controller Position Problem with Capacity and Fault tolerance(CF-CPP). The performance evaluation results show that the proposed CPP model ensures resilience in a large scale network. Although the average latency increases slightly with our proposed model, the reliability and resilience of the network increase significantly. In addition, the network's performance is improved by dynamically determining the number of controllers and fault tolerance. We intend to further improve performance by focusing on controller cost and energy consumption as our future plan.

Acknowledgment

This work is partially supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under the grant number 118E212.

References

- Alenazi, M. J., & Cetinkaya, E. K. (2020). Resilient placement of SDN controllers exploiting disjoint paths. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 31(2), e3725.
- Baktir, A. C., Oztogvde, A., & Ersoy, C. (2017). How can edge computing benefit from software-defined networking: A survey, use cases, and future directions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(4), 2359-2391.
- Benzekki, K., El Fergougui, A., & Elbelhiti Elalaoui, A. (2016). Software-defined networking (SDN): a survey. *Security and Communication Networks*, 9(18), 5803-5833.
- Bera, S., Misra, S., & Vasilakos, A. V. (2017). Software-defined networking for internet of things: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(6), 1994-2008.
- Chen, J., Chen, J., Xu, F., Yin, M., & Zhang, W. (2015). *When software defined networks meet fault tolerance: A survey*. Paper presented at the International conference on algorithms and architectures for parallel processing.
- Das, T., Sridharan, V., & Gurusamy, M. (2019). A survey on controller placement in sdn. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(1), 472-503.
- Fonseca, P. C., & Mota, E. S. (2017). A survey on fault management in software-defined networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(4), 2284-2321.
- Gupta, A., & Jha, R. K. (2015). A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies. *IEEE Access*, 3, 1206-1232.
- Haque, I. T., & Abu-Ghazaleh, N. (2016). Wireless software defined networking: A survey and taxonomy. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(4), 2713-2737.

- Heller, B., Sherwood, R., & McKeown, N. (2012). The controller placement problem. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 42(4), 473-478.
- Hu, T., Guo, Z., Yi, P., Baker, T., & Lan, J. (2018). Multi-controller based software-defined networking: A survey. *IEEE Access*, 6, 15980-15996.
- Hu, Y.-N., Wang, W.-D., Gong, X.-Y., Que, X.-R., & Cheng, S.-D. (2012). On the placement of controllers in software-defined networks. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 19, 92-171.
- Hu, Y., Wang, W., Gong, X., Que, X., & Cheng, S. (2014). On reliability-optimized controller placement for software-defined networks. *China Communications*, 11(2), 38-54.
- Isong, B., Molose, R. R. S., Abu-Mahfouz, A. M., & Dladlu, N. (2020). Comprehensive review of SDN controller placement strategies. *IEEE Access*, 8, 170070-170092.
- Jimenez, Y., Cervello-Pastor, C., & Garcia, A. J. (2014). *On the controller placement for designing a distributed SDN control layer*. Paper presented at the 2014 IFIP Networking Conference.
- Killi, B. P. R., & Rao, S. V. (2019). Controller placement in software defined networks: A comprehensive survey. *Computer Networks*, 163, 106883.
- Kobo, H. I., Abu-Mahfouz, A. M., & Hancke, G. P. (2019). Efficient controller placement and reelection mechanism in distributed control system for software defined wireless sensor networks. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 30(6), e3588.
- Kreutz, D., Ramos, F. M., Verissimo, P. E., Rothenberg, C. E., Azodolmolky, S., & Uhlig, S. (2014). Software-defined networking: A comprehensive survey. *Proceedings of the IEEE*, 103(1), 14-76.
- Kuang, H., Qiu, Y., Li, R., & Liu, X. (2018). *A hierarchical K-means algorithm for controller placement in SDN-based WAN architecture*. Paper presented at the 2018 10th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA).
- Li, Y., & Chen, M. (2015). Software-defined network function virtualization: A survey. *IEEE Access*, 3, 2542-2553.
- Lu, J., Zhang, Z., Hu, T., Yi, P., & Lan, J. (2019). A survey of controller placement problem in software-defined networking. *IEEE Access*, 7, 24290-24307.
- Michel, O., & Keller, E. (2017). *SDN in wide-area networks: A survey*. Paper presented at the 2017 Fourth International Conference on Software Defined Systems (SDS).
- Nunes, B. A. A., Mendonca, M., Nguyen, X.-N., Obraczka, K., & Turletti, T. (2014). A survey of software-defined networking: Past, present, and future of programmable networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(3), 1617-1634.
- Sallahi, A., & St-Hilaire, M. (2014). Optimal model for the controller placement problem in software defined networks. *IEEE Communications Letters*, 19(1), 30-33.
- Singh, A. K., & Srivastava, S. (2018). A survey and classification of controller placement problem in SDN. *International Journal of Network Management*, 28(3), e2018.
- Wang, G., Zhao, Y., Huang, J., Duan, Q., & Li, J. (2016). *A K-means-based network partition algorithm for controller placement in software defined network*. Paper presented at the 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC).
- Wang, G., Zhao, Y., Huang, J., & Wang, W. (2017). The controller placement problem in software defined networking: A survey. *IEEE Network*, 31(5), 21-27.
- Xia, W., Wen, Y., Foh, C. H., Niyato, D., & Xie, H. (2014). A survey on software-defined networking. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(1), 27-51.

Xiao, P., Qu, W., Qi, H., Li, Z., & Xu, Y. (2014). *The SDN controller placement problem for WAN*. Paper presented at the 2014 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC).

Yao, G., Bi, J., Li, Y., & Guo, L. (2014). On the capacitated controller placement problem in software defined networks. *IEEE Communications Letters*, 18(8), 1339-1342.



Persistence of Precipitation Time Series: Kırşehir Case Study

Sertac Oruc^{1*}

¹ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, 40100, Kırşehir/TÜRKİYE

Başvuru/Received: 26/01/2021 **Kabul / Accepted:** 16/07/2021 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Abstract

This study examines the persistence and long-term correlation of monthly and seasonal precipitation time series of the Kırşehir province (Turkey) for the period of 1960-2019, with the widely used Hurst exponent (H) and Detrended Fluctuation Analysis (DFA) methods. Both methods can be used to detect the long-term memory and correlation to be assessed as a reference of predictability. In order to support the study results, Augmented Dickey Fuller (ADF) and Mann-Kendall (MK) tests were applied to the time series under consideration. In some of the precipitation series, the evidence of persistence and long-term correlation was identified. According to the H exponent values, 10 out of 12 months, winter, and autumn seasons (with both simple R/S and corrected R/S methods), and spring and summer seasons (respectively with simple R/S and corrected R/S methods) exhibit long term correlations. On the other hand, according to the DFA scaling exponent values, 4 out of 12 months, winter and autumn seasons reveal long term correlations. When the H exponent and DFA scaling exponent values are compared only four monthly and two seasonal precipitation series are found to be consistent with each other.

Key Words

“Hurst exponent, Persistence, Detrended Fluctuation Analysis, Precipitation”

1. Introduction

It is a common acceptance that climate change will have significant effects on the water cycle (Osborn et al., 2015). Long- and short-term climatic variability is observed all around the world and may have significant impacts on water resources (Meshram et al. 2020). In some regions, such changes are expected to change precipitation regimes (e.g., increase in the frequency and intensity of precipitation extremes as presented by Zhou et al., 2012; Papagiannaki et al., 2015). In this manner precipitation becomes the main driver for water resources both for drought and flood conditions and not only observed but also expected conditions gain importance yet because of the mechanism and dependencies behind precipitation it is not an easy process to make substantial predictions (Chandrasekaran et al. 2019).

Discovered by Hurst (1951), the Hurst phenomenon states that the variability of climate variables is not an irregular process, but also indicates that the future states of a system may be affected by the current state of the system known as long-term memory (LTM) (Xie et al. 2019). The phenomenon was first used for the flood analyses of Nile River by Hurst with a form of exponent hereafter named Hurst exponent. Since then, Hurst exponent is used for many studies ranging from hydrology to capital markets. For instance, Tatli (2015) applied H exponent for persistence of a drought index over Turkey, Agbazo et al. (2018) analyzed the long-term memory in precipitation over Benin, Correa et al. (2017) analyzed long term memory in Southern Oscillation Index (SOI) and stationary signals associated with it for Alacantara, Brasil. Moreover, Raimundo and Okamoto Jr. (2018) used H exponent for Forex securities' classification. Meshram et al. (2020) used a coupled Mann-Kendall and Hurst Exponent analyses for temperature effects over agricultural crop production in the Chhattisgarh State, India. Besides, studies support that the strength of long term memory affects the predictability of the variable of interest and it is suggested that considering the long term memory effect may improve the prediction performance (Zhu et al. (2010), Yuan et al. (2013), Yuan et al. (2014), Xie et al. (2019)).

In recent years, Detrended Fluctuation Analysis (DFA) (Peng et al. 1994) has also been used as an important tool to detect long-range correlations especially in time series with potential nonstationarities. DFA is a scaling analysis method that calculates a quantitative parameter as a representative of the long-range autocorrelation (Yue et al. 2010). Moreover, DFA is said to be enabling the correct estimation of the Hurst exponent in the context of nonstationaries (Kantelhardt, 2015). Likewise, the Hurst exponent, DFA has also been used in many studies in various areas such as hydrology, finance/stock market or health sectors (Kurnaz, 2004; Yue et al. 2010; Golinska, 2013; Marton et al. 2014; Bu and Shang, 2014; Zeybekoglu and Keskin, 2020).

Under climate change conditions, the Central Anatolia Region in which the Kırşehir provinve is located, is expected to be one of the most affected parts in Turkey (Bozoğlu et al. 2019). Mall et al. (2006) and Palmer et al. (2008) stated the sensitivity of drier and populated regions to climate change and the potential water stress around the world. Moreover, Dudu and Çakmak (2018) pay attention to the effect of extreme climatic conditions such as droughts or floods in the western and central regions of Turkey and their negative economic and agricultural impacts which are supported by Dellal et al. 2011 under climate change conditions with a projected decrease in crop yield in the Central Anatolia. Gönençgil and Acar (2021) figure out that Eastern Anatolia and Central Anatolia Regions exposed to the highest extreme humid days for summer. Bacanlı et al. (2011) investigated Palmer Drought Severity Index (PDSI), Erinc and De Martonne with monthly mean observed precipitation and temperature data and revealed that the Central Anatolian Region in Turkey has a potential to face severe drought conditions. Turkes et al. (2020) indicated that the Central Anatolian Region is one of the regions that will experience semi-arid and dry sub-humid conditions in the future while Altın et al. 2012 also stated temperature increase in all of the studied stations and decrease in mean rainfall intensity at the twelve stations including Kırşehir in their study. Oruc (2021) also stated that the Central Anatolia Region is expected face fluctuations in terms of precipitation and drought conditions Furthermore, Boyacı and Küçükönder (2021) indicated the potential water stress for the Kırşehir Province for the coming years. For this reason, the Kırşehir province was chosen for the Hurst exponent and DFA analyses.

This paper investigates long term memory and correlation of historical (1960-2019) monthly and seasonal precipitation in annual time scale by the Hurst exponent and DFA methods. Furthermore, to support and better interpret the long-term analyses of the data, Augmented Dickey Fuller (ADF) test for nonstationary signals and well-known Mann-Kendall (MK) test for trend were used.

2. Study Area and Data

2.1. Study Area

The Kırşehir province (Turkey) is located in the Central Anatolia Region which includes some parts of the Kızılırmak river basin (Figure 1). The elevation of the study area ranges from 860 m to 1310 m. The area has typical continental climatic characteristics and receives most of the annual precipitation (384.5 mm in average) in winter and spring seasons. Hot and dry summers are followed by cold winters in the study area. The average air temperature is about 11.5 °C. Its surface area is approximately 6530 km². The lands of the province constitutes, 0.8 percent of the country's land, 2.9 percent of the Central Anatolia Region. The coordinates of the province are 38°50'-39°50' North latitudes and 33°30'-34°50' East longitudes. Provincial territory is made up 900-1200 m. of high plateaus. There are mountains that reach 1700 m above the plateau surface. Many large and small rivers pass through Kırşehir province which Kızılırmak is one of them. Kırşehir is poor in terms of forest and generally looks like a steppe



Figure 1. Location of the Study Area (Özdemir, 2020)

2.2. Precipitation Data

Daily (1960-2019) precipitation records of Kırşehir station (No:17160) were officially provided by the Turkish State Meteorological Service which were quality controlled before distributed. The monthly and seasonal precipitation amounts used in the analyses were calculated from the daily records which has continuous data from 1960 to 2019. Monthly precipitation variation during the study period is presented in Figure 2.

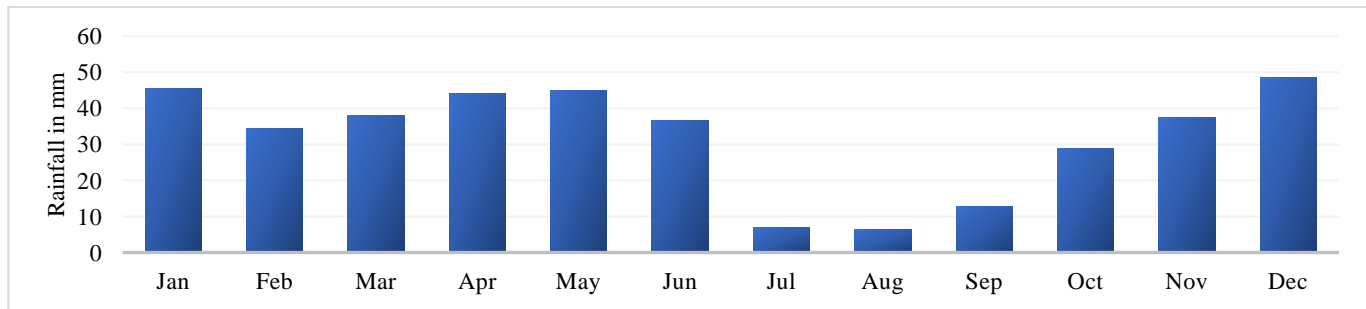


Figure 2. Monthly Average Precipitation Between 1960-2019

3. Methodology

Classification of long-term memory/persistence of the monthly and seasonal time series were investigated by Hurst Exponent DFA methods. Hurst exponents are calculated by various methods yet in this study simple and corrected R/S method is selected (Weron, 2001). R packages pracma (Borchers, 2021), nonlinearTseries (Garcia, 2021), tseries (Trapletti and Hornik, 2021) and trend (Pohlert, 2020) from the R Foundation for Statistical Computing used for the calculations.

3.1. Hurst Exponent and DFA

The Hurst exponent (H) provides a measure for the long-term memory of a time series. With values H exponent < 0.5 , H exponent = 0.5, and $0.5 < \text{H exponent} < 1$, it defines the dependence of future over present. Similar to H exponent, time series is classified according to the DFA scaling exponent, which $\alpha = 0.5$ indicates an uncorrelated time series, $\alpha < 0.5$ indicates an anti-correlated time series, and $0.5 < \alpha < 1$ indicates positive correlations.

Several techniques have been proposed in the literature for calculating the H exponent. In this study R/S and DFA methods were used to calculate the Hurst Exponent. More details regarding R/S can be found in (Weron, 2001; Hurst, 1951; Peters, 1994; Taqqu et al., 1995; Mandelbrot and Wallis, 1969).

Considering the R/S method; time series of length L divided into d subseries of length n and for each subseries $m = 1, \dots, d$: the data $(Z_{i,m})$ is normalized by subtracting the sample mean $X_{i,m} = Z_{i,m} - E_m$ for $i=1, \dots, n$;

- cumulative time series $Y_{i,m} = \sum_{j=1}^i X_{j,m}$ for $i = 1, \dots, n$; is obtained
- the range $R_m = \max\{Y_{1,m}, \dots, Y_{n,m}\} - \min\{Y_{1,m}, \dots, Y_{n,m}\}$; is calculated
- the range R_m/S_m is rescaled and the mean value of the rescaled range for all subseries of length n; is calculated

$$\left(\frac{R}{S}\right)_n = \frac{1}{d} \sum_{m=1}^d \frac{R_m}{S_m} \tag{1}$$

$$\left(\frac{R}{S}\right)_n = cn^H \tag{2}$$

$$\log\left(\frac{R}{S}\right)_n = \log(c) + H\log(n) \tag{3}$$

DFA can be found in (Peng et al., 1994, Weron, 2001; Penzel et al. 2003; Bryce and Sprague, 2012; Hardstone et al. 2012). Considering the DFA, time series of length L divided into d subseries of length n and for each subseries $m = 1, \dots, d$:

- a cumulative time series $Y_{i,m} = \sum_{j=1}^i X_{j,m}$ for $i = 1, \dots, n$; was created
- a least-squares line $Y_m(x) = a_m x + b_m$ to $\{Y_{1,m}, \dots, Y_{n,m}\}$; fitted
- the root mean square fluctuation (i.e. standard deviation) of the integrated and detrended time series is calculated

$$F(m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i,m} - a_m i + b_m)^2}{n}} \tag{4}$$

$$F(n) = \frac{1}{d} \sum_{m=1}^d F(m) \tag{5}$$

The value of H can be obtained by performing the same simple linear regression like in the R/S method.

3.2. Augmented Dickey Fuller (ADF) Test

ADF test is used to detect the stationarity in time series of a given period. Augmented Dickey Fuller (ADF) (Dickey and Fuller, 1979; Said and Dickey, 1984; Fuller, 1996) which is still a unit root test for stationarity, was revised to tackle autocorrelation problems from DF test (Dickey and Fuller, 1979). This ADF test is conducted by augmenting the DF equation in which the lagged difference form of the dependent variable ΔX_t is added. The new equation takes the following form;

$$X_t = \rho X_{t-1} + \sum_{j=1}^p \psi_j \Delta X_{t-j} + u_t \quad \text{or} \quad \Delta X_t = \pi X_{t-1} + \sum_{j=1}^p \psi_j \Delta X_{t-j} + u_t \tag{6}$$

$$\Delta X_{t-1} = (X_{t-1} - X_{t-2}), \Delta X_{t-2} = (X_{t-2} - X_{t-3}), \text{etc.} \tag{7}$$

3.3. Mann-Kendall Trend Test

There are two categories of trend test in general, namely parametric and non-parametric tests and the latter are considered to be more appropriate for the trend detection of hydro-meteorological variables.

The MK trend test (Mann, 1945; Kendall, 1975) which is also a non-parametric and rank based test, was used to detect trends in the precipitation data in this study.

The MK test was formulated by the following equations:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \tag{8}$$

here S is the test statistic.

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \tag{9}$$

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \tag{10}$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (11)$$

When the absolute value of Z is greater than the critical value Z_{α} , the null hypothesis, H_0 , that there is no trend is rejected. Significance level α can be defined by the user and can get different values regarding the desired significance of the study (Mann 1945; Kendall 1975; Militino et al. 2020).

4. Results and Discussion

The Hurst exponent and DFA scaling exponent values of the precipitation time series for each season and calendar month were evaluated at an annual time scale together with annual totals for the period of 1960-2019. Simple and corrected H exponents were calculated for the precipitation series. Furthermore, three DFA scaling exponents were calculated based on window size and window size range to prevent sensitivities regarding window size. The means of calculated three DFA scaling exponents for each month and season were then used for the comparison with the H exponent values of same precipitation series. At first summary statistics of monthly, seasonal, and annual precipitation series are given in Tables 1. and 2, respectively to make a brief description of the precipitation characteristics for the study area. In general, the mean and standard deviation (SD) values of July, August and September are smaller than the rest of the months. However, the precipitation amounts in these months show relatively higher variability (high coefficient of variation, CV) compared to those in other months. In addition, the statistical values indicated that January, June, July, August, September, and October accommodate positively, and highly positively skewed precipitation which indicates the distortion of the series from normal distribution. When kurtosis values are considered for outliers, it is convenient to conclude that January, June, July, August, September, and October months showed remarkable sign of outlier precipitation values for the Kırşehir station which can be one of the reasons of high cv values of July, August, and September monthly precipitation amounts.

Table 1. Summary Statistics of Monthly Precipitation

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Mean	45.56	34.53	37.94	44.04	45.02	36.76	7.00	6.26	12.78	28.80	37.56	48.54
SD	29.22	19.32	21.15	22.54	26.73	30.10	9.34	11.24	14.45	24.76	26.72	26.64
CV	0.64	0.56	0.56	0.51	0.59	0.82	1.33	1.80	1.13	0.86	0.71	0.55
Skewness	1.02	0.96	0.94	0.53	0.89	1.46	1.73	2.63	1.55	1.37	0.85	0.18
Kurtosis	1.16	0.85	0.47	-0.28	0.27	3.14	2.43	7.75	2.52	2.91	0.35	-0.97

Considering the seasonal precipitation, the mean- and standard-deviation values of Summer and Autumn exhibited smaller values. Summer season showed positive skewness while the rest of the seasons show low skewness values. Moreover, only the summer season had a positive kurtosis which is also the highest among the other seasons that have lighter tails.

Table 2. Summary Statistics of Annual and Seasonal Precipitation

	Annual	Winter	Spring	Summer	Autumn
Mean	384.80	128.60	127.00	50.03	79.15
SD	73.19	49.71	40.64	38.49	37.95
CV	0.19	0.39	0.32	0.77	0.48
Skewness	0.16	0.40	0.21	1.39	0.56
Kurtosis	-0.92	-0.88	-0.50	2.25	-0.15

In Table 3., ADF test, MK test, H exponent and DFA scaling exponent results were exhibited for the monthly precipitation series. Depending on the H and DFA results, monthly precipitation series showed various persistence and long-term correlation characteristics.

Table 3. ADF Test-MK Test-H Exponent-DFA Results of Monthly Precipitation

	ADF p value	MK value	z	MK p value	Simple R/S H	Corrected R/S H	DFA1	DFA2	DFA3	Avg
January	0.082	0.497		0.619	0.579	0.722	0.58	0.60	0.61	0.60
February	0.010	-1.403		0.161	0.571	0.796	0.66	0.65	0.66	0.66
March	0.051	-0.651		0.515	0.535	0.460	0.38	0.33	0.43	0.38
April	0.241	-1.410		0.159	0.611	0.862	0.47	0.41	0.52	0.47
May	0.010	-0.472		0.637	0.470	0.532	0.23	0.22	0.22	0.22
June	0.011	-0.159		0.873	0.520	0.616	0.36	0.35	0.37	0.36
July	0.010	1.676		0.094	0.415	0.307	0.28	0.27	0.30	0.28
August	0.414	1.569		0.117	0.555	0.692	0.60	0.60	0.50	0.57
September	0.010	0.185		0.853	0.545	0.679	0.43	0.47	0.46	0.45
October	0.054	1.040		0.299	0.536	0.663	0.48	0.46	0.44	0.46
November	0.333	0.593		0.553	0.611	0.664	0.71	0.68	0.71	0.70
December	0.014	-1.142		0.254	0.531	0.692	0.31	0.31	0.36	0.33

The H values ranges between 0,415 to 0,611 for simple R/S method and 0,307 to 0,862 for the corrected R/S method. Table 3 suggests that the precipitation record in Kırşehir is most likely to contain the Hurst effect of dependence and persistence because of its relative instability. The Hurst exponent (H) provides a measure for the long-term memory of a time series. With values H exponent < 0.5 , H exponent = 0.5, and $0.5 < H$ exponent < 1 , it defines the dependence of future over present. Similar to H exponent, time series is classified according to the DFA scaling exponent, which $\alpha = 0.5$ indicates an uncorrelated time series, $\alpha < 0.5$ indicates an anti-correlated time series, and $0.5 < \alpha < 1$ indicates positive correlations.

The results show convincing evidence of the Hurst effect in the precipitation series except March, May, and July months which have H values of 0.535, 0.470, 0.415, and corrected H values of 0.460, 0.532, 0.307. It can be concluded from the H values that monthly time series show evidence of long-term persistence for the period 1960- 2019.

Considering the DFA, results of the three scaling exponents of annual time series of monthly precipitation showed closer values. Averages of these values ranges from 0.22 to 0.70 whereas only four of the precipitation series, namely, January, February, August and November show signal of persistence.

The precipitation series that were identified as persistent also show long-term dependence based on the Hurst exponent values. Furthermore, among these months, January, August and November precipitation series also showed nonstationary characteristics and it can be concluded that DFA analyses successfully overcome the nonstationarity, which is also indicated by ADF results, based on the calculated scaling exponent for these series.

Based on the combined results of Hurst exponent and DFA methods, January, August, and November monthly precipitation values of Kırşehir station are expected to increase while February precipitation will tend to decrease. These results were interpreted based on the dependence of future over past phenomena by using the DFA and H results and the current tendencies of the monthly time series that were revealed by MK test results. In addition, when only Hurst exponent results were considered, April, June and December precipitation amounts are also expected to decrease, and October precipitation is expected to increase while September is expected to show no significant increase or decrease.

Furthermore, nonstationarity and trend characteristics show different properties according to ADF and MK test for each time series. MK test results show both increasing and decreasing trends yet none of these trends are significant at five percent significance level. Moreover, nonstationary characteristics also show variations among the months and half of the precipitation series show nonstationary signals according to ADF test results. Performing the ADF test showed that two of the three time series that exhibit no clear evidence of long-term dependence also show significant stationary characteristics. On the other hand, it is not possible to make a concrete conclusion regarding relation between nonstationary properties, trend tendencies and Hurst exponent of the precipitation series.

Table 4. ADF Test-MK Test-H Exponent-DFA Results of Annual and Seasonal Precipitation

	ADF p value	MK z value	MK p value	Simple R/S H	Corrected R/S H	DFA1	DFA2	DFA3	DFA Avg.
Annual	0.010	0.089	0.929	0.482	0.346	0.18	0.18	0.24	0.20
Winter	0.032	-1.384	0.166	0.610	0.809	0.58	0.59	0.63	0.60
Spring	0.129	-0.702	0.483	0.504	0.483	0.44	0.40	0.45	0.43
Summer	0.022	0.351	0.726	0.492	0.574	0.31	0.28	0.33	0.31
Autumn	0.310	1.435	0.151	0.609	0.818	0.76	0.73	0.67	0.72

In addition to monthly precipitation, annual and seasonal precipitation were also investigated. Nonstationary and trend characteristics also show different properties according to ADF and MK test for each time series as they were in monthly analyses. MK test results show increasing trend for annual, Summer and Winter precipitation amounts and decreasing trend for winter and spring precipitation amounts but none of these trends are significant. Spring and autumn precipitation also show nonstationary behavior according to ADF test results. The H values ranges between 0.482 to 0.610 for simple R/S method and 0.346 to 0.818 for the corrected R/S method while DFA scaling exponent average values range from 0.20 to 0.72. Considering the DFA results with Hurst exponent for annual and seasonal precipitation series, winter and Autumn seasons indicate persistence. While there is no significant relation between nonstationarity and trend of the time series, Hurst coefficient and DFA scaling exponent show increasing persistence with increasing trend magnitude that is independent from the direction of the trend such as Autumn MK test z-value of 1.435 and DFA scaling exponent value of 0.72, Winter MK test z-value of -1.384 and DFA scaling exponent value of 0.60 or Spring MK test z-value of -0.702 and DFA scaling exponent value of 0.43. On the other hand, this is not valid for monthly precipitation series.

Both H and DFA methods show similar results for annual and seasonal series however, the results were different for the monthly precipitation series. Nevertheless, there are precipitation series such as January, February, August and November that H exponent and DFA results agree on a nonrandom process as Koutsoyiannis, (2020) indicated the enhanced pattern with the H approaching 1. Between 0.5-1.0, precipitation series of the study area can said to be trend reinforcing which means increases (decreases) in the series of January, February August, November months and Winter and Autumn seasons will probably be followed by increase (decrease). Conversely, for the rest of the precipitation series up values are more likely followed by down values and vice versa because of the expected mean reverting behavior according to combined H and DFA results. Despite the lack in identifying significant trends in the series, the persistency features evidenced by the Hurst exponent and DFA scaling exponent can be extended to address the precipitation intensification for the trend positive and desertification for the trend negative periods and notices for the further studies.

Chandrasekaran et al. (2019) also found that the predictability of time series in their study is higher with corresponded overall H exponent >0.5 . It can be said that higher persistence and correlation will probably affect the predictability of precipitation series in a positive way. Tatli (2015) indicated that the term “persistence” may also be considered as a criterion to be applied as a predictability measure while Onyutha (2020) and Koutsoyiannis (2020) also links the persistence and temporal change for the hydrological processes. Considering the above-mentioned studies precipitation series with H exponent and/or DFA scaling exponent > 0.5 in this study can also be considered more predictable and present status can be considered more comprehensively while making future predictions. Kantelhardt (2015) stated that it is vital to compare DFA results with other methods such as spectral or wavelet analyses that is one of the reasons in this study why results of the H exponent and DFA analyses combined for deriving conclusions.

On the other hand, data length in this study is 60 years and to draw a more precise conclusion it should be vital to use longer time series for such analyses. Kantelhardt (2015) indicated the variations of the degree persistence with different time scales. Lopez-Lambrano et al. 2018 stated the effect of climate, temperature, altitude, and the precipitation regime of the area of interest over H exponent and indicated the varied tendency of H value with different time scales. The detrended fluctuation analysis (DFA) is also said to be less affected by the extreme values than R/S analyses (Hacınlıyan and Kandiran, 2015). One reason of the difference between H and DFA results can be for this. Barbulescu et al. (2010) also mentioned the method dependency of the results of R/S method and discordance with the statistical tests. Results of this study also revealed no significant relation between the results of statistical tests for trend or nonstationarity, and the persistence/correlation behavior of the time series that can be generalized.

5. Conclusions

In this article the results of persistence and long-term correlation analysis for monthly, seasonal and annual precipitation time series of 1960-2019 were analyzed and also were compared to the results of nonstationarity and trend detecting statistic tests. Long-term persistence and correlation did not exhibit remarkable concordance. However, within various precipitation series, evidence of persistence and long-term correlation was identified. According to H exponent values of simple R/S and corrected R/S methods, 10 out of 12 months and winter, spring (only simple R/S), summer (only corrected R/S) and autumn season and according to DFA scaling exponent values 4 out of 12 months and winter and autumn seasons exhibit long term correlation. On the other hand, when the H exponent and DFA scaling exponent values compared only four monthly and two seasonal precipitation series concluded to be consistent with both H exponent and DFA scaling exponent results. This can be interpreted that to gather reliable predictions these

results must be properly considered. Long-term memory and correlation are accepted the sign of predictability. Further studies are needed to investigate the possible relationship, to compare with traditional approaches and to figure out the importance of long-term memory and correlation when predicting future for the hydrological variables. There is also need of quantification the long-term memory and incorporating them to predictive models which only few studies interested best of the author's knowledge.

References

- Agbazo, M., N'Gobi, G.K., Alamou, E., Kounouhewa, B., & Afouda, A. (2019). Fractal Analysis of the Long-Term Memory in Precipitation over Bénin (West Africa). *Advances in Meteorology*, 2019, 1-12.
- Altın, T.B., Barak, B., & Altın, B.N. (2012). Change in Precipitation and Temperature Amounts over Three Decades in Central Anatolia, Turkey. *Atmospheric and Climate Sciences*, Vol. 2 No. 1, 2012, pp. 107-125. doi: [10.4236/acs.2012.21013](https://doi.org/10.4236/acs.2012.21013).
- Bacanlı, Ü.G., Dikbaş, F., & Baran, T. (2011). Meteorological drought analysis case study: Central Anatolia. *Desalination and Water Treatment*, 26, 14-23.
- Barbulescu, A., Serban, C., & Maftai, C. (2010). Evaluation of Hurst exponent for precipitation time series.
- Borchers, H. W., (2021). *pracma: Practical Numerical Math Functions*. R package version 2.3.6
- Boyacı, S , Küçükönder, H . (2021). Assessment Of Drought Process With Integrated Multi-Criteria Decision-Making Methods . *Mugla Journal of Science and Technology* , 7 (1) , 65-72 . DOI: 10.22531/muglajsci.836438
- Bozoğlu M, Başer U, Alhas Eroglu N, Kılıc Topuz B (2019) Impacts of Climate Change on Turkish Agriculture. *Journal of International Environmental Application and Science*, 14:97-103 . Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jieas/issue/48886/560710>
- Bryce, R., & Sprague, K. (2012). Revisiting detrended fluctuation analysis. *Scientific Reports*, 2.
- Bu, L., & Shang, P. (2014). Scaling analysis of stock markets. *Chaos*, 24 2, 023107.
- Chandrasekaran, S., Poomalai, S., Saminathan, B., Suthanthiravel, S., Sundaram, K., & Hakkim, F.F. (2019). An investigation on the relationship between the Hurst exponent and the predictability of a rainfall time series. *Meteorological Applications*, 26, 511-519.
- Corrêa, C.S., Schuch, D., Queiroz, A.P., Fisch, G., Correa, F., & Coutinho, M.M. (2017). The Long-Range Memory and the Fractal Dimension: a Case Study for Alcântara. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 9, 461-468.
- Dellal Đ., McCarl B.A., Butt T. (2011) The Economic Assessment of Climate Change on Turkish Agriculture, *Journal of Environmental Protection and Ecology* 12:376-385.
- Dickey D.A. and Fuller W.A. (1979), Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root, *Journal of the American Statistical Association* 74:427-431."
- Dudu H, Çakmak EH (2018) Climate change and agriculture: an integrated approach to evaluate economy-wide effects for Turkey. *Climate and Development*, 10:275-288. <https://doi.org/10.1080/17565529.2017.1372259>
- Fuller, W. A. (1996). *Introduction to Statistical Time Series*, second ed., New York: John Wiley and Sons.
- Garcia, A.C., (2021). *nonlinearTseries: Nonlinear Time Series Analysis*. R package version 0.2.11
- Golinska, A. (2013). Detrended Fluctuation Analysis (DFA) in biomedical signal processing : selected examples.
- Gönençgil B., Acar Z. (2021) Turkey: Climate Variability, Extreme Temperature, and Precipitation. In: Lois-González R.C. (eds) *Geographies of Mediterranean Europe*. Springer Geography. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49464-3_8
- Hacinliyan, A., & Kandıran, E. (2015). Fractal Analysis of Stock Exchange Indices in Turkey. *AJIT-e: Online Academic Journal of Information Technology*, 6, 7-19.
- Hardstone, R., Poil, S., Schiavone, G., Jansen, R., Nikulin, V., Mansvelder, H., & Linkenkaer-Hansen, K. (2012). Detrended Fluctuation Analysis: A Scale-Free View on Neuronal Oscillations. *Frontiers in Physiology*, 3.
- Hurst, H. (1951). Long term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* , 6: 770-799.
- Yue, J., Zhao, X., & Shang, P. (2010). Effect of Trends on Detrended Fluctuation Analysis of Precipitation Series. *Mathematical Problems in Engineering*, 2010, 1-15.
- Kantelhardt J.W. (2015) Fractal and Multifractal Time Series. In: Meyers R. (eds) *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5_221-3

Kendall, M.G. (1975) Rank Correlation Methods, 4th ed., Charles Griffin, London, UK. pp. 202

Koutsoyiannis, D.: Revisiting the global hydrological cycle: is it intensifying?, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 3899–3932, <https://doi.org/10.5194/hess-24-3899-2020>, 2020.

Kurnaz, M. (2004). Application Of Detrended Fluctuation Analysis to Monthly Average Of The Maximum Daily Temperatures To Resolve Different Climates. *Fractals*, 12, 365-373.

López-Lambrano, A., Fuentes, C., López-Ramos, A., Ramírez, J., & López-Lambrano, M. (2018). Spatial and temporal Hurst exponent variability of rainfall series based on the climatological distribution in a semiarid region in Mexico. *Atmosfera*, 31, 199-219.

Mall RK, Gupta A, Singh R, Singh RS, Rathore LS (2006) Water resources and climate change: an Indian perspective. *Curr Sci* 90:1610-1626.

Mandelbrot, B.B., & Wallis, J.R. (1969). Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence. *Water Resources Research* , 5: 967-988.

Mann, H.B. (1945) Non-parametric tests against trend. *Econometrica*. 13, 245-259.

Márton, L., Brassai, S.T., Bakó, L., & Losonczy, L. (2014). Detrended Fluctuation Analysis of EEG Signals. *Procedia Technology*, 12, 125-132.

Meshram, S., Kahya, E., Meshram, C., Ghorbani, M.A., Ambade, B., & Mirabbasi, R. (2020). Long-term temperature trend analysis associated with agriculture crops. *Theoretical and Applied Climatology*, 140, 1139-1159.

Militino AF, Moradi M, Ugarte MD (2020). On the performances of trend and change-point detection methods for remote sensing data. *Remote Sens* 12(6):1008. <https://doi.org/10.3390/rs12061008>

Onyutha, C. (2020). Graphical-statistical method to explore variability of hydrological time series. *Hydrology Research*.

Oruc, S. Trend and nonstationary relation of extreme rainfall: Central Anatolia, Turkey. *Acta Geophys.* 69, 243–255 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00518-w>

Osborn, T. J., Gosling, S., Wallace, C., & Dorling, S. (2015). *The Water Cycle in a Changing Climate*. 7th World Water Forum. Faircount Media Group, London, 14–19.

Özdemir, H.O. (2020). The Nexus of Organizational Behaviors And Production Behaviors of The Head of The Agricultural Holding In Turkey: Kirsehir Province Case. *Journal of Global Innovations in Agricultural and Social Sciences*), 8, 125-133.

Palmer MA, Reidy Liermann CA, Nilsson C, Flörke M, Alcamo J, Lake PS, Bond N (2008) Climate change and the world's river basins: anticipating management options. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6:81-89. <https://doi.org/10.1890/060148>.

Papagiannaki, K., Lagouvardos, K., Kotroni, V., & Bezes, A. (2015). Flash flood occurrence and relation to the rainfall hazard in a highly urbanized area, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 1859-1871

Peng, C. K., Buldyrev, S. V., & Simons, M. "Nature and Fractals." *Physics Rev*, 1994: 168.

Penzel, T., Kantelhardt, J., Grote, L., Peter, J., & Bunde, A. (2003). Comparison of detrended fluctuation analysis and spectral analysis for heart rate variability in sleep and sleep apnea. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 50, 1143-1151.

Peters EE. 1994. *Fractal Market Analysis: Applying Chaos Theory to Investment and Economic*. John Wiley and Sons: New York, NY.

Pohlert, T., (2020) trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection. R package version 1.1.4

R Core Team (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>

Raimundo, M.S., & Okamoto, J. (2018). Application of Hurst Exponent (H) and the R/S Analysis in the Classification of FOREX Securities. *International Journal of Modeling and Optimization*, 8, 116-124.

Said E. and Dickey D.A. (1984), Testing for Unit Roots in Autoregressive Moving Average Models of Unknown Order, *Biometrika* 71:599-607.

Taqqu MS, Teverovsky V, Willinger W. 1995. Estimators for long range dependence: an empirical study. *Fractals* 3: 785– 788.

Tatli, H. (2015), Detecting persistence of meteorological drought via the Hurst exponent. *Met. Apps*, 22: 763-769. <https://doi.org/10.1002/met.1519>

- Trapletti A, Hornik K (2021). tseries: Time Series Analysis and Computational Finance. R package version 0.10-49.
- Turkes M., Turp M.T., An N., Ozturk T., Kurnaz M.L. (2020) Impacts of Climate Change on Precipitation Climatology and Variability in Turkey. In: Harmancioglu N., Altinbilek D. (eds) Water Resources of Turkey. World Water Resources, vol 2. Springer, Cham.
- Weron, R. (2001). Estimating long range dependence: finite sample properties and confidence intervals. HSC Research Reports.
- Xie, F., Yuan, N., Qi, Y. et al. Is long-term climate memory important in temperature/precipitation predictions over China?. *Theor Appl Climatol* 137, 459–466 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2608-0>
- Yuan N, Fu Z, Liu S (2013) Long-term memory in climate variability: a new look based on fractional integral techniques. *J Geophys Res* 118(23):12962–12969.
- Yuan N, Fu Z, Liu S (2014) Extracting climate memory using fractional integrated statistical model: a new perspective on climate prediction. *Sci Rep* 4:6577.
- Zeybekoğlu, U., & Keskin, A.U. (2020). Detrended fluctuation analyses of rainfall intensities: a case study. *International Journal of Global Warming*, 21, 141.
- Zhou, Q., Arnbjerg-Nielsen, K., Mikkelsen, P. S., Nielsen, S. B., & Halsnæs, K. (2012). Urban drainage design and climate change adaptation decision making. Kgs. Lyngby: DTU Environment
- Zhu X, Fraedrich K, Liu Z, Blender B. 2010. A demonstration of long-term memory and climate predictability. *J. Clim.* 23: 5021– 5029.



Farklı Kalıp ve Fırın Sıcaklıkları Kullanılarak Yarı Katı Kalıplama Yöntemi ile Şekillendirilen A356 Alaşımının Sertlik ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi

The Investigation of Hardness and Microstructural Properties of A356 Alloy Shaped by Semi-Solid Molding Method Using Different Mold and Furnace Temperatures

Doğan Şimşek^{1*}, İjlal Şimşek^{1*}, Dursun Özyürek^{2*}

¹Milli Savunma Üniversitesi, Kara Astsubay Meslek Yüksekokulu, 10100, Balıkesir, TÜRKİYE

²Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, 78050, Karabük, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 18/12/2021

Kabul / Accepted: 31/12/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Bu çalışmada, yarı katı kalıplama yöntemi ile farklı fırın ve kalıp sıcaklıklarında üretilen A356 alaşımının mikroyapı, sertlik ve tane boyutu dağılımı incelenmiştir. A356 alaşımı tozlar, titreşimli değirmende 15 dakika karıştırılmış ve ardından 800 MPa basınç altında ve Ø12x8 mm boyutlarında ham numuneler üretilmiştir. Ham numunelerin yarı katı işlemlerinde iki farklı fırın (590 °C ve 600 °C) ve kalıp sıcaklıkları (350 °C ve 550 °C) kullanılmıştır. Ham numuneler, belirtilen fırın ve kalıp sıcaklıklarında 1 dakika preslendikten sonra hızla oda sıcaklığına soğutulmuştur. Yapılan çalışmalarda fırın ve kalıp sıcaklığının yarı katı kalıplama işlemi için önemli parametreler olduğu görülmüştür. Mikroyapı da büyük ölçüde küreselliğin sağlandığı tespit edilmiştir. En yüksek küresellik oranı 590 °C fırın ve 550 °C kalıp sıcaklığında %64 olarak elde edilmiştir. Tane boyutu dağılımı sonuçlarında 590 °C fırın ve 350 °C kalıp sıcaklığında ince taneli yapı elde edilmiştir. Sertlik sonuçlarında en yüksek sertlik, ince tane yapının elde edildiği kalıp ve fırın sıcaklığında (590°C fırın, 350°C kalıp) elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“A356 alaşımı, yarı katı kalıplama, tane boyutu, küresellik oranı”

Abstract

In this study, were investigated the microstructure, hardness and granulometry of the A356 alloy produced of different furnace and mold temperatures by the semi-solid molding method. A356 alloy powders were mixed in the vibrating mill for 15 minutes, after green compacts were produced under 800 MPa pressure and Ø12x8 mm dimensions. In the processes semi-solid of green compacts used two different furnace (590 °C and 600 °C) and mold temperatures (350 °C and 550 °C). Green compacts were rapidly cooled to room temperature after 1 minute pressed at specified furnace and mold temperatures. In the studies, were seen that the furnace and mold temperature is important parameters for the process semi-solid molding. In the microstructure were determined that has been achieved sphericity to a large extent. The highest sphericity rate was obtained as 64% at 590 °C furnace and 550 °C mold temperature. In the grain size distribution results, fine-grained structure was obtained at 590 °C furnace and 350 °C mold temperature. In the hardness results, the highest hardness was obtained at the mold and furnace temperature (590 °C furnace, 350 °C mold) where the fine grain structure was obtained.

Key Words

“A356 alloys, semi-solid molding, grain size, sphericity rate”

1. Giriş

A356 alaşımları en yaygın kullanılan Al-Si-Mg alaşımlarıdır. Bu alaşımlar özellikle düşük yoğunluğu, yüksek dökülebilirlik kabiliyeti, korozyon direnci ve kaynaklanabilirliği nedeniyle savunma sanayi, havacılık sanayi ve otomotiv sanayisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alaşımın kimyasal bileşiminde bulunan silisyum akışkanlığa, korozyon direncine ve mekanik özelliklere önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Alaşımın içerisinde bulunan magnezyum ise akma, çekme dayanımı ve süneklik üzerinde etkilidir (Şimşek vd. 2020). Bu alaşımlar yaygın olarak döküm (Tuncay vd. 2013; Dwivedi, 2004; Yıldırım ve Özyürek 2014), toz metalürjisi (Kim vd. 2012; Ozyurek vd. 2015) ve sprej birikimi (Laha vd. 2005) gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu üretim yöntemlerine ilaveten yarı katı şekillendirme yöntemi diğer üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında çok daha az gözenek, düşük çalışma basınçlarında üretim yapabilme, uzun kalıp ömrü ve düşük şekillendirme sıcaklıkları nedeniyle daha az enerji ihtiyacı gibi bazı avantajlar sağlamaktadır (Zoqui vd. 2004; Atkinson vd Liu 2008; Aztekin vd. 2010). Bu özelliklerin yanı sıra yarı katı şekillendirme yöntemiyle küresel yapı malzeme üretimi yarı katı şekillendirme yönteminin sağladığı diğer avantajdır (Özyürek vd.2012). Geleneksel döküm yöntemi ile üretilen alaşımlarda, oksitlenmeden kaynaklı gözenek olarak tanımlanan döküm kusurları, katılaşma sırasında oluşan çekme hataları gibi kusurlar malzemenin mekanik özelliklerini azaltmaktadır (Otarawanna ve Dahle, 2011). Bunun yanı sıra geleneksel döküm yöntemi ile üretilen Al alaşımlarının sahip olduğu klasik iğneli dentritik yapının alaşımın özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bununla birlikte katılaşma sırasında dentritik kollar arasında oluşan mikro gözenekler malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir.

Yapılan çalışmada, yarı katı şekillendirme işleminde farklı kalıp ve fırın sıcaklıkları kullanılarak A356 alaşımı malzeme üretilmiştir. Üretilen A356 alaşımı malzemenin küreselleşme oranı, sertlik ve tane boyutu ile fırın ve kalıp sıcaklıkları arasındaki ilişki incelenmiştir.

2. Malzeme ve Metod

DeneySEL çalışmalarda, özellikle otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan A356 (Al-Si-Mg) alaşımı kullanılmıştır. Külçe halinde temin edilen alaşım gaz atomizasyon yöntemiyle toz haline getirilmiştir. Üretilen tozların boyutu yaklaşık 30-50 µm aralığındadır. Kullanılan A356 alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir

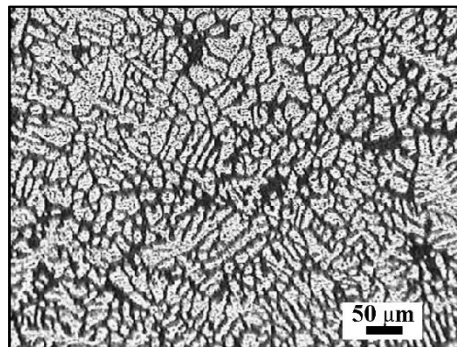
Tablo 1. DeneySEL çalışmalarda kullanılan A356 alaşımının kimyasal bileşimi (% ağı.)

A356	Si	Mg	Ti	Fe	Zn	Mn	Cu	Pb	Al
	6,5	0,4	0,2	0,15	0,05	0,03	0,03	0,03	Kalan

Toz haline getirilen A356 alaşımı tozlar titreşimli tip değirmende 15 dk. karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sonrasında hazırlanan tozlar tek yönlü hidrolik preste 800 MPa basınç altında Ø12x8 mm boyutlarında ham numuneler üretilmiştir. Yarı katı kalıplama işleminde PROTHERM marka silindirik boru tipi 1200 ±2 °C kapasiteli fırın kullanılmıştır. Yarı katı kalıplama işleminde grafit kalıp kullanılmıştır. Yarı katı işlem fırınında iki farklı fırın sıcaklığı (350 °C ve 550 °C) ve iki farklı kalıp sıcaklığı (590 °C ve 600 °C) kullanılmıştır (Özyürek, vd. 2012; Aztekin, vd. 2010). Soğuk şekillendirilen ham numuneler, belirlenen fırın ve kalıp sıcaklıklarında 30 dk. beklendikten sonra 20 kN pres kuvveti ile 1 dk. süre preslenmiş ve ardından oda sıcaklığına hızlı bir şekilde soğutulmuştur. Elde edilen yarı katı şekillendirilmiş numuneler standart metalografi işlemleri uygulanmıştır. Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numuneler 2 ml HF, 3 ml HCl, 20 ml HNO₃, 175 ml H₂O (Keller’s) solüsyonu kullanılarak 30 saniye süreyle dağlanmış. Dağlanan numunelerin mikroyapı incelemelerinde Meiji marka ML7100 optik mikroskop kullanılmıştır. Küresellik oranı ölçümü, MSQ PLUS 6.5 metalografik ölçüm ve analiz programında ASTM E112 standartlarına göre yapılmıştır. Sertlik ölçümleri, AFFRI VRSD251 markalı sertlik cihazında HV2.5 yük olarak 10 saniye süre ile ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri her numuneden merkezden dış yüzeye doğru 5 farklı ölçüm noktasından alınmıştır. Tane boyutu ölçümü ve dağılımı ImageJ görüntü analiz programı kullanılarak her görüntüden 50 ölçüm yapılmış ve % tane boyutu dağılımı olarak belirlenmiştir.

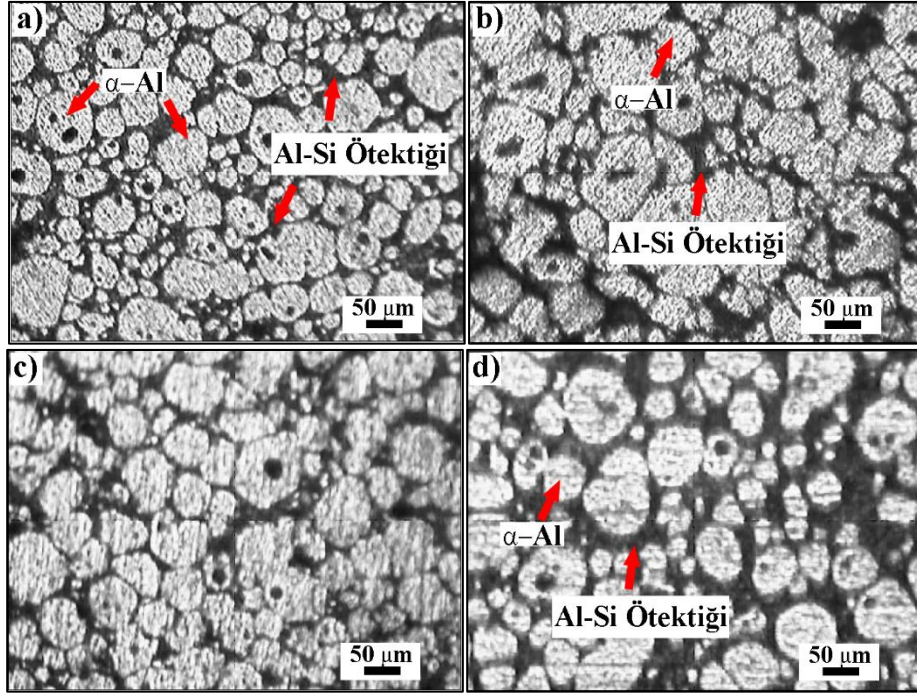
3. Bulgular ve Tartışma

Şekil 1’de başlangıç malzemesi olarak kullanılan A356 alaşımının optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.



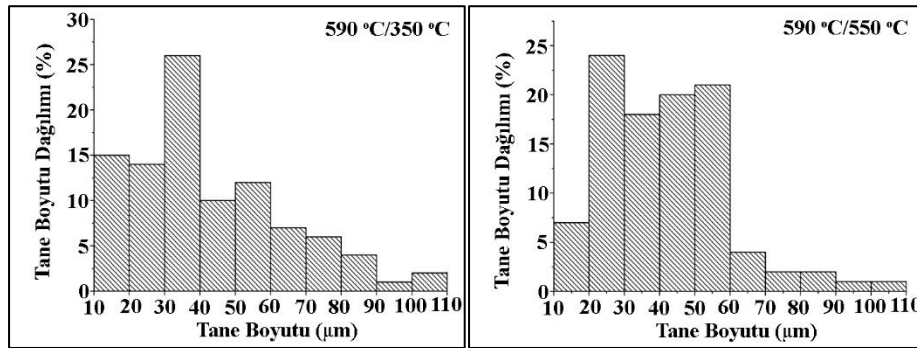
Şekil 1. Başlangıç malzemesi olarak kullanılan A356 alaşımının optik mikroskop görüntüsü

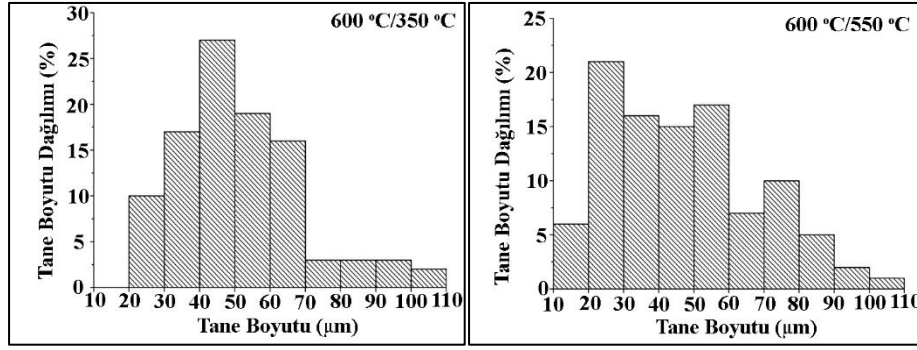
Şekil 1’de verilen başlangıç malzemesi olarak kullanılan Al-Si (A356) alaşımının mikro yapısı incelendiğinde, klasik döküm yöntemi ile elde edilen Al-Si alaşımlarının standart dentritik yapıya sahip olduğu görülmektedir. Malzemelerde dentritik yapı mekanik özellikleri ilgilendiren önemli bir parametredir (Şimşek vd. 2020) Dentritik yapıya sahip alaşımlarda dentritik kollar arasındaki boşluklar ve mesafeler alaşımın mekanik özelliklerini doğrudan ilgilendirmektedir. Farklı fırın ve kalıp sıcaklıklarında üretilen A356 alaşımlarının optik mikroskop görüntüleri Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Farklı fırın ve kalıp sıcaklıklarında üretilen A356 alaşımlarının optik mikroskop görüntüleri a)590F/350K b) 590F/550K c) 600F/350K d) 600F/550K

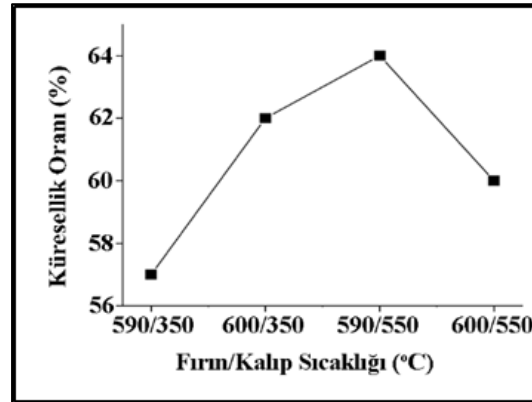
Şekil 2’de verilen farklı kalıp ve fırın sıcaklıklarında üretilen A356 alaşımlarının optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, bütün sıcaklıklarda başlangıçta dentritik yapının tamamen küresel forma dönüştüğü görülmektedir. En ince taneli yapının 590 °C fırın 350 °C kalıp sıcaklığında üretilen alaşımda olduğu görülmektedir. Sıcaklığın küreselleşme oranında etkili bir parametre olduğu anlaşılmaktadır. Kalıp sıcaklığının artmasıyla küreselleşme oranının yanı sıra tane büyüme eğiliminin de arttığı görülmektedir. Ayrıca fırın sıcaklığının artmasıyla Al-Si ötektik bölgelerin (siyah bölgeler) arttığı görülmektedir (Özyürek, 2011). Farklı fırın ve kalıp sıcaklıklarında yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen A356 alaşımlarının tane boyut dağılımı Şekil 3’te verilmiştir.





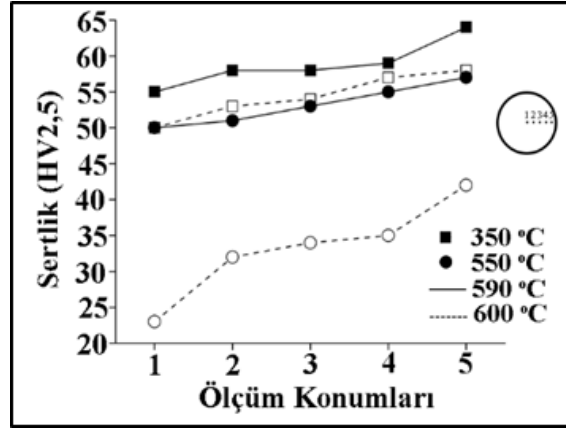
Şekil 3. Farklı fırın ve kalıp sıcaklıklarında yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen A356 alaşımların tane boyut dağılımı

Şekil 3’ de verilen farklı fırın ve kalıp sıcaklıklarında yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen A356 alaşımların tane boyutu dağılımları incelendiğinde, ince taneli yapının 590 °C fırın ve 350 °C sıcaklığında elde edildiği görülmektedir. 590 °C fırın, 350 °C kalıp sıcaklığında tane boyut dağılımının yüksek oranda 10-40 µm aralığında yaklaşık %15’ten büyük bir dağılım olduğu görülmektedir. Kalıp sıcaklığının 550 °C olmasıyla tane boyut dağılımının 10-20 µm aralığında tane boyutu dağılımının azaldığı görülürken 20-60 µm aralığında tane boyutu dağılımında ciddi bir artış olduğu görülmektedir. Benzer şekilde fırın sıcaklığının 600 °C’ye çıkmasıyla iki kalıp sıcaklığında tane boyutlarında artış olduğu görülmektedir. 600 °C fırın 350 °C kalıp sıcaklığında kalıplanan alaşımın yapısında tane boyutu dağılımının 20-60 µm aralığında yoğunlaştığı görülürken, kalıp sıcaklığının 550 °C olmasıyla tane boyutu dağılımının 20-60 µm aralığında azalma görülürken 70-100 µm aralığında boyutları dağılımında artışın olduğu görülmektedir. Sıcaklığın artmasıyla (hem fırın hem de kalıp) tane boyutlarında artış, alaşımın işlem sırasındaki katı sıvı oranı ile ilişkilidir (Özyürek vd, 2008). Farklı fırın ve kalıp sıcaklıklarında yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen A356 alaşımlarının küresellik oranı sonuçları Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. Farklı fırın ve kalıp sıcaklıklarında yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen A356 alaşımlarının küresellik oranı

Şekil 4.’te verilen farklı fırın ve kalıp sıcaklıklarında yarı katı kalıplama yöntemiyle üretilen A356 alaşımlarının küresellik oranları incelendiğinde, düşük fırın ve yüksek kalıp sıcaklığında küresellik oranının arttığı görülmektedir. Küresellik oranındaki bu artış sıvı haldeki Al-Si ötektik fazının viskozitesi ile açıklanabilir. Kalıp sıcaklığıyla birlikte fırın sıcaklığının artması viskozitenin azalmasına neden olur. Azalan viskozite α -Al tanelerinin küreselleşmesini engeller. Şimşek vd. tarafından yapılan bir çalışmada benzer sonuçların elde edildiği rapor edilmiştir (Şimşek vd. 2020). En yüksek küresellik oranı 590 °C fırın 550 °C kalıp sıcaklığında yaklaşık olarak %64 olarak elde edildiği görülmektedir. Fırın sıcaklığının artmasıyla aynı kalıp sıcaklıklarında küresellik oranı artmaktadır. Benzer şekilde aynı fırın sıcaklıklarında kalıp sıcaklığının artması küresellik oranını artırmaktadır. Ancak yüksek fırın ve kalıp sıcaklıklarında küresellik oranında azalma olduğu görülmektedir. Yarı katı kalıplama yöntemi ile şekillendirilmede sıcaklık önemli bir parametredir. Düşük fırın sıcaklıklarında alaşımın katı-sıvı faz oranında katı fazın fazla olması α -Al tanelerinin küreselleşmesini engellemektedir. Bununla birlikte artan kalıp sıcaklığı ile katı-sıvı faz oranındaki sıvı faz miktarının artması α -Al tanelerinin küreselleşme eğilimini artırmaktadır. Fırın sıcaklığı ile kalıp sıcaklıklarının da yükselmesi sıvı faz miktarının daha fazla artırır. Sıvı faz miktarının artması ise küresellik oranının azalmasına ve tanelerin büyümesine neden olmaktadır (Özyürek vd. 2008; Tzimas, ve Zavaliangos, 2000). Farklı fırın ve kalıp sıcaklıklarında yarı katı kalıplama yöntemiyle şekillendirilen A356 alaşımlarının sertlik sonuçları Şekil 5’te verilmiştir.



Şekil 5. Farklı fırın ve kalıp sıcaklıklarında yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen A356 alaşımların sertlik sonuçları (Maksimum Hata Oranı $\pm 8,7$)

Şekil 5'te verilen farklı fırın ve kalıp sıcaklıklarında yarı katı kalıplama yöntemiyle şekillendirilen A356 alaşımlarının sertlik sonuçları incelendiğinde, en yüksek sertlik 590 °C fırın 350 °C kalıp sıcaklığında yarı katı şekillendirilen A356 alaşımında elde edilmiştir. Yarı katı kalıplama yöntemiyle şekillendirme işleminde kalıp sıcaklığının sertlik üzerinde etkili bir parametre olduğu görülmektedir. İnce taneli yapının elde edildiği kalıp ve fırın sıcaklığında maksimum sertlik elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3'te verilen tane boyutu dağılımı sonuçları ile birbirini desteklemektedir. Üretilen alaşımın sertliğinde elde edilen artış tane sınırı mukavemet artırma mekanizması ile açıklanabilir. İnce taneli yapı ile alaşımın birim alandaki tane sınırlarının artması dislokasyonu hareketlerinin engellenmesi ile alaşımın sertliğinde artışa neden olur. Merkezden dış yüzeye yapılan ölçümlerde bütün sıcaklıklarda sertliğin arttığı görülmektedir. Yarı katı kalıplama yöntemi ile şekillendirilen malzemelerin soğumasıyla dış yüzeyin merkez ile karşılaştırıldığında daha serttir (Aztekin vd. 2010; Idegomi, 1998).

4. Sonuçlar

Yarı katı kalıplama yöntemi ile şekillendirilen A356 alaşımlarında farklı fırın ve kalıp sıcaklıklarının alaşımın başlangıçtaki dentritik yapının, bütün çalışma sıcaklıklarında büyük oranda küresel forma dönüştüğü görülmüştür. Yarı katı kalıplama yöntemiyle üretim sürecinde kalıp ve fırın sıcaklıklarının önemli birer parametre olduğu görülmüştür.

Tane boyutu dağılımı sonuçlarında en ince taneli yapının 590 °C fırın ve 350 °C kalıp sıcaklıklarında elde edilmiştir. Çalışma sıcaklıklarının artmasıyla tane boyutunun da artma eğiliminde olduğu görülmüştür. En yüksek tane boyutu dağılımı 600 °C fırın 550 °C kalıp sıcaklıklarında elde edilmiştir.

Üretilen alaşımın yapısında dentritik yapının küreselleşmesinde kalıp sıcaklığının daha etkili olduğu görülmüştür. Kalıp sıcaklığının artmasıyla küreselleşme oranında artma elde edilmiştir. En düşük küresellik oranının 590 °C fırın, 350 °C kalıp sıcaklığında %57 oranında elde edilirken en yüksek küresellik oranı 590 °C fırın, 550 °C kalıp sıcaklığında %63 olarak elde edilmiştir.

Üretilen alaşımın sertliğinde kalıp ve fırın sıcaklığının artmasıyla azalma olduğu görülmüştür. En yüksek sertlik, 590 °C fırın 350 °C kalıp sıcaklığında elde edilirken, en düşük sertlik 600 °C fırın, 550 °C kalıp sıcaklığında elde edilmiştir.

Sertlik ölçümlerinde merkezden dış yüzeye doğru gidildikçe bütün çalışma sıcaklıklarında Sertlik değerlerinde artış elde edilmiştir.

Referanslar

- D. K. Dwivedi, (2004), Sliding temperature and wear behaviour of cast Al-Si-Mg alloys, *Material Science and Engineering A*, 382 (1-2), 328-334.
- D. Özyürek, (2011), The effect of semi-solid processing parameters on microstructure in Al-7wt.Si alloy *Scientific Research and Essays*, 6(29), 6222-6226.
- D. Özyürek, M. Yıldırım, İ. Çiftçi, (2012), The tribological properties of A356-SiCp metal-matrix composites fabricated by thixomoulding technique, *Science and Engineering of Composite Materials*, 19(4), 351-356.
- D. Ozyurek, T. Tunçay, H. Evlen, İ. Ciftci, (2015), Synthesis, characterization and dry sliding wear behavior of in-situ formed TiAl3 precipitate reinforced A356 alloy produced by mechanical alloying method, *Material Research*, 18(4), 813-820.
- E. J. Zoqui, M. Paes, M. H. Robert, (2004), Effect of macrostructure and microstructure on the viscosity of the A356 alloy in the semisolid state, *Journal of Materials Processing Technology*, 153, 300-306.
- H. Aztekin, D. Özyürek, K. Çetinkaya, (2010), Production of hypoeutectic Al-Si alloy-based metal matrix composite with thixomoulding processing, *High Temperature Materials and Processes*, 29(3), 169-178.

- H. J. Kim, J. M. Lee, Y. H. Cho, S. Y. Sung, B. S. Han, Y. S. Ahn, (2012), Microstructures and wear properties of Al-Mg-Si alloy with the addition of ball-milled CoNi powders, *Material and Characterization*, 70, 137–144.
- H. V. Atkinson, D. Liu, (2008), Microstructural coarsening of semisolid aluminium alloys, *Materials Science and Engineering: A*, 496(1-2), 439-446.
- Idegomori, T. (1998). The manufacturing of automobile parts using semi-solid metal processing. In Proc. 5th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites Colorado, USA, June 23-25.
- M. Yildirim, D. Ozyurek, (2014), The effects of mould materials on microstructure and mechanical properties of cast a356 alloy,” *Journal of Advanced Material and Processes*, 2(3–12).
- Otarawanna S., Dahle A.K., (2011), *Casting of aluminium alloys*”, Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, 141-154
- Özyürek, D., Aktar, N., Aztekin, H. (2008), Design and construction of a thixo forming unit and production of Al–Si alloys. *Materials & Design*, 29(5), 1070-1074.
- Şimşek İ., Şimşek D. Özyürek D., (2020), Yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen farklı miktarlarda SiC takviyeli A356 matrisli kompozit malzemelerin aşınma performansının incelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 23(4), 1237-1243.
- Şimşek, İ., Şimşek, D., Özyürek, D. (2020), Investigation of the Effect of Ni Amount on the Wear Performance of A356 Cast Aluminum Alloys. *Metallurgist*, 63(9-10), 993-1001
- T. Laha, A. Agarwal, T. McKechnie, K. Rea, S. Seal, (2005), Synthesis of bulk nanostructured aluminum alloy component through vacuum plasma spray technique, *Acta Material*, 53(20), 5429–5438.
- T. Tuncay, S. Tekeli, D. Ozyurek, (2013), Difüzyörlü ve difüzyörsüz yolluk sistemlerinin A356 alaşımının mekanik özelliklerine etkisi, *Gazi University Journal of Engineering and Architecture*, 28(2), 241–249.
- Tzimas, E., Zavaliangos, A. (2000). Evaluation of volume fraction of solid in alloys formed by semisolid processing. *Journal of Materials Science*, 35(21), 5319-5330.



Alümina Porselen Bünyelerde Spodumen İlavesinin Teknik Özelliklere Etkisinin Araştırılması

Investigation of the Effect of Spodumene Addition on Technical Properties in Alumina Porcelain Bodies

Baran Tarhan , Müge Tarhan 

Usak University, Güzel Sanatlar Fakültesi, Seramik Bölümü, 64000 ve Uşak, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 15/12/2021

Kabul / Accepted: 10/01/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 15/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 15/01/2022

Öz

Porselen bünyeler sahip oldukları üstün teknik özellikleri nedeni ile pek çok alanda tercih edilen seramik ürünler arasında yer almaktadır. Çoğunlukla en az 1200°C ve üzerindeki sıcaklıklarda pişirilen porselen bünyelerin pişirim süreleri ürün tasarımı, boyutu ve bünye kompozisyon tasarımına bağlı olarak değişmektedir. Yüksek alüminalı porselen bünyelerin sinterleme sıcaklıklarının düşürülmesinin enerji maliyetleri ve verimlilik açısından önemi büyüktür. Çalışmada yüksek alüminalı porselen bünyelerde spodumen kullanımı araştırılmıştır. Standart yüksek alüminalı porselen bünye reçetesine kademeli spodumen ilave edilerek yeni bünye reçeteleri oluşturulmuştur. Hazırlanan porselen çamurların reolojik özellikleri ölçülmüş, pişirilen bünyelerin fiziksel ve ısı özellikleri incelenmiştir. Bünyelerin ısı genleşme katsayıları dilatometre cihazı ile belirlenmiştir. Sinterleme sürecinde bünyelerde gelişen fazlar X-ışınları difraktometresi ile belirlenmiş, mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Sonuçlara göre yüksek alüminalı porselen bünyede spodumen kullanımı çamurun reolojik özelliklerini değiştirmezken bünyelerin sinterlenme davranışı gelişmiş, bünyelerin su emmesi düşmüş ve pişme küçülmesi artmıştır. Bununla birlikte bünyelerin mekanik davranışlarında da belirgin iyileşme tespit edilmiştir. Ancak spodumen kullanımı bünyelerin deformasyonunda önemli bir artışa neden olmuştur. Sonuç olarak yüksek alüminalı porselen bünyelerde spodumen kullanımı ile bünyelerin teknik özellik ve mikroyapılarının kontrolü ile pişirim koşullarında pişirim sıcaklık ve süresinin azaltılması yönünde optimizasyonların yapılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler

“Alümina porselen, spodumen, sinterleme”

Abstract

Porcelain bodies are among the preferred ceramic products in many fields due to their superior technical properties. The firing times of porcelain bodies, which are mostly fired at temperatures of at least 1200°C and above, vary depending on the product design, size and body composition design. Reducing the sintering temperatures of high alumina porcelain bodies is of great importance in terms of energy costs and efficiency. In the study, the use of spodumene in high alumina porcelain bodies was investigated. New body recipes were prepared by adding gradual spodumene to the standard high alumina porcelain body recipe. The rheological properties of the prepared porcelain bodies were measured, and the physical and thermal properties of the fired bodies were examined. The thermal expansion coefficients of the structures were determined by the dilatometer. The phases developed in the bodies during the sintering process were determined by X-ray diffractometry, and their microstructures were examined by scanning electron microscope. According to the results, while the use of spodumene in the high alumina porcelain body did not change the rheological properties of the slip, the sintering behavior of the bodies improved, the water absorption of the bodies decreased and the firing shrinkage increased. In addition, a significant improvement in the mechanical behavior of the bodies was also detected. However, the use of spodumene caused a increase in the deformation of the bodies. As a result, it shows that optimizations can be made in order to reduce the firing temperature and time in firing conditions by using spodumene in high alumina porcelain bodies and by controlling the technical properties and microstructures of the bodies.

Key Words

“Alumina porcelain, spodumene, sintering”

1. Giriş

Sağlık gereçleri, elektriksel yalıtkanlar, diş protezleri ve sofraya ve dekoratif süs eşyaları gibi pek çok alanda kullanılmakta olan porselenler beyaz pişen, düşük su emme özelliğine sahip ve camsı (vitrikiye) yapıya sahip seramik malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Hammaddeler, üretim aşamaları ve pişirim sürecinin kinetikleri arasındaki karşılıklı etkileşimlerden dolayı porselenler seramik sistemler içerisindeki belki de en karmaşık sistemlerdir. Bu karmaşık reaksiyonlar nedeniyle porselenlerin yoğunluk, porozite, su emme, mukavemet, deformasyon, renk ve şeffaflık gibi teknik özelliklerini elde edilen mikroyapı kontrol eder. Vitrifikasyon yüksek pişirim sıcaklıklarında yüksek derecede ergimenin gerçekleşmesidir. Bunun sonucu olarak porselen bünyeler düşük porozite (< %0,5) ve yüksek camsı faza (> %40) sahiptir. Porselenlerin mikroyapısı ağırlıklı olarak müllit kristalleri, kristal kuvars, camsı faz, ve nadiren artık feldispat ve poroziteden oluşur. Porselenler genellikle %50 kil/kaolen, % 25 ergitici ve % 25 dolgu hammaddelerinden oluşan üç eksenli bir formülasyona sahiptir. Kil diğer hammaddeler arasında bağlayıcı görevi görerek bünyenin şekillendirilmesi için yeterli plastikiği sağlar ve genellikle kaolenler tercih edilir. Ergiticiler diğer bileşenlerle reaksiyona girerek sistemde camsı faz oluşum sıcaklığını düşürürler. Pişirim sürecinde gelişen bu camsı faz mikroyapıda yoğunlaşmayı sağlar. Ergitici olarak kullanılan hammaddeler sodyum feldispat, potasyum feldispat ve nefelin siyenit gibi alkali feldispatlardır. Dolgu hammaddesi olarak çoğunlukla kullanılan kuvars pişirim sıcaklıklarında kararlı bir pişirim sağlarken, yapısal bozulmayı ve küçülmeyi önler. Ayrıca kalsine alümina kuvars dönüşümünün etkisini azaltmak ve bünyenin mekanik özelliklerini geliştirmek için kuvars yerine dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır. Alüminanın feldispatik camsı faz içerisindeki çözünürlüğü kuvarsla kıyaslandığında oldukça yavaştır (Carty ve Senapati 1998, Lee ve Iqbal 2001, Turkmen ve ark. 2015, Lerdprom ve ark. 2016, Güngör ve Ay 2018). Bunların yanı sıra CaO kaynağı olarak vollastonit ve anortit de porselen üretiminde kullanılabilir. Vollastonit yaklaşık 1450°C’de ergimeye başlar ve alkali feldispatlar gibi ergitici olarak kabul edilmez. Bu diğer bileşenlerle olan reaksiyonuna bağlıdır. Hızlı ısıtma ve soğutma çevriminde çatlama ve yapısal bozulma olmadan pişirim sürecinin tamamlanması için vollastonit kullanımı önemlidir. Üçlü porselen sistemlerine vollastonit ilavesi pişirim sıcaklığını düşürebilir ve bünyenin mukavemetini artırabilir. Anortit beyaz pişen porselen bünyeler için kullanılabilir bir diğer mineraldir (Güngör 2018, Turkmen ve ark. 2015, Ke ve ark. 2013, Kurama ve Özel 2009). Kurama ve Özel yaptıkları çalışmada anortit oluşumunun kullanılan CaO kaynağında çok pişirim sıcaklığına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Mikroyapıda anortit kristalizasyonu, albitten anortit yapısına geçişteki kristalografik yapı değişimi nedeni ile bünyenin yoğunluğunu, mukavemetini ve kimyasal kararlılığını artırır (Kurama ve Özel 2009).

Porselenlerin üretimi sırasında en büyük enerji tüketimi pişirime işlemi sırasında meydana gelmektedir. Bu nedenle pişirim rejimini ve kimyasal kompozisyonu değiştirerek toplam enerji tüketimini azaltmaya yönelik pek çok çalışma yapılmıştır (Kivitz ve ark. 2009, Bragança ve ark. 2011, Bragança ve ark. 2012, Carús ve ark. 2012, Kunduracı ve Aydın 2015, Brasileiro ve ark. 2021, Tarhan ve Tarhan 2021). Esposito ve ark. yaptıkları çalışmada nefelin siyenitin porselen karo bünyelerinde pişirim sıcaklığını düşürerek enerji tasarrufu sağladığını belirtmişlerdir. Alkali içeriği yüksek olan nefelin siyenit porselen bünyenin daha iyi sinterlenmesini sağlayarak, açık poroziteyi ve dolayısıyla bünyenin su emmesini düşürürken, mukavemetini arttırmaktadır (Ceylan ve ark. 2005, Esposito ve ark. 2005, Kunduracı ve Aydın 2015, Elmaghaby ve ark. 2020). Porselen karo ve sağlık gereçleri bünyelerinde bir Li₂O kaynağı olarak spodumenin kullanımı üzerine yapılan çalışmalarda, spodumenin camsı faz oluşum sıcaklığını ve viskozitesini düşürerek bünyelerin sinterleme performansını geliştirdiği tespit edilmiştir. Spodumen ilavesi ile düşük viskozitedeki camsı faz taneler arası boşlukları daha kolay doldurarak poroziteyi ve por boyutunu düşürür. Ayrıca düşük viskozitedeki camsı faz ikincil müllit kristallerinin gelişimini de destekleyerek mekanik karakteristikleri de geliştirir (Iqbal ve Lee 1999, Iqbal ve ark. 2000, Lu ve ark. 2004, Tucci ve ark. 2007).

Bu çalışmada yüksek alüminalı porselen bünyelerde Li₂O kaynağı olarak spodumenin kullanımı ve bünye teknik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Çalışmada; standart yüksek alüminalı bünye reçetesine kademeli olarak spodumen ilave edilmiştir. Bu şekilde geliştirilen bünyelerin fiziksel ve ısıl özellikleri incelenerek spodumenin yüksek alüminalı porselen karo bünyelerde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Bünye geliştirme çalışmaları

Yüksek alüminalı bünye çalışmalarında üç farklı tür kaolen, kil, kuvars, potasyum feldispat ve Li₂O kaynağı olarak spodumen kullanılmıştır. Hammaddelerin XRF ile tayin edilmiş ait kimyasal analiz sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Reçetelerde kullanılan Kaolen 1 ve Kaolen 2 hammaddeleri Sibelco-Birleşik Krallık, Kil ve Potasyum feldispat hammaddeleri Kalemaden A.Ş.-Türkiye, Kaolen 3 hammaddesi Kaolin Endüstriyel Mineraller San. ve Tic. A.Ş.-Bulgaristan, Kuvars ve spodumen Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler San. ve Tic. A.Ş. Türkiye’den temin edilmiştir.

Tablo 1. Hammaddelerin XRF ile tayin edilmiş kimyasal bileşimleri (% ağı.)

	A.Z	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Li ₂ O
Kil	9,24	56,51	27,25	2,24	1,26	0,38	0,68	0,1	2,34	0
Alümina	0,20	0	99,55	0	0	0	0	0,25	0	0
Kaolen 1	11,3	48,88	35,65	0,89	0,14	0,05	0,35	0,03	2,71	0
Kaolen 2	10,03	57,77	26,96	0,94	1,42	0,17	0,36	0,29	2,06	0
Kaolen 3	11,94	51,38	34,22	0,95	0,36	0,15	0,16	0,11	0,73	0
Kuvars	0,21	98,15	1,08	0,03	0,02	0	0,05	0,34	0,12	0
Potasyum Feldispat	0,22	68,13	17,87	0,06	0,02	0,24	0,11	3,21	10,14	0
Spodumen	0,28	67,86	24,89	0,08	0,01	0,53	0,16	0,47	0,24	5,48

Yüksek alüminalı standart porselen bünye reçetesi 3 farklı tür kaolen, kil, kuvars, K-feldispat ve alümina hammaddelerinden oluşmaktadır. spodumenin yüksel alüminalı porselen bünye üzerine olan etkilerini belirlemek için yapılan çalışmada % 2, 5, 10 oranlarında spodumen standart reçete üzerine ilave edilmiştir. Oluşturulan reçeteler sırasıyla SP2, SP5 ve SP10 olarak kodlanmıştır. Standart bünye ve spodumen ilavesi ile geliştirilen bünye reçetelerinin oksit oranları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Standart ve geliştirilen bünyelere ait oksit kompozisyonları (%)

	A.Z	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Li ₂ O
STD	5,14	49,33	40,29	0,71	0,41	0,16	0,23	0,79	2,95	0,00
SP2	5,05	49,69	39,99	0,70	0,40	0,16	0,23	0,78	2,89	0,11
SP5	4,91	50,21	39,56	0,68	0,39	0,17	0,23	0,77	2,82	0,26
SP10	4,70	51,01	38,89	0,65	0,37	0,19	0,23	0,76	2,70	0,50

Yüksek alüminalı porselen bünye çalışmalarında bazı hammaddeler 63 µm altında alınarak, bazıları ise öğütülerek 63 µm altına düşürülerek kullanılmıştır. Hammaddelerin bünye reçetelerindeki kullanım oranları % rutubet değerleri de hesaplanarak oluşturulmuştur. Reçete oranlarına göre tartılan hammaddeler elektrolit ve su ilaveleri ile laboratuvar tipi hızlı karıştırıcıda katı konsantrasyonları %72, yoğunluk değeri yaklaşık 1870 g/lit olacak şekilde ayarlanmıştır. Hazırlanan çamurların reolojik değerleri Gallenkamp viskozimetresi ile ölçülmüştür. Çamur viskoziteleri 315–325° (V₀), 300–310° 1. dakika viskoziteleri (V₁) ve 240-260° 6. dakika viskoziteleri (V₆) olacak şekilde ayarlanmıştır. Hazırlanan çamurlar 1 gün dinlendirildikten sonra 190 × 25 × 15 mm döküm boşluğuna sahip alçı kalıp kullanılmıştır. Şekillendirme işleminden sonra 24 saat oda sıcaklığında bekletilen numuneler 110°C’lik etüvde 24 saat süre ile kurutulmuştur. Numunelerin pişirimleri 1225°C’de 14 saat süre ile endüstriyel tünel fırında gerçekleştirilmiştir.

2.2.Karakterizasyon

Bünye çalışmalarında kullanılan hammaddelerin kimyasal analizleri X- ışını floresans spektrometresi (XRF) ile tespit edilmiştir. Bünyelerin fiziksel özellikleri (su emme, kuru-pişme küçülmesi, mukavemet vb.) TS EN 997 standardına göre yapılmış, test sonuçlarında yapılan 5 ölçümün ortalama değeri alınmış ve % ±1,5 standart sapma değeri olacak şekilde değerlendirme yapılmıştır. Numunelerin kuru-pişme mukavemetleri üç noktali eğme testi ile belirlenmiştir. Bünyelerin pişme deformasyonu iki destek arasında yerleştirilen deformasyon çubuklarında sıcaklıkla meydana gelen değişimin milimetre cinsinden ölçülmesi yöntemi ile belirlenmiştir. Pişme deformasyonu tespiti için her bünyenin 1x4x26 cm boyutlarında deformasyon çubukları döküm yöntemi ile hazırlanmıştır. 1200°C tepe sıcaklığında deformasyon çubuklarında meydana gelen eğilme milimetre cinsinden ölçülerek deformasyon değerleri belirlenmiştir. Aynı sıcaklık değeri için numunelerin su emme değerleri de hesaplanmış deformasyon analizleri ile karşılaştırılarak numunelerin sinterleme davranışları belirlenmiştir. Numunelerin ısıl genleşme katsayısı tespiti dilatometre cihazı ile yapılmıştır. Bünyelerde gelişen fazlar X- ışınları difraktometresi, CuKα, 40 kV ve 30 mA şartlarında 10°-70° aralığında, tarama hızı 2°/dak. şartlarında belirlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Bünye Çamurlarının teknik özellikleri

Yüksek alüminalı porselen bünyelerin kimyasal kompozisyonları Tablo 2’de verilmiştir. Bünye kompozisyonlarında Li₂O kaynağı olarak spodumen kullanılmasıyla birlikte Na₂O ve K₂O oranları düşmekte, toplam alkali miktarı belirgin şekilde değişmezken SiO₂ miktarı ise spodumen kaynağındaki SiO₂ miktarının kil ve kaolen gibi hammaddelere göre fazla olması nedeniyle birlikte artmaktadır.

Bünye çamurlarına ait yoğunluk ve akışkanlık değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Çamurların ilk (V_0), 1. dakika (V_1) ve 6. dakikada (V_6) ölçülen viskoziteleri incelendiğinde yüksek alüminalı porselen bünyelerde spodumen kullanımı ile birlikte akışkanlık değerlerinin belirgin şekilde değişmediği tespit edilmiştir. Bünyelerin kalınlık alma değerleri incelendiğinde tüm bünyelerde kalınlık alma değerlerinin birbirlerine yakın ve 8,0 – 8,5mm/90 dakika aralığında olduğu görülmektedir. Bünye çamurlarının tüm reolojik özellikleri incelendiğinde yüksek alüminalı porselen bünyelerinde spodumen kullanımının çamur reolojik özellikleri üzerine belirgin bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir.

Yüksek alüminalı porselen bünyelerde kil ve 3 farklı tür kaolen kullanılmıştır. Kil özlü hammaddelerden olup bünyeye plastik özellik kazandırmak için kullanılmakta, ürüne yaş ve kuru dayanım sağlarken aynı zamanda şekillendirme sonrası uygulanan rötuş işlemlerini de mümkün kılmaktadır. Kaolenler ise döküm yöntemi ile şekillendirme yönteminde çamurun kalınlık alma özelliğini kontrol eder. Bu nedenle farklı özelliklerde kaolenlerin kullanılması ile bünyelerin kalınlık alma süreleri kontrol edilmektedir. Alkali kaynağı olarak kullanılan potasyum feldispat bünyede ergitici görevini üstlenirken, alümina bünyeye yüksek mukavemet kazandırmak için kullanılmaktadır. Çalışmada yüksek alüminalı porselen bünyelerde spodumen kullanımının çamurun akışkanlık ve kalınlık alma özelliklerinde belirgin farklar yaratmadığı, teknik özelliklerin standart bünye değerlerine yakın olarak elde edildiği tespit edilmiştir.

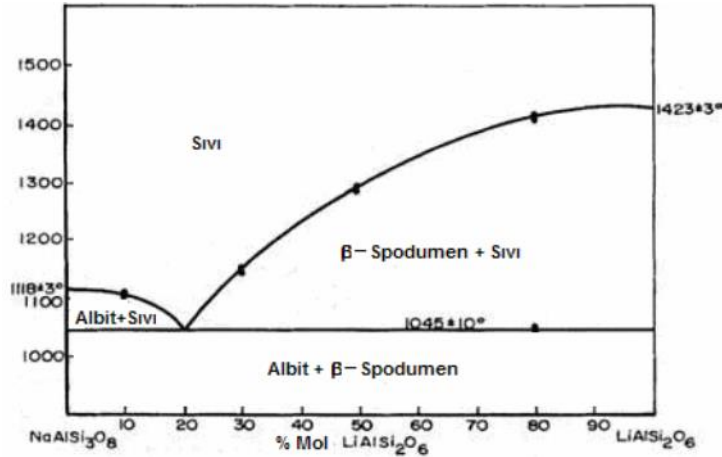
Tablo 3. Vitrikiye bünye çamurlarının teknik özellikleri

	STD	SP2	SP5	SP10
Yoğunluk (g/lt)	1875	1874	1870	1872
Viskozite (V_0 - Gallenkamp G°)	65	70	75	70
1. dak. Viskozite (V_1 - Gallenkamp G°)	325	315	315	324
6. dak. Viskozite (V_6 - Gallenkamp G°)	260	245	240	254
Elektrolit (%)	0,35	0,38	0,40	0,41
Kalınlık Alma (mm - 60 dak.)	8,2	8,3	8,5	8,5

3.2. Fiziksel Özellikler

Spodumen ilavesi ile geliştirilen bünyelerin fiziksel özellikleri Tablo 4'te verilmiştir. Bünyelerde kullanılan spodumen ilavesi ve spodumen oranındaki artış ile birlikte su emme değerlerinde belirgin bir azalma, pişme küçülme değerlerinde ise artış tespit edilmiştir. Bu da yüksek alüminalı porselen bünyelerde spodumen kullanımının bünye sinterlenmesini arttırdığını göstermektedir. Bünyelerde spodumen kullanılması kompozisyonlarda Li_2O ve toplam alkali oksit oranını artırırken diğer alkali oksit (Na_2O , K_2O) oranlarında ve Al_2O_3 oranında azalmaya neden olmaktadır.

Porselen bünyelerde ekonomik ve uygun pişirim sıcaklığı için genellikle SiO_2 - Al_2O_3 - M_2O üçlü sistemine bağlı olan kompozisyonlar kullanılmaktadır. Pişirim sürecinde camsı fazın gelişimi porselen bünyelerin sinterlenerek yoğunluğunun artması ve porların kapanması için önemlidir. Kompozisyonlarda kullanılan feldispatın türü ve miktarı camsı fazın oluşum sıcaklığı ve viskozitesini belirlemektedir. Sistemde M_2O grubu oksitler ötektik kompozisyonların oluşmasını sağlayarak ergitici görevi görmekte olup, çoğunlukla sodyum ve potasyum feldispattan sağlanmaktadır. Li_2O 'ın porselen bünyelere düşük oranda ilavesi de bünyelerde camsı faz oluşumunu destekleyerek sinterleme sıcaklığını düşürmektedir. Şekil 1'de verilen albit-spodumen faz diyagramı incelendiğinde sisteme yapılan Li_2O ilavesi ile birlikte ötektik sıcaklığın $1045 \pm 10^\circ C$ 'ye kadar düştüğü ve sıvı faz oluşumunun kolaylaştığı görülmektedir. Alkali oksitlerle aynı grupta yer aralan ve en küçük katı element olan lityum, hareket kabiliyetinin yüksek olmasından dolayı sodyum ve potasyum okside göre çok daha güçlü bir ergiticidir. Li_2O kaynağı olarak spodumenin kullanıldığı bünyelerde spodumen oranındaki artışla birlikte bünyelerin su emme değerlerinin belirgin şekilde düştüğü tespit edilmiştir. Bu da spodumen ilavesi ile geliştirilen bünyelerin standart bünyeye göre çok daha iyi sinterlendiğini ve mikroyapıda por eliminasyonu ile toplam porozitenin daha az olduğunu göstermektedir. Bünyelerin sinterlenme davranışında Li_2O oranının Na_2O ve K_2O 'e göre çok daha etkili olduğunu göstermektedir.



Sekil 1. NaAlSi₃O₈ – LiAlSi₂O₆ sistemine ait faz diyagramı (Badger ve Hummel 1985).

Bünyelerin kuru mukavemet değerlerinde spodumen ilavesiyle birlikte bir miktar düşüş tespit edilmiştir. Kompozisyon çalışmalarında spodumen standart yüksek alüminalı porselen bünye reçetesi üzerine artan oranlarda ilave edilmiştir. Bu nedenle artan spodumen ilavesi ile birlikte bünyelerde kullanılmakta olan kil ve kaolen oranları da az da olsa azalma göstermektedir. Kuru mukavemet değerlerindeki düşme yönündeki bu eğilimin azalan kil, kaolen oranlarına bağlı olduğu düşünülmektedir.

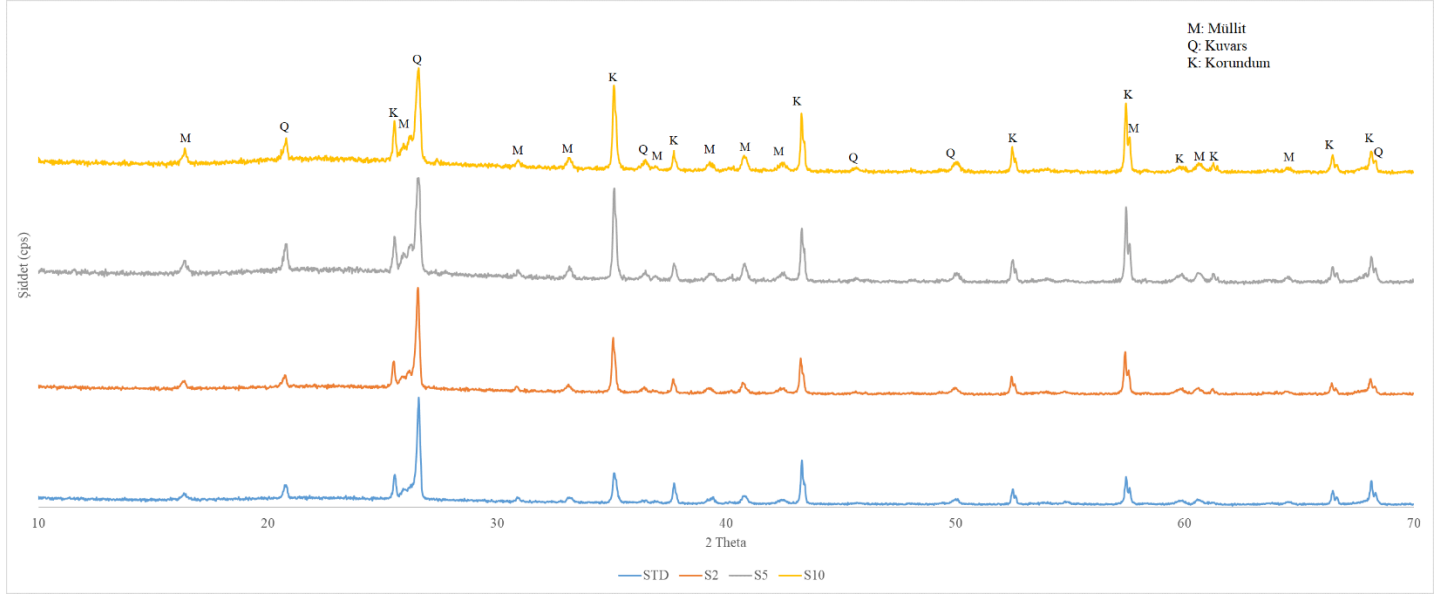
Bünyelerin pişme mukavemet değerlerinde spodumen ilavesindeki artışla birlikte oldukça belirgin bir artış tespit edilmiştir. Bu durum spodumen kullanımı ile birlikte bünyelerde su emmenin düşmesi, pişme küçülmesinin ve yoğunluğun artması dolayısıyla azalan por boyut ve/veya miktarı ile açıklanabilir. Seramik bünyelerin mikroyapısındaki porozite mukavemete etki eden en önemli parametrelerden biridir. Porların varlığı çatlak başlangıcını kolaylaştırdığından, porozitenin artması ve yoğunluğun azalması ile seramik bünyelerin mukavemeti azalmaktadır (Tarhan 2010, Tarhan ve Tarhan 2019). Seramik bünyelerin kırılma mukavemetini etkileyen bir diğer parametre sinterleme sürecinde mikroyapılarında gelişen müllit kristalleridir. Porselen bünyelerin mukavemeti artan müllit içeriği ile artmaktadır. Çubuksu yapıda olan ikincil müllit kristalleri birincil müllitlere göre bünye mukavemetini daha çok artırır. İkincil müllit kristalleri kil yüzeyinden viskozitesi daha düşük olan amorf faz içine doğru büyümeye başlar. Dolayısıyla amorf fazın viskozitesi düşükçe ikincil müllit kristal boyutları da artış gösterir. Bünyelerde spodumenin varlığı düşük viskoziteli amorf faz gelişimini destekleyerek boyutları daha büyük olan iğnemsiz müllit kristallerinin oluşumuna ve bünye mekanik özelliklerinin iyileşmesine neden olmaktadır (Tarhan ve ark. 2017).

Tablo 4. Alümina porselen bünyelerin fiziksel özellikleri

	STD	SP2	SP5	SP10
Pişme Küçülme (%)	10,74	11,00	11,60	12,02
Su emme (%)	3,90	1,96	0,14	0,00
Kuru Mukavemet (kg/cm²)	18,5	16,4	17,9	15,6
Pişme Mukavemeti (kg/cm²)	599,0	594,2	628,3	822,9
Pişme Deformasyonu (mm)	22	25	30	36
Isıl Genleşme Katsayısı (10⁻⁷ °C⁻¹) (20-400°C)	60,11	60,82	61,51	61,36

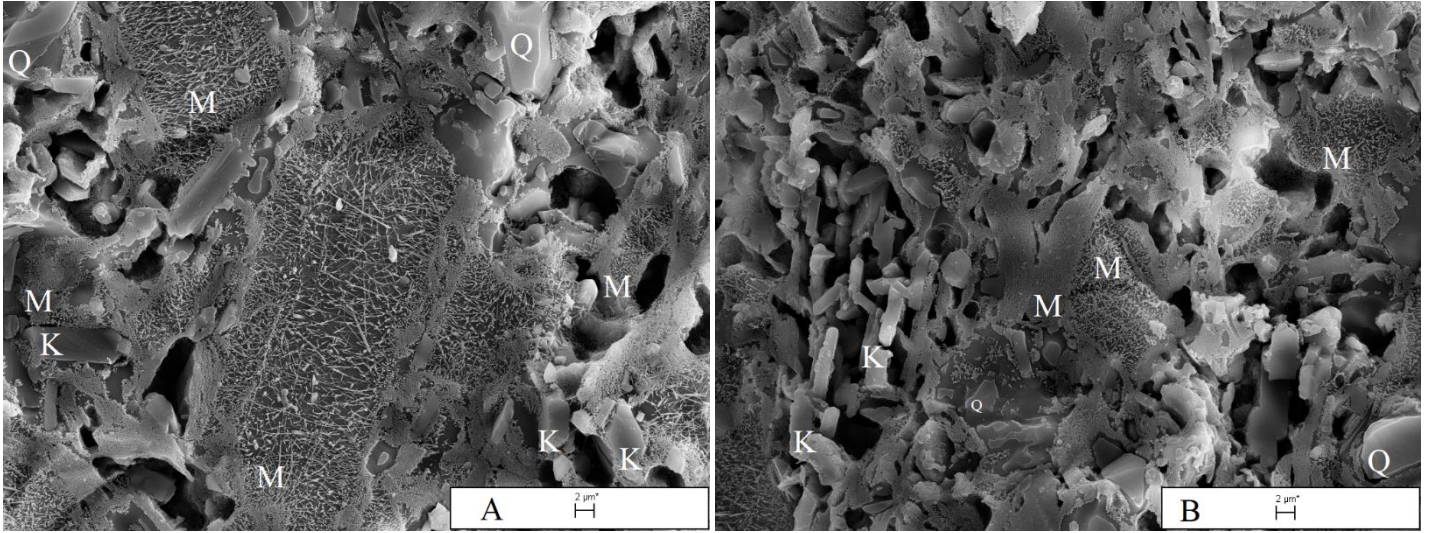
Bünyelere ait deformasyon değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Bünyelerde spodumen kullanımı ile birlikte deformasyon değerlerindeki artış dikkat çekmektedir. Piroplastik deformasyon, bünyelere herhangi bir yük uygulamadan yalnız sıcaklığın etkisi ile bünyenin kendi ağırlığı altında deforme olma eğilimi olarak tanımlanmaktadır. Sinterleme sürecinde gelişen camsı fazın miktarı ve viskozitesi bünyelerin deformasyon davranışını belirlemektedir. Camsı fazın miktarındaki artış ve viskozitesinin düşmesi ile birlikte porselen bünyelerin deformasyon davranışı kötüleşmektedir (Hopa ve Özel 2016, Güngör 2018, Kunduracı ve ark. 2019, Tarhan ve Tarhan 2019). Spodumen içeren porselen bünyelerde gelişen camsı fazın viskozitesi standart bünyeye göre çok daha düşüktür. Bundan dolayı porselen bünyelerde spodumen kullanımı deformasyon açısından dezavantajlıdır.

Bünyelerin 400°C'deki ısı genleşme katsayıları Tablo 4'te verilmiş olup, spodumen kullanımını ile birlikte porselen bünyenin ısı genleşme katsayısının bir miktar artış gösterdiği görülmektedir. Spodumen bünyelerde direk standart bünye reçetesi üzerine ilave edilerek kullanılmıştır. Bundan dolayı bünyelerde ısı genleşme katsayısı düşük olan, az miktarda kuvars fazı içeren kil, kaolen gibi hammaddelerin oranları da bir miktar azalırken, spodumen hammaddesinden sisteme önemli miktarda kuvars (SiO₂) girmektedir. Tablo 2'de verilen bünyelerin kimyasal analizlerinde de spodumen ilavesi ile birlikte artan SiO₂ oranı görülmektedir. Porselen bünyelerde sinterleme sonrasında önemli bir miktar kuvars kalıntı olarak mikroyapıda yer almaktadır. Kristal yapıdaki bu kuvarsın ısı genleşme katsayısı oldukça yüksek olup bünyelerin ısı genleşme katsayısını yükseltmektedir. Bu nedenle bünyelerde artan spodumen ilavesi ile birlikte ısı genleşme katsayısının bir miktar arttığı düşünülmektedir (Kingery *et al.* 1976, Eppler and Eppler 2000, Tarhan 2019).



Sekil 2. Hazırlanan kompozisyonların XRD analizlerine ait grafikler.

Bünyelere ait XRD analizi sonucu Şekil 2'de, standart bünye ve en fazla miktarda spodumenin kullanıldığı SP10 kodlu bünyenin SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 3'de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre kuvars, müllit ve korund fazları tüm bünyelerde tespit edilmiştir. Ancak yüksek alüminalı porselen bünyelere spodumen ilavesi ile birlikte müllit ve korund fazına ait pik şiddetinin arttığı tespit edilmiştir. Porselen bünyelerde iki farklı tür müllit gelişimi söz konusudur. Birincil müllitin oluşunu metakaolenden oluşan spinel fazın dönüşümü ile gerçekleşirken ikincil müllitler yaklaşık 1200°C sıcaklıklarda kil ve feldispat eriyiği arasındaki reaksiyondan oluşur. Alümina porselenlerde ise üçüncül bir müllit oluşumu gerçekleşir. Bu üçüncü tip müllit korund kristallerinin kenarlarında alüminanın SiO₂ bakımından zengin matris içinde çözünmesi ve daha fazla çökeltilmesiyle gelişir (Montoya ve ark. 2010) Yapılan çalışmada alümina porselen bünyesine spodumen ilavesi ile birlikte müllit fazındaki artışla birlikte korund fazındaki artış dikkati çekmektedir. Bu da bünyede müllit gelişiminin korund kristallerinden çok kil ve feldispat eriyiği arasındaki reaksiyonla gerçekleştiğini göstermektedir. Spodumenin amorf faz gelişimini artırması ve viskozitesini düşürmesi müllit kristallerinin kil minerallerinden eriyiğe doğru gelişimini kolaylaştırmıştır.



Şekil 3. Dağlanmış ikincil elektron SEM görüntüleri A) SP10, B) STD kodlu kompozisyonlar(Q: kuvars, K: korund, M: müllit)

4. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada, yüksek oranda alümina içeren porselen bünye kompozisyonlarında spodumen kullanımının bünyelerin fiziksel, ısıl, mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkileri araştırılarak bünyelerde kullanılabilirliği incelenmiştir. Bünyelerde spodumen kullanımı bünyelerin sinterlenmesini kolaylaştırarak bünyelerin su emmesini düşürmüş ve pişme küçülmesini artırmıştır. Bünyelerde artan sinterleme oranına paralel olarak porozitede azalmıştır. Bununla birlikte bünyelerde artan müllit faz gelişimi ve artan korund faz miktarı bünyelerin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkileyerek pişmiş mukavemet değerlerinin belirgin şekilde artmasına neden olmuştur. Ancak spodumen kullanımı ile bünyelerin sinterleme davranışındaki gelişmeye de bağlı olarak bünyelerin deformasyon değerleri önemli ölçüde artmıştır. Ayrıca geliştirilen bünyelerde spodumen kullanımı bünyenin ısıl genleşme katsayısını bir miktar artırmıştır. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde; yüksek alümina içeren porselen bünyelerde spodumen kullanımı bünyelerde sinterlemeyi hızlandırdığından teknik özellikler ve mikroyapı kontrollü olarak pişirim rejimi üzerinde pişme sıcaklıklarının düşürülmesi ve/veya pişirim sürelerinin kısaltılması yönünde çalışmaların yapılabileceği ve bünye kompozisyonu üzerinde yapılacak optimizasyon çalışmaları ile spodumenin yüksek alüminalı porselen bünyelerde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Kaynaklar

- Badger, W.B. ve Hummel F.A. (1985), Phase equilibrium in system $\text{LiAlSiO}_4\text{-NaAlSiO}_4\text{-SiO}_2$, J. Am. Ceram. Soc., 68[2], C-46–C-47
- Bragança, S. R., Lengler, H. C. M., & Bergmann, C. P. (2011). Spodumene-bearing rock as flux for triaxial ceramic bodies. *Advances in Applied Ceramics*, 110(5), 293-300
- Bragança, S. R., Lengler, H. C. M., & Bergmann, C. P. (2012). Wollastonite as a flux for ceramics bodies. In *Materials Science Forum* (Vol. 727, pp. 1016-1021). Trans Tech Publications Ltd.
- Brasileiro, C. T., Conte, S., Contartesi, F., Melchiades, F. G., Zanelli, C., Dondi, M., & Boschi, A. O. (2021). Effect of strong mineral fluxes on sintering of porcelain stoneware tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, 41(11), 5755-5767
- Carty, W. M., & Senapati, U. (1998). Porcelain—raw materials, processing, phase evolution, and mechanical behavior. *Journal of the American Ceramic Society*, 81(1), 3-20
- Carús, L. A., de Souza, F., & Bragança, S. R. (2012). Use of wollastonite as a flux for bone china bodies. *International Scholarly Research Notices*

- Ceylan, A., Ebeođlugil, M.F., Kűçük, A. (2005), Farklı tür feldispat ilavelerinin yer karosu bűnyesine etkilerinin incelenmesi, Seramik Türkiye, No.7, 131-137
- Elmaghraby, M.S., Ismail, A.I.M., Ghabrial, D.S., & Abd El-Shakour Z. A. (2020). Effect of Nepheline Syenite Additives on the Technological Behavior of Ceramics and Porcelain Stoneware Tiles. *Silicon* 12, 1125–1136
- Eppler, R. A. and Eppler, D. R., 2000. Glazes and glass coatings, American Ceramic Society, Westerville, Ohio
- Esposito, L., Salem, A., Tucci, A., Gualtieri, A., Jazayeri, S.H. (2005), The use of nepheline-syenite n a body bix for porcelain stoneware tiles, *Ceramics International*, 31, 233-240
- Gűngör, F. (2018). Investigation of pyroplastic deformation of whitewares: Effect of crystal phases in the ‘‘CaO’’based glassy matrix. *Ceramics International*, 44(11), 13360-13366
- Gűngör, F., & Ay, N. (2018). The effect of particle size of body components on the processing parameters of semi-transparent porcelain. *Ceramics International*, 44(9), 10611-10620
- Hopa, D. Y. T., & Emel, Ö. Z. E. L. (2016). Kaolen türűnűn sađlık gereçleri porselen bűnyesinin piroplastik deformasyonu űzerine etkisi. *Gazi űniversitesi Műhendislik Mimarlık Fakűltesi Dergisi*, 31(2)
- Iqbal, Y. ve Lee, W.E. (1999), Fired porcelain microstructures revisited, *J. Am. Ceram. Soc.*, 82 (121), 3584–3590
- Iqbal, Y., Messer, P.F., Lee, W.E. (2000), Microstructural evolution in triaxial porcelain, *J. Am. Ceram. Soc.* 83 (12), 3121–3127
- Ke, S., Cheng, X., Wang, Y., Wang, Q., & Wang, H. (2013). Dolomite, wollastonite, and calcite as different CaO sources in anorthite-based porcelain. *Ceramics International*, 39(5), 4953-4960
- Kingery WD, Bowen HK, Uhlmann DR, Introduction to Ceramics. USA: John Wiley and Sons Inc; ISBN 0-471-47860-1. 1960. pp 809
- Kivitz, E., Palm, B., Heinrich, J. G., Blumm, J., & Kolb, G. (2009). Reduction of the porcelain firing temperature by preparation of the raw materials. *Journal of the European Ceramic Society*, 29(13), 2691-2696
- Kunduracı, N. & Aydın, T. (2015). The effect of nepheline syenite addition on sanitaryware Body, *International Journal of Engineering Research and Development*, 7 (2), 16-19. DOI: 10.29137/umagd.346107
- Kunduracı, N., Tarhan, B., & Sarısakal, C. (2019). Seramik Sağlık Gereçleri űrünlerinde Piroplastik Deformasyonun Azaltılmasına Bağlı Olarak Geliştirilen Kompozisyonların űretim Maliyeti Açıısından Deđerlendirilmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(2), 474-480
- Kurama, S., & Ozel, E. (2009). The influence of different CaO source in the production of anorthite ceramics. *Ceramics International*, 35(2), 827-830
- Lee, W. E., & Iqbal, Y. (2001). Influence of mixing on mullite formation in porcelain. *Journal of the European Ceramic Society*, 21(14), 2583-2586
- Lerdprom, W., Chinnam, R. K., Jayaseelan, D. D., & Lee, W. E. (2016). Porcelain production by direct sintering. *Journal of the European Ceramic Society*, 36(16), 4319-4325
- Lu, H.Y., Wang, W.L., Tuan, W.H., Lin, M.H. (2004), Acicular mullite in vitrified kaolin, *J. Am. Ceram. Soc.*, 87 (10), 1843-1847
- Montoya, N., Serrano, F. J., Reventós, M. M., Amigo, J. M., & Alarcón, J. (2010). Effect of TiO₂ on the mullite formation and mechanical properties of alumina porcelain. *Journal of the European Ceramic Society*, 30(4), 839-846

- Tarhan, B. (2019). Usage of fired wall tile wastes into fireclay sanitaryware products. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 55(3), 737-746
- Tarhan, B., & Tarhan, M. (2019). Çanakkale bölgesi alkali kaynağının seramik sağlık gereçleri bünyesi ısı ve mikroyapı özellikleri üzerine etkisi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(2), 675-687
- Tarhan, B., & Tarhan, M. (2021). Utilization of perlite as an alternative raw material in the production of ceramic sanitaryware. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1-10
- Tarhan, B., Tarhan, M., & Aydın, T. (2017). Reusing sanitaryware waste products in glazed porcelain tile production. *Ceramics International*, 43(3), 3107-3112
- Tarhan, M, 2010. Porselen karo bünyelerinde sinterleme hızı-kompozisyon ilişkileri. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 230
- Tarhan, M., & Tarhan, Ş. B. (2019). Sırlı Porselen Karo Üretimi için Alternatif Hammadde Olarak Eşme/Uşak Feldspatı. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(2), 429-438
- Tucci, A., Esposito, L., Malmusi, L., Rambaldi, E. (2007), New body mixes for porcelain stoneware tiles with improved mechanical characteristics, *Journal of The European Ceramic Society*, 27, 1875-1881
- Turkmen, O., Kucuk, A., & Akpınar, S. (2015). Effect of wollastonite addition on sintering of hard porcelain. *Ceramics International*, 41(4), 5505-5512



Aramid Elyaf Takviyeli Polimer Matris Kompozitlerin Mekanik Deney Sonuçlarının Yapay Sinir Ağlarıyla Tahminleri ve İstatistiksel Analizleri

Predictions and Statistical Analysis of Mechanical Experiment Results of Aramid Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites with Artificial Neural Networks

Fatih Buyrul¹, Volkan Ateş², Altan Tunçel³, Azmah Hanim Mohamed Ariff⁴, Recep Çalın⁵

¹Kırıkkale Üniversitesi, Savunma Teknolojileri Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

²Kırıkkale Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

³Kırıkkale Üniversitesi, Aktüerya Bilimleri Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

⁴Putra Üniversitesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü, MALEZYA

⁵Kırıkkale Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 29/12/2021

Kabul / Accepted: 31/12/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Kompozit malzemelerde polimer matris en çok tercih edilen malzeme türlerinden biri haline gelmesi personel koruma ya da diğer zırh malzemesi türlerinde de kullanımını artırmakla birlikte gelişmeye devam etmektedir. Mekanik deney sonuçlarını birçok yöntemle matematiksel modellemesi yapılırken en fazla tercih edilenlerden bir tanesi de yapay sinir ağları olmaktadır. Kompozit malzemelerin birden fazla parçacık ya da malzemelerin birleşimiyle oluşmasından dolayı birleşime dahil olan parça ya da malzemenin mekanik sonuçlara etkisinin anlamlı veya anlamsız olduğunu söylemenin en güzel yollarından biri de istatistiksel analizlerdir. İstatistiksel analizlerle bilgi ve yorumlanmasıyla birlikte diğer oran ya da türevlerinin kıyaslama ya da karşılaştırma yapılmasına da olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada; Numuneler 8 katlı Aramid elyaf takviyeli ve dolgu malzemesi olarak ağırlıkça %0, %1, %2 ve %4 oranında TiB₂ ilaveli olup ayrıca 45⁰ ve 90⁰ oryantasyona sahip olarak üretilmiştir. Yapay sinir ağları ve İstatistiksel analizler ağırlıkça %1 TiB₂ ilaveli ve 90⁰ oryantasyona sahip kompozitler diğer oranlara göre balistik amaca en anlamlı sonucu vermiştir.

Anahtar Kelimeler

“İç İç Tasarımlı ve Faktöriyel Varyans Analizi, Polimer Matrisli Kompozitler, Yapay Sinir Ağları, nftool, Kevlar-49, Aramid Elyaf”

Abstract

In composite materials, the polymer matrix continues to develop as one of the most preferred material types, and its use in personnel protection or other armor material types is increasing. While mathematical modeling of mechanical test results with many methods is done, artificial neural networks are one of the most preferred ones. Statistical analysis is one of the best ways to say that the effect of the part or material included in the combination on the mechanical results is significant or insignificant, since composite materials are formed by more than one particle or combination of materials. It also allows comparison or compensation of other ratios or derivatives, along with information and interpretation through statistical analysis. In this study; The samples were produced with 8-layer Aramid fiber reinforced and 0%, 1%, 2% and 4% TiB₂ additions as filling material and also with 45⁰ and 90⁰ orientations. Artificial neural networks and Statistical analysis, composites with 1% TiB₂ addition and 90⁰ orientation gave the most significant result for ballistic purpose compared to other ratios.

Key Words

“Nested Design and Factorial Analysis of Variance, Polymer Matrix Composites, Artificial Neural Networks, nftool, Kevlar-49”

1. Giriş

Personel koruma zırh teknolojileri için üretilen polimer matrisli kompozitlerin mekanik deneylerinin güvenilirliğini sayısal ifadelerle tanımlamak ve ölçmek için analiz edilmesi gerekmektedir (Kubat C. vd. 2017). Elde edilen verilerin önemini arz edebilmek farklı yöntemler mümkün olmakla birlikte yapay sinir ağlarıyla modellenip tahminlerinin karşılaştırılması ayrıca önem arz etmektedir. İstatistiksel yaklaşımlarla birlikte elde edilen malzemenin analizler için de en uygun deney tasarımının oluşturulması analizlerin daha iyi açıklanmasını sağlamaktadır (Akşehirli Ö. vd. 2012). Birçok etken ve faktörün birbirleriyle olan etkileşimini ve minimum hata ile açıklanması için kullanılan analizlerinden ikisi faktöriyel varyans analizi ya da iç içe tasarımlı varyans analizleridir (Eyecioğlu Ö. 2021; Gedik İ. 2010; Suresh N., 2021).

Bu analizler sayesinde verilerin merkezi eğilim ölçümleri hakkında bilgi verilmesi ya da yorumlanmasına olanak sağlamaktadır. Bu bilgiler ışığında mod, medyan, ortalaması, standart sapması veya varyans gibi betimsel istatistiklerin açıklanmasının yanında birden çok faktörün birleriyle etkileşimlerin anlamlı ya da anlamsız olduğunu söyleyebilmeye olanak sağlamaktadır (Eyecioğlu Ö., 2021; Gedik İ., 2010). Bayesian Model Averaging çoklu verilere odaklı bir yöntemin entegrasyonu yoluyla toplu veriler üzerine bir model oluşturulur. Bu modelle; tek veya birçok parametre modeline dayalı istatistiksel çıkarımlar yoluyla bir dizi modelleme sonrası analiz yoluyla incelenmektedir (Wanga F. et al, 2021). Varyans analizi karar vermek ya da amaca uygunluğunu saptamak için aynı anda birkaç tür etkiye bağlı olan parametreleri analizini sağlayan istatistiksel yöntemlerden biridir (Kuwada M., 1993). Faktöriyel yapı, deneysel tasarımlarda genellikle tahmin parametreleri açısından değerlendirilir (Mays D.P. and Myers R.H., 1997). Birden fazla faktörlerin olması istatistiksel analizleri daha karmaşık bir hale gelmesine sebep olabilir. Böyle durumlarda, analizdeki her bir faktörün deneylerdeki bir faktörü temsil ettiği çok faktörlü bir varyans analiziyle (ANOVA) analizleri yapılabilmektedir. Bu analizler sayesinde iki veya daha fazla parametrenin ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı ya da anlamlı bir fark olup olmadığına karar vermemize olanak sağlayan bir F hesap değeri oluşturmaktadır (Morrison D.A., 2002). Dört karma ve iki grup modelden analizlerden P -değerleri sayesinde parametreler hakkında istatistiksel bilgiler vermektedir. Bu bilgiler ışığında yorumlanması mümkün olmuştur (Stanimirova L., 2013).

Kevlar 49 aramid elyafının 350°–550°C sıcaklık aralığında kadar termal bozunma korunmakta olup vakumda 470°C'nin üzerinde ve havada ise 370°C'nin üzerinde bozunma gerçekleşmektedir (James R. et al, 1982). Çok güçlü polimer matrisli malzemeler üretimi için aramid elyaf takviyesi en çok tercih edilenlerden olmaktadır (Balaji R. et al, 2019). Kevlar 49 takviye malzemesi olarak en çok kullanılan polimer matrisli kompozit malzemelerdendir. Bu özelliğinin en belirgin birkaç özelliği yüksek mukavemet ve korozyon oldukça dirençli olmasıdır. Böylece savunma teknolojilerinde havacılık ve uzay endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Madara S.R., 2021). Yaklaşan endüstriyel ihtiyaçlar doğrultusunda polimer matrisli malzemeler yüksek performans sergilemesi daha çok tercih edilmesine ve yapay sinir ağlarıyla öğrenme ve modellemeler sayesinde zaman kazandırması ve gelecekteki mekanik etkilerini belirmeye yardımcı olmaktadır (Kumar S. et al, 2021). Polimer matrisli malzemelerin sertliğini, sıkıştırmayı ve ısı iletkenliği artıran dolgu maddeleri de büyük avantaj sağlamaktadır. Üretim aşamasında kazanılan pratikler, örneğin; kütleme sıcaklıkları ile üretim hızındaki değişimleri belirlemesiyle polimer matrisli kompozitlerin kalitesini belirlemektedir. Farklılıkları yorumlamak ve göstermek için analiz yaparak optimal durumları belirlemektedir (Zhang Z. and Friedrich K. 2003). Yapay sinir ağlarının kullanımını her geçen artmakta ve polimer kompozitlerin özelliklerini analiz edip optimize etmektedir (Nguyen H.T. vd. 2021). Elde edilen veriler sayesinde yapay sinir ağları tahminleriyle doğruluğunu gösterilmektedir (Ramaiah G.B. et al, 2021). Yapay sinir ağları uluslararası araştırmalarda en çok yaygınlaşan bir araştırma yöntemi haline gelmesi öngörü ve araştırmaların daha nitelikli hale gelmesiyle herkes tarafından benimsenmektedir. Tüm bunların yanında karmaşıklık, hız, sıcaklık, mekanik özelliklerin davranışı ve akma dayanımı gibi davranışlar polimer matris kompozitlerin parametreleri hakkında bilgi vermektedir. Bu parametreler de daha doğru şekilde gelecekteki tepkileri tahmin edebilme ve modellemeyi mümkün kılmaktadır (Fazilat H. et al, 2012). Çok değişkenli doğrusal olmayan modeller olup analitik olarak test verilerinden yararlanarak tanıma ve tahmin etmeye yönelik doğrudan bir yapay sinir ağ oluşturmakla birlikte tahmin verilerini oluşturmaktadır (Balaji N.S. et al, 2016). Tahminlerde bulunmak için regresyon modelindeki kayıp ortalamayı (ortalama hataların karesi) MSE olarak hesaplanmakla olup gerçek verilerden uzak olmaktadır. Bu uzaklık oranlarının doğruluğunu gerçek verilerin yüzdesi olarak gören yani ortalama hataları MAPE olarak hesaplanmaktadır (Chen CT et al, 2019; Saraç M.F. vd., 2018). İncelenen birçok uygulama ve çalışmalarda da ileri beslemeli, geriye yayımlı olan algoritmaların kullanıldığı görülmektedir (Kadi H.E., 2006; Okkan U. et al, 2018). Yapay sinir ağlarıyla tahminleri yapılırken Mean Squared Error (MSE) olarak ortalama hataların karesini ve Mean Absolute Error (MAPE) olarak ortalama mutlak hataları gösterilmesinde kullanılan yöntemlerdendir (Chen CT et al, 2019; Saraç M.F. vd., 2018). MSE (a) ve MAPE (b) formülleriyle hesaplanmaktadır (Chen CT et al, 2019).

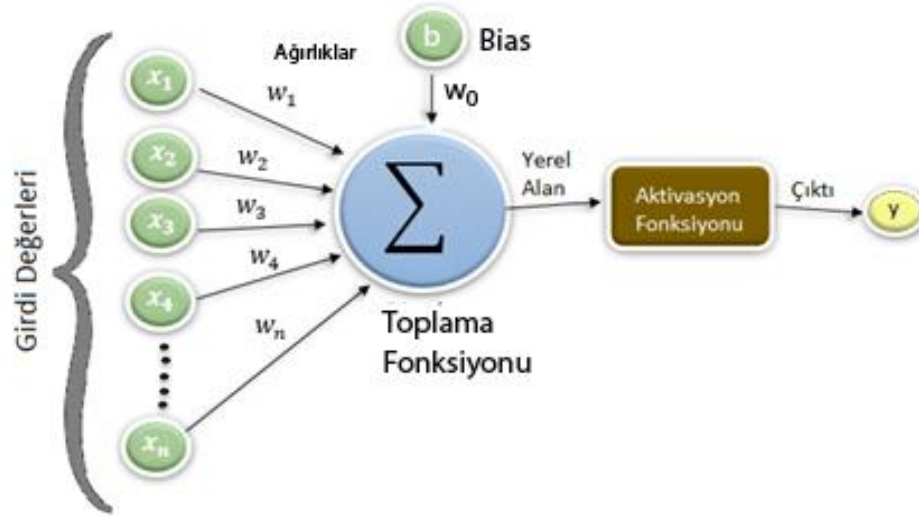
$$(a) \text{MSE} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{tahmini hatalar})^2}{n} \quad (b) \text{MAPE} = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|\text{gerçek}_i - \text{tahmini}_i|}{\text{gerçek}_i}}{n}$$

Bu çalışmada, mekanik test sonuçlarından elde edilen verilerden yararlanarak matlab programında bulunan Lavenberg-Marquardt sonra Bayesian Regularization ve daha sonra da Scaled Conjugate Gradient algoritmaları kullanılarak yapay sinir ağlarıyla tahminleri yapılmıştır. Betimsel istatistiklerle sunulmasının yanında faktöriyel varyans analizi ile iç içe tasarımlı varyans analizleri yapılmıştır. Bu analizlerle polimer kompozit malzemesinin üretim parametreleri hakkında bilgi edinme, yorum yapabilme ve parametrelerin tek başına ya da diğerleriyle birlikte etkisinin anlamlı olup olmadığını yorumlayabilmek için istatistiksel analizler yapılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Yapay Sinir Ağları Çalışmaları

Matlab programında nftool (Neural Fitting Tool) yöntemiyle yapay sinir ağlarında standart olarak ikili problemler kullanılmaktadır. Yapay sinir ağlarında eğri uydurmada çok iyi olduğu bilinmektedir. Elde edilmiş ya alınmış verilerin tanımlanarak girdi ve çıktı verilerini matlab programına aktararak analizleri yapılabilmektedir. İçerisinde bulundurduğu algoritmalarından ilki Lavenberg-Marquardt sonra Bayesian Regularization ve diğeri ise Scaled Conjugate Gradient algoritmalarıdır. Bu algoritmaları denedikten sonra optimal olanı tercih edilerek kullanılmaktadır. Bu algoritmaların her biri geriye doğru yayılım göstermektedir. Bu modellerin bir ortak yanı da değişkenlerin gizli katman sayısı, çok katmanlılık ve tek yönlü bir algoritmalar halinde olmasıdır. Denemelerle tekrar edilerek deneme-yanılma yöntemiyle analizler yapılmakta olup en iyi sonucu elde edilene kadar eğitimler devamlı olarak yapılabilmektedir (Kubat C. vd., 2017).



Şekil 1. Yapay Sinir Ağlarının Nöron Yapısı (Kubat C. vd., 2017).

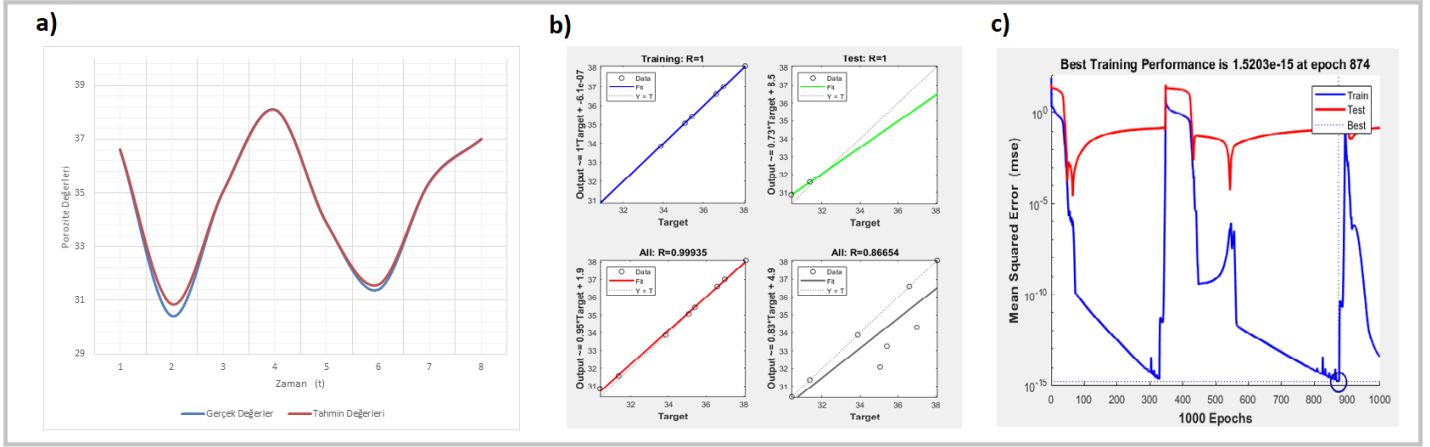
2.2. İstatistiksel Çalışmalar

Betimsel İstatistik, deneysel olarak oluşturulan verilerin ya da verilerin genel özelliklerini tanımlayan bilgi veya veri ölçümlerinin sayısal olarak gösterilmesine ya da sunulmasına olanak sağlamaktadır. İç İççe Tasarım Varyans Analizi, Her bir seviyenin kendi alt alta birimlerden oluşan kısımlarına etken ve faktörlerin incelenmesine imkân sağlamaktadır. Faktöriyel Varyans Analizi, İki ya da daha fazla faktörün sonuçların ana etkisini aynı anda incelemekle birlikte birden fazla etkenin aynı anda etkisini ölçmeye ya da yorumlamaya olanak sağlamaktadır (Eyecioğlu Ö., 2021; Gedik İ., 2010). Kompozit malzemelerin mekanik testlerinin yanında mutlaka istatistiksel analizlerinin de yapılması gerekmektedir. Bunun en bilindik nedenlerinden bazıları malzemenin homojenliği ve anizotropik davranışlarına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Varyans analizleri sayesinde deneysel sonuçların her bir parametre için parametreler arasında önemli farklılıklar ayırt edebilme ve en anlamlı parametreyi belirlemek daha doğru bir sonuca gidebilmeyi sağlamaktadır (Suresh N. 2021).

3. Bulgular ve Tartışma

Yapay sinir ağları ile tahminleri yapılmıştır. Birçok parametrenin plakalara ayrı ayrı ya da birlikte etkisini değerlendirmek ve parametrelerin anlamlılığını yorumlayabilmek için ise istatistiksel analizler yapılmıştır.

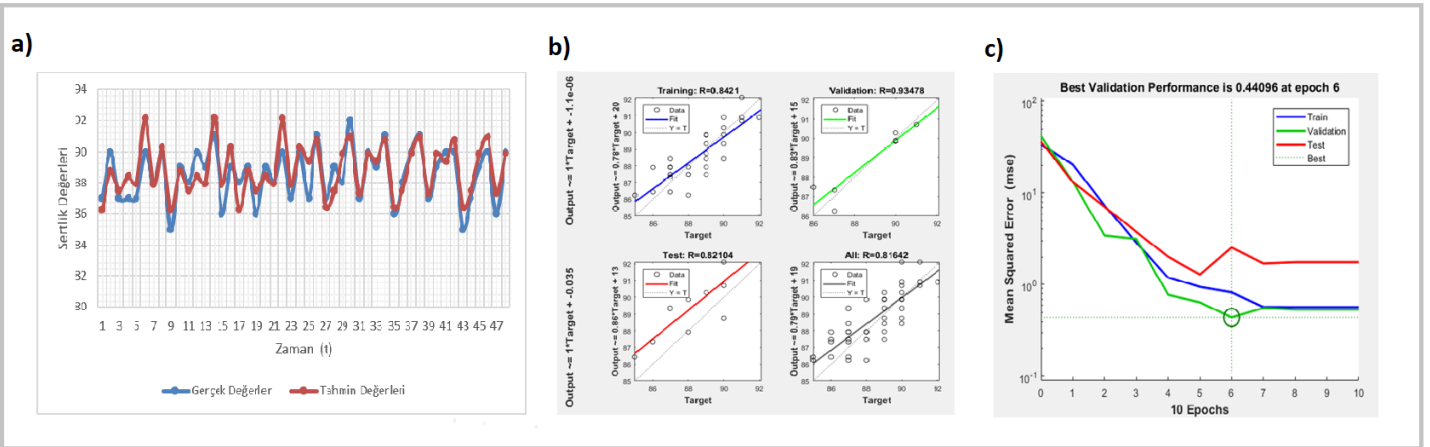
3.1. Yapay Sinir Ağ Sonuçları



Şekil 2. (a) Porozite Tahmin ve Gerçek Veriler; (b) Regresyon Grafiği; (c) Performans Grafiği.

Şekil 2'in a)'da Porozite tahmin ve gerçek verilerin çok yakın değerler aldığı görülmektedir. (b)'de Regresyon grafiğinde 1'e yaklaştıkça tahmin ve gerçek verilerin benzerliği artmaktadır. (c)'de performans grafiğini göstermektedir.

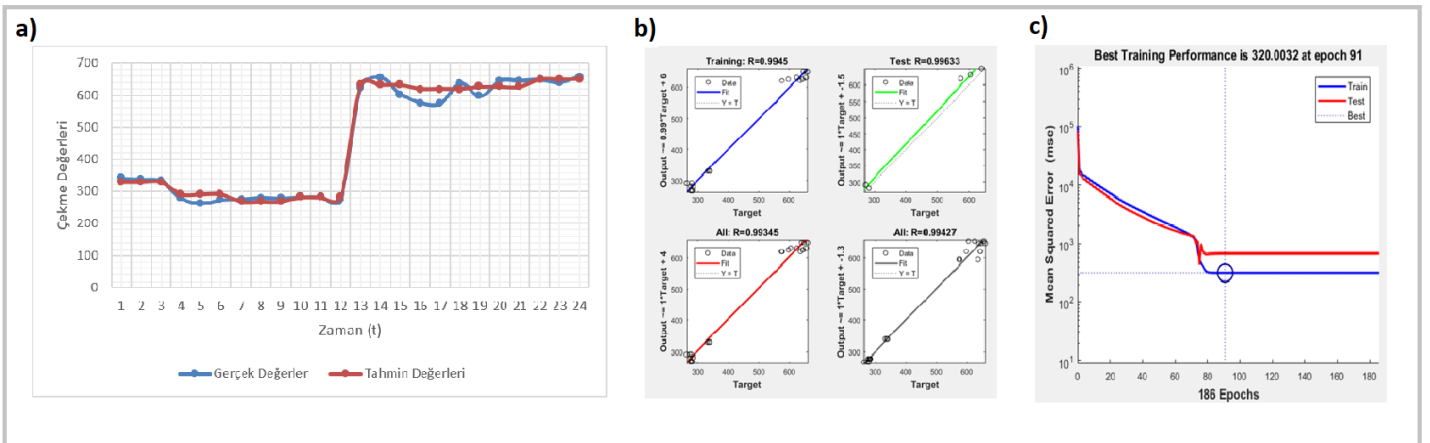
Hata yüzdelерinin düşük değerleri yapay sinir ağı modellerinin çok yakın tahminlerde bulunduğunu göstermektedir (Balaji N.S. et al, 2016).



Şekil 3. (a) Shore D Sertlik Testlerinin Tahmin ve Gerçek Veriler; (b) Regresyon Grafiği.; (c) Performans Grafiği.

Şekil 3; (a)'da Shore D Sertlik testi tahmin ve gerçek verilerin çok yakın değerler aldığı görülmektedir. (b)'de Regresyon grafiğinde 1'e yakın değerin burada da tahmin ve gerçek verilerin benzerliğini göstermektedir. (c)'de performans grafiğini göstermektedir.

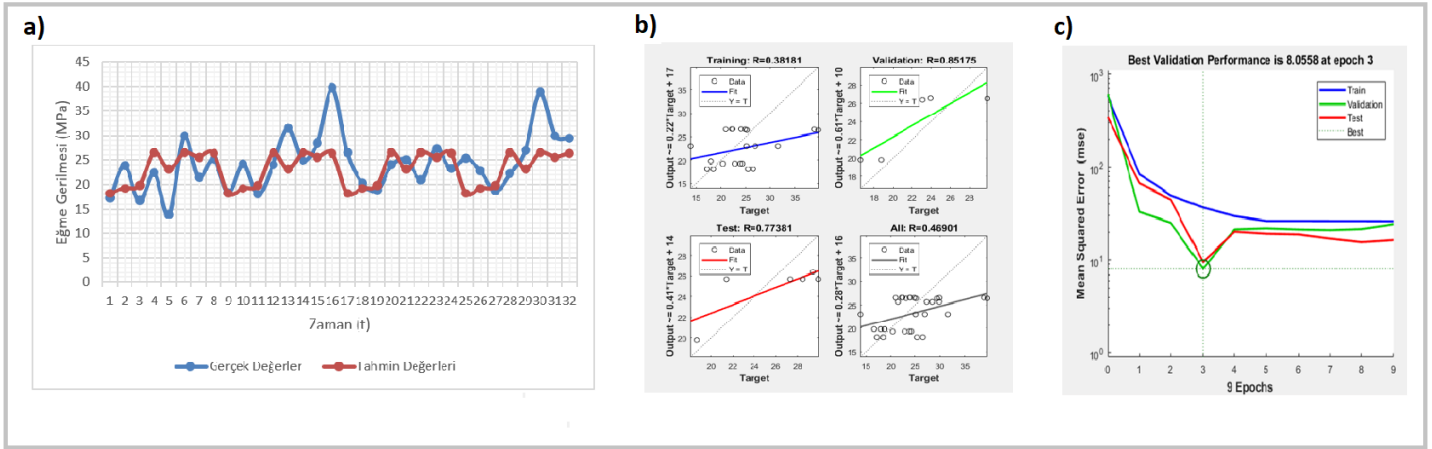
Yapay sinir ağları en çok kullanılan modellerden biri olması, kapalı bir kutu gibi kullanılıyor olmasıdır (Okkan U. et al, 2018).



Şekil 4. (a) Çekme Testi Tahmin ve Gerçek Veriler; (b) Regresyon Grafiği.; (c) Performans Grafiği.

Şekil 4, a)'da Çekme testinde tahmin ve gerçek değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmekte olup yüksek derecede benzerlik görülmektedir. (b)'de Regresyon grafiğinde 1'e yaklaştıkça tahmin ve gerçek verilerin benzerliği artmaktadır. Çekme testinde $R=0,993$ olup çekme testinde sistemin başarısı (MAPE) %0,14 hata ile çalıştığı görülmektedir. c)'de performans grafiğini göstermektedir.

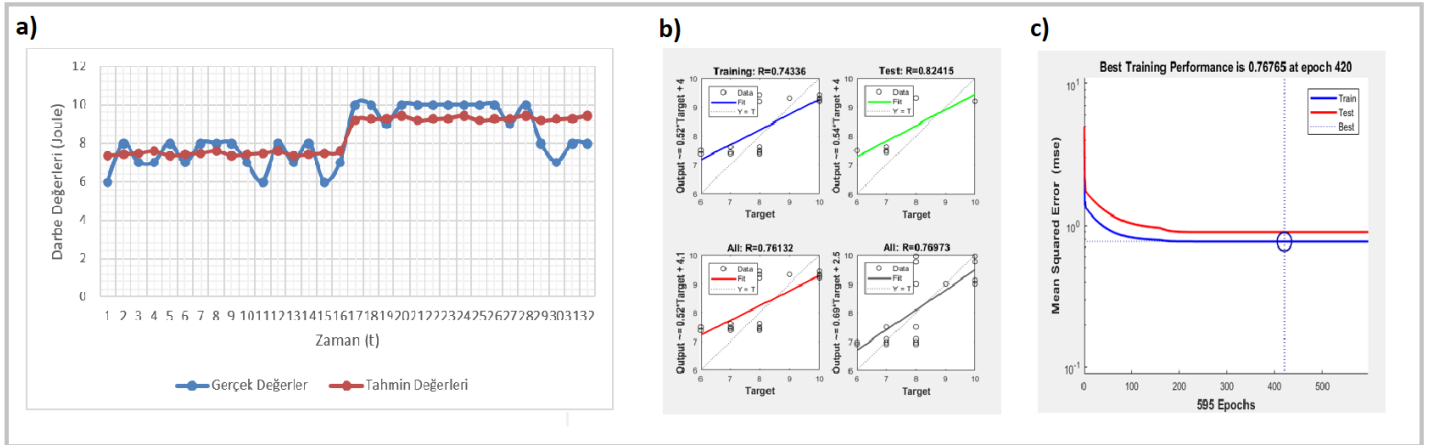
Modelin minimuma hızla gelmesi sağlanmakla birlikte çok daha güvenilir sonuçlara ulaşmak mümkün olmaktadır (Okkan U. et al, 2018).



Şekil 5. (a) Eğme Testi Tahmin ve Gerçek Veriler; (b) Regresyon Grafiği.; (c) Performans Grafiği.

Şekil 5; (a)'da Eğme testinde ise %80 tahmin ve gerçek veriler birbirine yakın değerler aldığı görülmektedir (b)'de Regresyon grafiğinde 1'e yaklaştıkça tahmin ve gerçek verilerin benzerliği artmakta olup eğme testinde $R=0,773$ olduğu görülmektedir. (c)'de performans grafiğini göstermektedir.

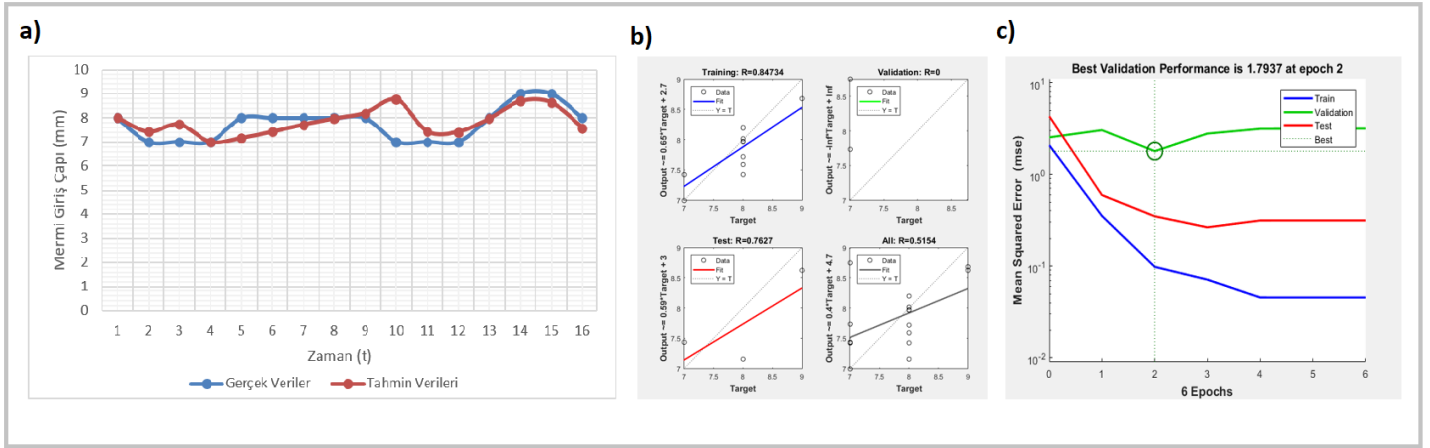
Yapay sinir ağları matlab nftool yöntemiyle eğri uydurmakta oldukça başarılı olmakla birlikte kaç iterasyonda tamamladığını epoch kısmında görülmektedir (Kubat C. vd. 2017).



Şekil 6.(a) Darbe Testi Tahmin ve Gerçek Veriler; (b) Regresyon Grafiği.; (c) Performans Grafiği.

Şekil 6; (a)'da Darbe Testi tahmin ve gerçek verilerin yakın değerler aldığı görülmektedir. (b)'de Regresyon grafiğinde Darbe Testi için regresyon değeri $R=0,761$, (MAPE) %0,29 hata ile çalıştığı görülmektedir. (c)'de Sistem performansı grafiğini göstermektedir.

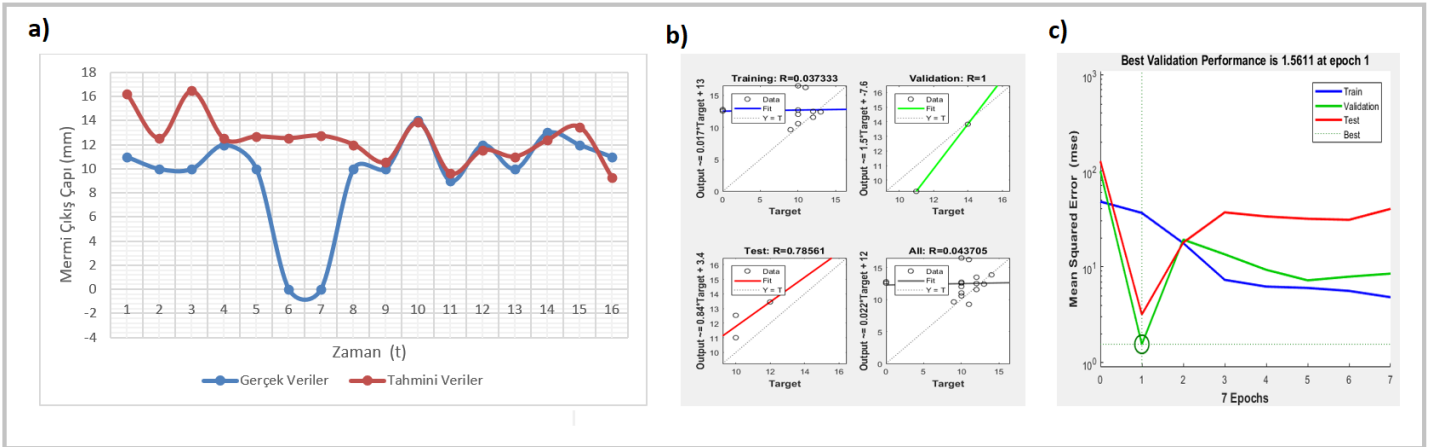
DeneySEL ve tahmin edilen verilerin %3, %4 veya daha az hataya sahip oldukları görülmektedir (Kumar S. et al, 2021).



Şekil 7. (a) Balistik Mermi Giriş Çapı Tahmin ve Gerçek Veriler; (b) Regresyon Grafiği.; (c) Performans Grafiği.

Şekil 7; (a)'da Balistik Testi Merminin Giriş Çapının tahmin ve gerçek verilerin yakın değerler aldığı görülmektedir. (b)'de Regresyon grafiğinde Mermi Giriş Çapı ise $R=0,762$ olduğu (MAPE) %0,34 hata ile çalıştığı görülmektedir. (c)'de Sistem performansı grafiğini göstermektedir.

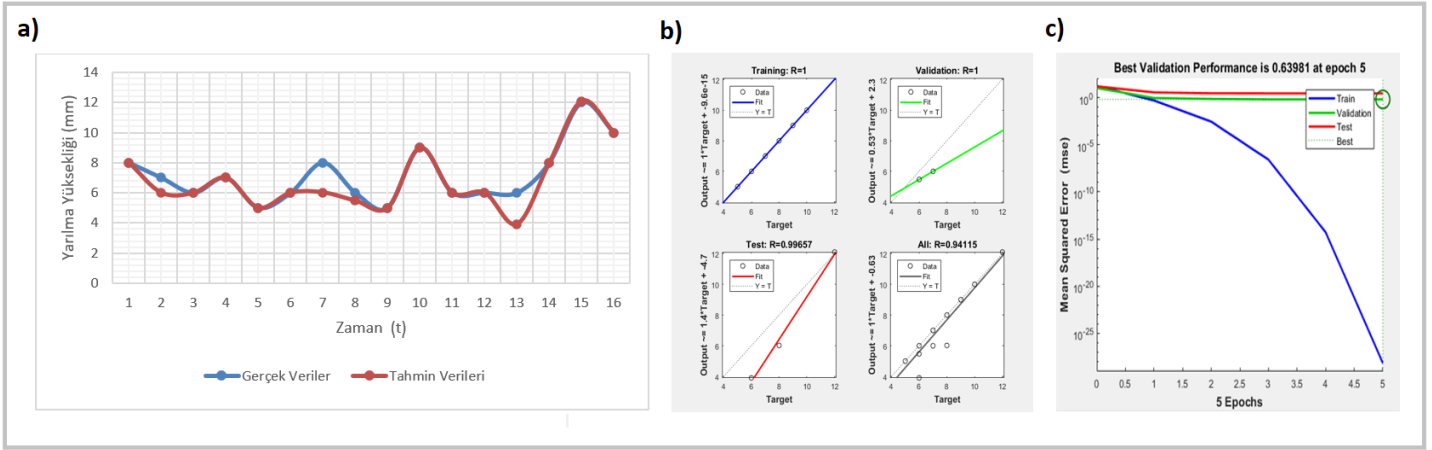
Yapay sinir ağları güçlü bir araç haline gelmesi fonksiyon yaklaşımlarının karmaşık uygulamalara optimizasyon ve doğrusal olmayan sistem tanımlama gibi birçok durumda kolaylık sağlamaktadır (Ramaiah G.B. et al, 2021).



Şekil 8. (a) Balistik Mermi Çıkış Çapı Tahmin ve Gerçek Veriler; (b) Regresyon Grafiği.; (c) Performans Grafiği

Şekil 8; (a)'da Merminin Çıkış Çapının tahmin ve gerçek verilerin yakın değerler aldığı, ancak mermi çıkış çapında bazılarında çapın sıfır olduğu delinme olmadığı tahmin verilerin de ise bu durumun gerçekleşmemesi veri sayısının artırılması gerektiği anlaşılmaktadır. (b)'de Regresyon grafiğinde Mermi Çıkış Çapı için regresyon değeri $R=0,785$ olduğu görülmektedir. Sistem başarısı Mermi Çıkış Çapı için (MAPE) %33,32 hata ile çalışmaktadır. (c)'de performans grafiğini göstermektedir.

Simülasyon teknikleri ve yöntemleriyle balistik test anında yapı davranışlarının genel olarak sonuçların yapay sinir ağlarıyla başarılı olabileceği görülmektedir. Balistik kumaşların malzeme özelliklerinin modellenmesinde kullanılan geleneksel fiber bilimine benzerlik görülmektedir (Ramaiah G.B. et al, 2021).

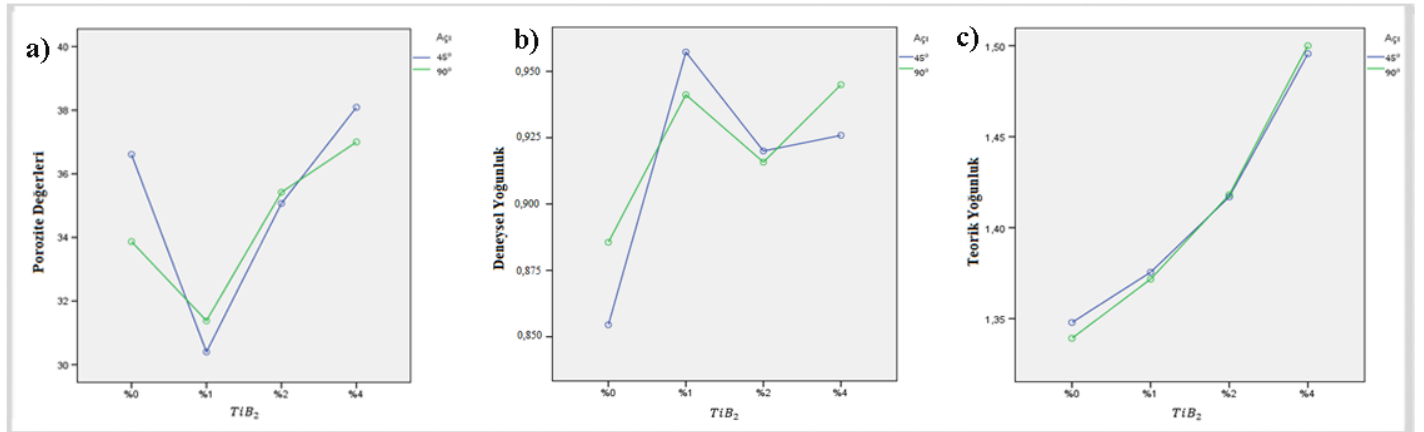


Şekil 9. (a) Balistik Yarılma Yüksekliği Tahmin ve Gerçek Veriler; (b) Regresyon Grafiği.; (c) Performans Grafiği.

Şekil 9; (a)'da Numunenin yarılma yüksekliğinin tahmin ve gerçek verilerin yakın değerler aldığı görülmektedir. (b)'de Regresyon grafiğinde Numune Yarılma Yüksekliğinde ise $R=0,996$ olduğu görülmektedir. Sistem başarısı Numune Yarılma Yüksekliği için %0,30 Hata ile çalışmaktadır. (c)'de performans grafiğini göstermektedir.

Yapay sinir ağı modeli, kullanılan farklı mimariye göre değişmektedir (Kumar S. et al, 2021).

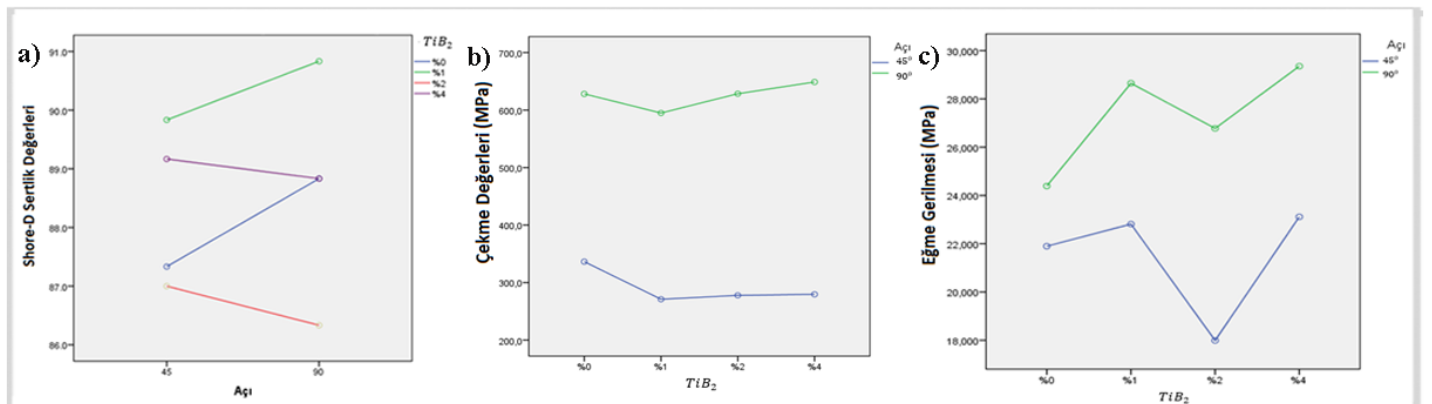
3.1. İstatistiksel Bulgular



Şekil 10. (a) Porozite (b) Deneysel Yoğunluk Testi (c) Teorik Yoğunluk Testi.

Şekil 10; (1)'in (a)'da hem 45 hem de 90 derecelik oryantasyonda porozitenin en düşük olduğu parametre TiB₂ %1'lik olduğu görülmektedir (b)'de Deneysel yoğunluk grafiği incelendiğinde de homojenliğin en iyi sağlandığı parametrenin %1 TiB₂ olduğu görülmektedir. (c) Teorik yoğunlukta TiB₂ oranında değişim oran arttıkça teorik yoğunlukta artmaktadır.

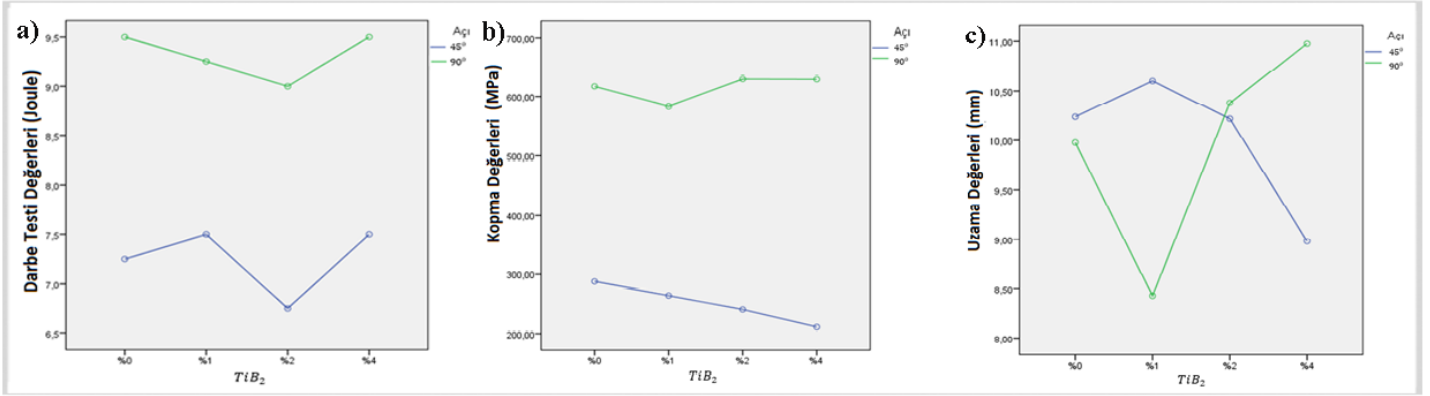
Mekanik özelliklerin sonraki işlemlerde önemli değişken ya da parametreyi belirlemek için test edilmektedir (Suresh N. 2021).



Şekil 11. (a) Shore D Sertlik Testi (b) Çekme Testi (c) Eğme Gerilmeleri.

Şekil 11; (2)'in 90 derecelik oryantasyonda her birinde değer olarak en üstte olduğundan oryantasyonun anlamlı bir parametre olduğu anlaşılmaktadır. (a) Sertlik testinde en yüksek uç değerlerin %1'lik TiB_2 olduğu görülmekte. (b) Çekme testinde oryantasyonların kendi aralarında durumuna bakıldığında birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. (c) Ağırlıkça TiB_2 oranlarına göre eğme gerilmeleri genelde artarken %2 olan numunelerin daha aşağıda bir değer aldıkları görülmektedir.

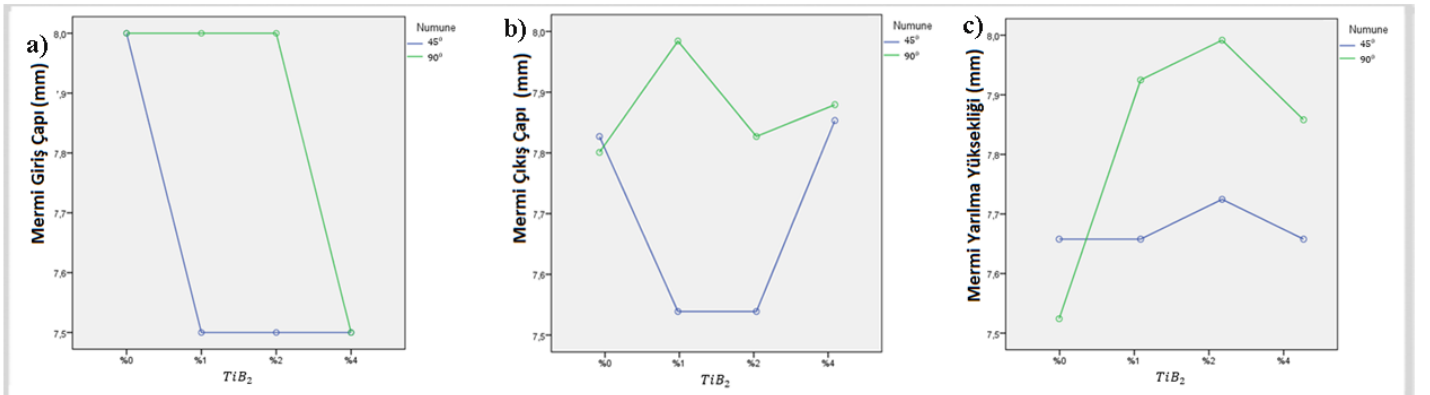
Kompozit malzemenin bileşenleri için gerilim gerinim eğrisi analizler için çizilmektedir (Suresh N. 2021; Saraç M.F. vd. 2018).



Şekil 12. (a) Darbe Testi (b) Kopma Değerleri (c) Uzama Değerleri

Şekil 12; (3)'ün (a) ve (b)'de 90^0 oryantasyonun anlamlı bir parametre olduğu görülmektedir. Ağırlıkça TiB_2 oranları arttıkça kopma mukavemetleri azalma olduğu görülmektedir. (c) Ağırlıkça TiB_2 oranlarının arttıkça 45^0 oryantasyonun uzama miktarlarının azaldığı görülmektedir.

İç içe varyans analizi ile üretimin kalitesini her bir parametreyi tüm kombinasyonlarıyla birlikte yorumlayabilme imkânı vermektedir (Stanimirova L. 2013).



Şekil 13. (a) Merminin Giriş Çapı. (b) Merminin Çıkış Çapı. (c) Numunenin Tahribat Yüksekliği.

Şekil 13; (4)'ün (a)'da 45^0 oryantasyonda ağırlıkça TiB_2 oranı arttıkça mermi giriş çapı küçülürken, 90^0 oryantasyonda ise artışlarda sabit kalırken %4 olanlarda bir azalma olduğu görülmektedir. (b)'de Mermi çıkış çaplarında 45^0 oryantasyon 90^0 oryantasyonlara göre daha küçük olduğu görülmektedir. (c) Mermi Yarılma Yüksekliğinin 90^0 oryantasyonlarda daha yüksek olması mermi geçirmezliğinin daha iyi olması ya da şarapnel parçacıklarının geçmesini daha iyi tuttuğu anlamına gelebilmektedir.

İstatistiksel analiz, herhangi bir araştırma ve analiz için oldukça değerli ve bilgilendirici bir araçtır. Bu analizde, aşağıdaki sonuçlara yol açan istatistiksel analizler yapılmıştır. Polimer matrisli kompozitlerin üretim süreci, mekanik özelliklere önemli derecede etkin rol almaktadır. Üretim sürecini kontrol etmek ve optimal yöntemi belirlemek için istatistiksel analizlerden yararlanabilmektedir. İstatistiksel analizler, bir araştırmada oldukça önemli, değerli ve bilgilendirici bir araç olduğu görülmektedir (Suresh N. 2021).

4. Elde Edilen Simülasyon Sonuçları

Polimer matrisli kompozit olup aramid elyaf takviyeli birçok zırh malzemesi çalışılmış olup mekanik test olarak balistik testler üzerine yapılmaktadır. Bu çalışmada üretilmiş olan zırh plakalarının 8 katlı olup farklı parametrelere sahip olup ve çekme, eğme, darbe, balistik ve sertlik testi gibi birçok mekanik testleri yapılmıştır. Bu mekanik test sonuçlarıyla birlikte elde edilen sonuçların yapay sinir ağlarıyla modellenmesi ve istatistiksel analizlerle analizlerinin yapılmasıyla birlikte özgünlük kazandırmaktadır. Personel koruma amacıyla

üretmiş olan aramid elyaf takviyeli TiB_2 ilaveli polimer matris kompozit zırh plakalarının mekanik test sonuçlarından yararlanarak yapay sinir ağlarıyla tahminleri yapılmıştır. İstatistiksel analizlerle ise parametrelerinin tek başına ya da birlikte plakalara etkisinin amaca uygun, anlamlı ya da anlamsız olduğu durumlar incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre en anlamlı ve amaca en uygun 90° oryantasyona sahip ağırlıkça %1 TiB_2 olan plaka numunelerinde elde edilmiştir. Analiz sonuçları özet olarak aşağıda verilmiştir.

Yapay Sinir Ağlarında; Regresyon grafiği 1'e yaklaştıkça tahmin ve gerçek verilerin benzerliği artmaktadır. Mekanik testlerle elde edilen her bir verinin yapay sinir ağlarıyla modellenmesi gerçek değerlerle yakın değer çıktığı görülmektedir. Veri sayısı artırılmasıyla sistemin hata oranını daha da düşürmektedir. Çekme testinde tahmin ve gerçek değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmekte olup Eğme testinde ise %80 tahmin ve gerçek veriler birbirine yakın değerler aldığı görülmektedir. (3) ve (4)'ün (b)'de Regresyon grafiğinde 1'e yaklaştıkça tahmin ve gerçek verilerin benzerliği artmaktadır. Çekme testinde $R=0,993$ iken Eğme testinde $R=0,773$ olduğu ve olup çekme testinde sistemin başarısı (MAPE) %0,14 hata, eğme testinde ise %0,53 hata ile çalıştığı görülmektedir. Regresyon grafiğinde Darbe Testi için regresyon değeri $R=0,761$, Mermi Giriş Çapı ise $R=0,762$ olduğu ve Darbe Testinde (MAPE) %0,29, Mermi Giriş Çapı ise (MAPE) %0,34 hata ile çalıştığı görülmektedir. Merminin Çıkış Çapı ile Numunenin Yarılma yüksekliğinin tahmin ve gerçek verilerin yakın değerler aldığı, ancak mermi çıkış çapında bazılarında çapın sıfır olduğu delinme olmadığı tahmin verilerin de ise bu durumun gerçekleşmemesi veri sayısının artırılması gerektiği anlaşılmaktadır. Regresyon grafiğinde Mermi Çıkış Çapı regresyon değeri $R=0,785$, Numune Yarılma Yüksekliğinde ise $R=0,996$ olduğu görülmektedir. Sistem başarısı Mermi Çıkış Çapı için (MAPE) %33,32 hata ile çalışırken Numune Yarılma (Tahribat) Yüksekliği için %0,30 Hata ile çalışmaktadır.

İstatistiksel analizlerde; TiB_2 ilavesinde ağırlıkça oran arttıkça yoğunlukları artmakta olup porozite miktarlarında ise azalmalar olduğu görülmüştür. TiB_2 oranı ağırlıkça %1 olanlarda gözenek miktarı diğerlerine göre daha az olduğu gözlemlenmiştir. Shore Sertlik testlerinde oryantasyon etkisinin önemsiz olduğu saptanmıştır. Ağırlıkça TiB_2 oranlarının sertlik testlerinin anlamlı olduğu gözlenmiştir. Ağırlıkça TiB_2 oranı ve oryantasyonların birlikte etkileri çekme testi için oldukça olumlu ve anlamlı olduğu görülmüştür. TiB_2 tek başına etkisini incelediğimizde çekme testleri için etkisi anlamlı çıkmıştır. Oryantasyona göre incelendiğinde tek başına çekme testleri için olumlu yönde etkisi olmakla birlikte 90° oryantasyona sahip numuneler 45° oryantasyona göre çok daha anlamlı olduğu saptanmıştır. Oryantasyonun eğme gerilmelerinde olumlu ve anlamlı bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Ağırlıkça TiB_2 oranlarının eğme gerilmelerine istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı anlaşılmaktadır. Eğme gerilmeleri oryantasyonla birlikte ağırlıkça TiB_2 ilavesi eğme değerlerine istatistiksel olarak etkisinin anlamsız ve istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı görülmüştür. Oryantasyonun darbe testine olumlu ve anlamlı bir etkisinin olduğu görülmüştür. TiB_2 oranlarının darbe testine göre istatistiksel anlamda bir etkisi olmadığı görülmüştür. Açık ve TiB_2 darbe testi değerlerine istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur. Oryantasyonla birlikte ağırlıkça TiB_2 ilavesi darbe testine etkisinin anlamlı bir fark olmadığı görülmüştür.

5. Sonuç ve Öneriler

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında bu çalışmada da olduğu gibi en çok kullanılan yöntemlerden biri olan yapay sinir ağları kullanılmıştır. Birçok çalışmanın karmaşık yapısını yorumlayabilmek için istatistiksel analizlerden iç içe veya faktöriyel varyans analizlerinden faydalanılmıştır. Bu çalışmada da her bir mekanik test için 45° - 90° oryantasyona ve ağırlıkça TiB_2 oranlarının %0,1,2 ve 4 değerlerinin etkisi ölçülmüş ve yorumlanmıştır. Sonuç olarak yapay sinir ağları analizi ile istatistiksel analizler parametreleri ağırlıkça TiB_2 oranı %1 ve 90° oryantasyona sahip olan numuneler diğerlerine göre daha baskın oldukları görülmektedir. Öneriler; Yapılan çalışmaya baktığımızda yapay sinir ağlarına yönelik her bir mekanik test için veri sayısı için daha fazla test sonuçlarından faydalanabilir. İstatistiksel analizlerle belirlenmiş olan optimal üretimi ele alınarak yeni parametreler dahil edilmesi daha da geliştirilebilir. Hem geliştirmek hem de maliyet yönü baz alındığında takviye malzemesi olan elyafları birleştirerek hibrit kompozit malzemeler üzerine bir çalışmanın farklı kat ve türlerinin analizleriyle birlikte kıyaslamalar yapılabilir.

Referanslar

Akşehirli Ö., Cangür Ş, Ankaralı H., Sungur M.A. (2012). 2⁴ Faktöriyel Tasarımların Sağlık Alanında Kullanımı. Düzce Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2(3): 1-6.

Balaji R., Nadarajan M., Selokar A., Kumar S.S., Sivakumar S. (2019). Modelling And Analysis of Disk Brake Under Tribological Behaviour of Al-Al₂O₃ Ceramic Matrix Composites/Kevlar® 119 Composite/C/Sic-Carbon Matrix Composite/Cr-Ni-Mo-V Steel. Proceedings 18, 3415–3427.

Balaji N. S., Jayabal S., Kalyana S. (2016). A. Neural Network Based Prediction Modeling for Machinability Characteristics of Zea Fiber-Polyester Composites. Trans Indian Inst Met (2016) 69(4):881–889.

Chen CT ve Gu GX (2019). Machine Learning For Composite Materials. MRS Communications Volume 9, Issue 2, 556–566.

Eyecioglu Ö. (2021). Bazalt/PANI Kompozitlerinin Dielektrik Özelliklerinin Tahmini İçin Makine Öğrenmesi Modellerinin Karşılaştırılması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Sayı 23, S. 817-826.

- Fazilat H., Ghatarband M., Mazinani S., Asadi Z.A, Shiri M.E., Kalae M.R. (2012). Predicting The Mechanical Properties Of Glass Fiber Reinforced Polymers Via Artificial Neural Network And Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Computational Materials Science* 58 (2012) 31–37.
- Gedik İ. (2010). İç-içe Tasarımlarda Dayanıklı Analiz ve Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İstatistik Anabilim Dalı, Ankara, 93 Sayfa.
- James R. Brown, Daryl K.C. Hodgeman (1982). An E.s.r. Study of the Thermal Degradation of Kevlar 49 Aramid., Volume 23, Issue 3, March 1982, Pages 365-368.
- Kubat C., Kiraz A., Atakan Ü. (2017). Matlab Yapay Zekâ ve Mühendislik Uygulamaları Kitabı, İstanbul, Abaküs Yayınları.
- Kumar S.S., Priyadarshan , Kumar G. S. (2021). Statistical and Artificial Neural Network Technique for Prediction of Performance İn AlSi10Mg-MWCNT Based Composite Materials. Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology (ISM) Dhanbad, 826004, Volume 273, 125136.
- Kadi H.E. (2006). Modeling the mechanical behavior of fiber-reinforced polymeric composite materials using artificial neural networks—A review. *Composite Structures* Volume 73, Issue 1, May 2006, Pages 1-23.
- Kuwada M. (1993). Analysis of Variance of Balanced Fractional Factorial Designs. *Discrete Mathematics* Volume 116, Issues 1–3, 1 June 1993, Pages 335-366.
- Madara S.R., Pillai S.R., Selvan M. C.P., Heirle J.V. (2021). Modelling of Surface Roughness in Abrasive Waterjet Cutting of Kevlar 49 Composite Using Artificial Neural Network. 2214-7853/ Elsevier, Volume 46, Part 1, 2021, Pages 1-8.
- Mays D.P. and Myers R.H. (1997). Design and Analysis for a Two-Level Factorial Experiment in The Presence of Variance Heterogeneity. *Computational Statistics & Data Analysis* Volume 26, Issue 2, 4 December 1997, Pages 219-233.
- Morrison D.A. (2002). Further Difficulties With Multifactorial Analysis of Variance: Random and Nested Factors and Independence of Data. *Infection, Genetics and Evolution* Volume 2, Issue 2, December 2002, Pages 149-152.
- Nguyen H.T., Nguyen K.T.Q, Tu C. Le, Soufeiani L., Mouritz A.P (2021). Predicting Heat Release Properties of Flammable Fiber-Polymer Laminates Using Artificial Neural Networks. *Composites Science and Technology* 215, 109007.
- Okkan U., Serbeş Z.A., Gedik N. (2018). MATLAB ile Levenberg-Marquardt Algoritması Tabanlı YSA Uygulaması. *DÜMF Mühendislik Dergisi* 9:1 (2018): 351-362.
- Ramaiah G.B., Chennaiah R.Y., Satyanarayanarao G.K. (2021). Investigation And Modeling On Protective Textiles Using Artificial Neural Networks For Defense Applications. *Materials Science And Engineering B* 168 (2010) 100–105.
- Saraç M.F, Buran D., Koru M. (2018). Investigation of Thermal and Mechanical Properties of Aramid Fiber Reinforced Thermoplastic Polyurethane Elastomer Composites. *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences* V.22, Issue 2, 477-481.
- Stanimirova L., Kazura M., Beer D.D., Joubert E., Schulzec A.E., Beeldersc T., Villiers A.D., Walczak B. (2013). High-Dimensional Nested Analysis of Variance to Assess the Effect of Production Season, Quality Grade and Steam Pasteurization on The Phenolic Composition of Fermented Rooibos Herbal Tea. *Talanta*, Volume 115, 15 October 2013, Pages 590-599.
- Suresh N., Balamurugan L., Geethan K.A.V., Kumar M.S. (2021). Statistical Analysis of Mechanical Properties of Al-SiC-WC and Al-SiC-Al₂O₃ Hybrid Composites. *Materials Today: Proceedings*, Volume 42, Part 2, 2021, Pages 312-318.
- Wanga F., Huang G., Cheng G., Li Y. (2021). Multi-Level Factorial Analysis for Ensemble Data-Driven Hydrological Prediction. *Advances in Water Resources* Volume 153, July 2021, 103948.
- Zhang Z., Friedrich K. (2003). Artificial Neural Networks Applied to Polymer Composites. *Composites Science and Technology* 63, 2029–2044.



Lazer Ablasyonu ile Sentezlenmiş Levan Kaplı Altın Nanoparçacıkların siRNA Transfeksiyon Ajantı Olma Potansiyeli Üstüne Çalışma

A Study on The siRNA Transfection Reagent Potential of Levan-Capped Gold Nanoparticles Synthesized by Laser Ablation

Ömer Aktürk¹ , Beste Çağdaş Tunali^{*1} 

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 27/05/2021 Kabul / Accepted: 24/08/2021 Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Bu çalışmada, altın nanoparçacık (AuNP) temelli kısa interferanslı RNA (siRNA) transfeksiyon vektörü tasarlanmıştır. Sıvı içinde atımlı lazer ablasyon yöntemiyle (PLAL) levan polisakariti içeren ortamda sentezlenen AuNP'ler (Levan-AuNP), karakterizasyon testlerinin ardından MCF-7 meme kanseri hücrelerinde siRNA transfeksiyon çalışmalarında kullanılmıştır. Hedefsiz siRNA sekansı ile gerçekleşen %48'lik Levan-AuNP-siRNA etkileşimi A260 absorbans ölçümleriyle bulunmuştur. Farklı derişimlerde Levan-AuNP ve 50 nM siGLO Green transfeksiyon indikatörü hazırlanarak MCF-7 hücrelerindeki optimum siRNA transfeksiyon koşulları belirlenmiştir. Transfeksiyon çalışmalarında öncelikle üçlü floresan boyama (siGLO Green, propidyum iyodür (PI) ve Hoechst 33342) yapılmış ve sitotoksikite görülmemiştir. Özellikle en yüksek derişimdeki Levan-AuNP grubunda ilk günde transfeksiyon gerçekleşirken, tek başına siGLO Green grubunda transfeksiyon gerçekleşmemiştir. 2 ve 4 günlük inkübasyonda ise tüm gruplarda transfeksiyon gözlemlenmiştir. PI ve Hoechst kullanılmadan yapılan ikinci transfeksiyon çalışmalarında ise siGLO Green floresan şiddetinin belirgin şekilde arttığı ve özellikle Levan-AuNP-siGLO Green komplekslerinde daha kuvvetli ve noktalı bir floresan ışımaya görülmüştür. Ortalama floresan şiddetleri ölçümlerine göre, tüm Levan-AuNP gruplarında istatistiksel açıdan anlamlı ölçüde artış bulunmuştur. Sonuç olarak, bu çalışmada geliştirilen Levan-AuNP'nin, mevcut transfeksiyon ajanlarına alternatif olabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Levan, altın nanoparçacık, lazer, siRNA, transfeksiyon”

Abstract

Here, gold nanoparticle (AuNP)-based small interfering RNA (siRNA) vector was developed. AuNPs synthesized by pulsed laser ablation in liquid (PLAL) method in a medium containing levan polysaccharide (Levan-AuNP) were characterized, then utilized in siRNA transfection studies on MCF-7 breast cancer cells. The interaction between non-targeted siRNA sequence and Levan-AuNP-siRNA was found to be 48% via A260 absorbance measurements. Optimal conditions for siRNA transfection in MCF-7 cells were determined by preparing different concentrations of Levan-AuNP and 50 nM siGLO Green transfection indicator. In transfection studies, initially triple fluorescent staining protocols (siGLO Green, propidium iodide (PI), and Hoechst 33342) were conducted and no cytotoxicity was observed. In 1 day-incubation, the transfection was realized especially in the highest concentration Levan-AuNP group while it was unsuccessful in siGLO Green group alone. Transfection was observed in all groups after 2 and 4 days of incubation. In the secondary transfection studies without PI and Hoechst, the fluorescence intensity of siGLO Green increased significantly, and stronger and punctuate fluorescence emission was seen in Levan-AuNP-siGLO Green complexes. Regarding the mean fluorescence intensity measurements, a statistical significance was confirmed in all Levan-AuNP groups. As a whole, the developed Levan-AuNP could be proposed as alternatives to the existing transfection agents.

Key Words

“Levan, gold nanoparticle, laser, siRNA, transfection”

1. Giriş

Gen terapisi, hastalıkların tedavisi ya da önlenmesi için nükleik asitlerin kullanılması yoluyla genlerin düzenlenmesi, tedavi edilmesi ya da değiştirilmesi yollarıyla olabilir (Rao ve Zacks, 2014) ve genetik hastalıklar, kanser, viral enfeksiyonlar ve kardiovasküler bozukluklar gibi birçok farklı hastalıkların tedavi edilmesi ya da önlenmesi konularında gelecek vaat eden bir yaklaşımdır (Alireza vd., 2019). Gen dağıtımı, terapötik proteini kodlayan plazmid DNA (Hardee vd., 2017) ya da RNA interferansı (RNAi) (Krzysztoń vd., 2019) dağıtımı şekillerinde olabilir. RNAi terapötiklerinin (ya da gen susturucu RNA) farklı türleri vardır; bunlar mikroRNA (miRNA), kısa saç tokası RNA (shRNA) ve kısa interferanslı RNA (siRNA) olarak bilinir (Sajid vd., 2020). RNAi'nin temel prensibi; çift sarmal RNA'nın hedef sekansına homologlaşması ile indüklenen sekansa özgü mRNA molekülünün bozunmasıdır (Krzysztoń vd., 2019). Sentetik siRNA'nın, memeli hücrelerinde, örneğin MCF-7 ve MDA-MB-231 gibi kanser hücre hatlarında (Kamaruzman vd., 2018), RNAi'yi indükleyebildiği literatürdeki çalışmalarda gösterilmiştir. siRNA'nın yüksek terapötik potansiyeline rağmen, klinik çalışmalarda uygulaması kısıtlıdır, çünkü çıplak siRNA ya da modifiye edilmemiş siRNA'nın, kan dolaşımına bırakıldığında (ya da serum içinde), çok kısa yarı ömürleri vardır ve serum endonükleazları ve RNazları tarafından enzimatik bozunuma uğrarlar (Sajid vd., 2020). Bunun gibi hücre dışı (enzimatik degradasyon, hızlı renal temizlenme, siRNA'nın biyolojik membranlardan geçememesi, immün sistemin aktivasyonu vb.) ve hücre içi (endozomal hapis, hücre içi doğru bölgeye ulaşması, hedef dışı etkiler vb.) birçok bariyeri aşmak için siRNA'nın farklı taşıyıcılar içine koyulduğu çalışmalar literatürde bildirilmiştir (Sajid vd., 2020).

Bu sebeple, siRNA'nın bozunmaya karşı korunması için uygun bir dağıtım sistemine enkapsüle edilmelidir. Bu dağıtım sistemleri; viral (retrovirüsler, adenovirüsler ve adeno-ilişkili virüsler) ya da viral olmayan (lipid, polimer, metal nanoparçacık vb.) vektörler şeklinde tasarlanabilmektedir (Khan vd., 2012). Viral vektörler ev sahibi hücreye genetik materyalin aktarımı konusunda çok etkili olsa da böyle virüslerin klinik uygulamaları, immünojeniklik, karsinojeniklik, enflamatuvar etki ve güvenlik kaygıları sebebiyle kısıtlanmaktadır (Ding vd., 2014). Viral olmayan vektörlerin ise viral vektörlere kıyasla, kromozomlara entegre olmama, düşük immünojenite, büyük genleri dağıtabilme, enfeksiyon riskinin olmaması, daha az masraflı olması ve en önemlisi de nispeten düşük bir ücret karşılığında büyük çapta üretim potansiyelleri gibi birçok avantajı vardır (Khan vd., 2012).

Polisakkaritler, viral olmayan gen dağıtım sistemi olarak önemli adaylar olarak kabul edilmektedirler, çünkü fizikokimyasal özellikleri hassas bir şekilde ayarlanıp değiştirilebilen moleküler çeşitlilikleri vardır (Khan vd., 2012). Gen dağıtım amacıyla kullanılan farklı doğal (kitozan, dekstran, siklodekstrin) ya da yarı sentetik (dekstran-spermine) polisakkaritler literatürde bildirilmiştir (Khan vd., 2012). Levan molekülü de früktozun polimerizasyonu sonucunda oluşan bir homopolisakkarittir (Srikanth vd., 2015). Literatürde levan kullanılarak bazı farklı peptid (BSA) (Sezer vd., 2011) ya da floresanlı görüntüleme problemleri (indosiyanın yeşili) (Kim vd., 2015) gibi malzemeler başarılı bir şekilde levan içinde enkapsüle edilmiştir. Sezer vd., (2017), yine başka bir çalışmada presipitasyon yöntemiyle vankomisin (Gram-pozitif bakterilere karşı etkili bir glikopeptid antibiyotik) yüklü levan temelli bir mikroparçacık geliştirmişlerdir. Ayrıca levanın kopresipitasyon yöntemi ile enzim immobilizasyonu için bir alternatif olabileceği de bildirilmiştir (Maciel vd., 2012). *Pseudomonas mandelii* bakterisi tarafından sentezlenen levanın antimikrobiyal etkiye sahip olduğu ve MCF-7 meme kanseri hücrelerinde doza bağlı olarak hücre canlılığını azalttığı da yakın zamanlı bir çalışmada bildirilmiştir (Koşarsoy ve Cihangir, 2020).

Literatürde, AuNP'lerin farklı yüzey modifikasyonları ile siRNA için uygun bir taşıyıcı olarak geliştirilebildiğini gösteren birçok çalışma vardır (Aktürk vd., 2019). Altın nanoparçacık kullanılarak geliştirilen siRNA transfeksiyon çalışmalarında sıklıkla bildirilen ve tercih edilen siRNA kompleksleştirme yöntemi AuNP yüzeyinin katyonik olarak modifiye edilmesi olmuştur (Ding vd., 2014; Ferreira vd., 2020; Kumar vd., 2019). Yöntem, sadece transfeksiyon verimi (ya da hücre içine alımı) düşünüldüğünde çok başarılı olmuş olsa da katyonik yapıların hücreler üstündeki toksik etkileri sebebiyle (Xue vd., 2014), azaltılmış katyonik ligand içeren, hatta nötral, zwitteriyonik ve anyonik yapıdaki AuNP'ler üzerine çalışmalar yapılmış ve bu şekilde de nanoparçacıkların hücre içine alınımının mümkün olduğu görülmüştür (Okoampah vd., 2020). Daha önceki çalışmalarımızda, biyolojik polimerler (ipek serisini ve levan) kullanarak sentezlediğimiz altın nanoparçacıkların sulu ortam kararlılığının ve *in vitro* biyoyumuluğun iyileştiği tespit edilmiştir (Aktürk vd., 2019; Aktürk vd., 2020; Aktürk, 2020). Ayrıca, UVC ışınımı altında sentezlediğimiz levan (*Bacillus subtilis* bakterisi ile fermentasyonla sentezlediğimiz) kaplı AuNP'lerin özellikle hücre membranı üstünde çökelti şeklinde birikerek hücre içine alındığını yakın tarihli son çalışmamızda bildirmiş bulunmaktayız (Aktürk, 2020). Bütün bu özellikler, levan kaplı altın nanoparçacıkların siRNA transfeksiyon ajanı olma potansiyeline olumlu katkılar sağlayabileceğini göstermektedir.

Yapılan literatür taramasından varılan çıkarımlar; altın nanoparçacık ve levan molekülleri birleştirilerek uygun bir siRNA transfeksiyon ajanı geliştirilebileceğini göstermektedir. Daha önce bu şekilde bir kombinasyonla siRNA transfeksiyon çalışması da yapılmamıştır. Hipotezimize göre; Levan-AuNP hücrelere herhangi bir zarar vermeden geçebilir, daha sonra taşıdığı kargoyu (yani siRNA) hücre sitozolüne endositik yollardan kaçarak bırakabilir ve nihayetinde de nükleusa ulaşabilir. Bu hipotez kapsamında yapılmış olan transfeksiyon testleri ile MCF-7 meme kanseri hücrelerine FAM işaretli SİGLO Green transfeksiyon indikatörünün levan-AuNP ile kompleksleştikten sonra transfekte olup olmadığı ve bunun çıplak siRNA'ya kıyasla ne oranda gerçekleştiği araştırılmıştır. Elde edilen bulgular, gelecekte yapılması planlanan gen susturma (bir gen knockdown mekanizması) çalışmaları için ön optimizasyon sonuçları olarak değerlendirilebilir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Levan (*Erwinia herbicola*'dan elde edilmiş 1 g levan, Sigma-Aldrich, Almanya), etanol [Absolute, $\geq 99.8\%$ (GC)], glutaraldehit (Derece I, %25 H₂O içinde), fosfat tamponlu salin (PBS) tabletler, dimetil sülfoksit (DMSO, moleküler biyoloji için) ve RPMI-1640 besi ortamı (L-glutamin ve sodyum bikarbonatlı) Sigma-Aldrich (Almanya) firmasından alınmıştır. Fetal bovin serum (FBS, Avrupa derecesinde ısı ile inaktifleştirilmiş, Güney Amerika orijinli), penisilin-streptomisin-Amfoterisin B çözeltisi (penisilin G sodyum tuzu: 10,000 birim.mL⁻¹, streptomisin sülfat: 10 mg.mL⁻¹, amfoterisin B: 25 µg.mL⁻¹) ve tripsin/EDTA çözelti A fenol kırmızılı (100 mL, %0,25 tripsin ve %0,02 EDTA) Biological Industries (USA) firmasından temin edilmiştir. 5 nmol siGENOME hedefsiz siRNA (Hedef Sekansı: UAGCGACUAAACACAUCAA), 5 nmol siGLO Green transfeksiyon indikatörü ve 5X siRNA tamponu Dharmacon™ (A Horizon Discovery Group Company, Australia) firmasından alınmıştır. Bütün diğer kimyasallar (hepsi analitik derecede) ve sarf malzemeler, aksi belirtilmediği müddetçe, ISOLAB (Germany) firmasından alınmıştır.

2.2. Altın Nanoparçacık Sentezi

Öncelikle ticari levan de-iyonize su (2,5 L HPLC Plus, Sigma-Aldrich) içinde 10 mg.mL⁻¹ derişiminde hazırlanmıştır. Daha sonra hazırlanan çözeltiden 10 mL alınıp 50 mL'lik beher içine aktarılmış ve 1 g'lık saf (%99,99) altın plaka (Kırıkkale'deki yerel bir altın satıcısından temin edilmiştir) bu beherin tabanına yerleştirilmiştir. Nanoparçacıklar, sıvı içinde atımlı lazer ablasyan (PLAL) adı verilen yöntemle nanosaniye Q-switch Nd-YAG lazer aletinin (Model: AML-1201, China) çalışma parametreleri (frekans = 10 Hz, atım zamanı = 10 ns, atım enerjisi = 1000 mJ, dalgaboyu = 532 nm), lazer kafası ve altın plaka yüzeyi arasındaki uzaklık (2 cm) ve lazer sayımı (1000 kez, yaklaşık 2 min) ayarlanarak sentezlenmiştir. Deneyden önceki ve sonraki altın plakanın kuru ağırlıkları hassas terazide ölçülerek çözelti içine salınan miktar 0,6 mg olarak bulunmuştur. Sentezlenen altın nanoparçacık (Levan-AuNP) için Transmisyon Elektron Mikroskobu mikrofrafisi (High Contrast Transmission Electron Microscopy, CTEM, 120 kV, Tecnaï™ G2 Spirit Biotwin, FEI) Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı'nda çekilmiştir, ayrıca Fourier Dönüşümlü Kızılötesi spektrumları (FTIR, Vertex 70 V, Bruker) ve zeta potansiyel değerleri de (Zetasizer Nano ZS instrument, Malvern Instruments, Malvern, UK) Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (KÜBTUAM) elde edilmiştir.

2.3. Altın Nanoparçacık-siRNA Kompleksleştirme Çalışmaları

Altın nanoparçacık sentezlendikten sonra öncelikle laminar akış kabini içinde bulunan UVC ışınına bir cam petri içinde 1 h boyunca sterilizasyon amacıyla maruz bırakılmıştır. Kontrol grubu olarak kullanılan çıplak siRNA (5 nmol siGENOME hedefsiz siRNA) 250 µL'lik 1X siRNA tamponu içinde çözünerek 20 µM'lık çözelti elde edilmiştir. Daha sonra 25 µL'lik alikotlar halinde -80 °C buzdolabında deneylerde kullanılabilecek kadar stoklanmıştır. Deney için çözdürülen alikotlar (25 µL, 20 µM) ilk dilüsyon için 1X siRNA tamponu ile (25 µL) karıştırılmış ve stok (50 µL, 10 µM'lık) hazırlanmıştır. Deneyler sırasında siRNA derişimini doğru tespit edebilmek için son derişim 1 µM siRNA olarak belirlenmiştir; bunun için 450 µL Levan-AuNP (10 mg.mL⁻¹), 50 µL siRNA (10 µM) ile karıştırılmıştır (G1). siRNA kontrol (G2) için 450 µL MB-H₂O (Molecular biology grade water, Biological Industries, Israel) ile 50 µL siRNA (10 µM) ile ve Levan-AuNP kontrolü (G3) için ise 450 µL Levan-AuNP (10 mg.mL⁻¹), 50 µL 1X siRNA tamponu ile karıştırılmıştır. Cihazın körünü (BLANK) almak için kullanılan boş kontrolde (G4) ise 50 µL 1X siRNA tamponu, 450 µL MB-H₂O ile karıştırılmıştır. Bütün karışımlar viyaller içinde hazırlanmış ve orbital karıştırıcı içinde 1 h boyunca oda koşullarında yavaşça (200 rpm) karıştırılmaya bırakılmıştır. Daha sonra bütün örnekler steril ependorf tüplerine aktarılıp santrifüj edilmiştir (10000 rpm ya da 10845 RCF, 4 °C, 30 min). Süpernatantta kalan kısım mikro-UV spektrofotometre (micro-UV spectrophotometer instrument, MSPTouch-200, INOVIA Technology) cihazının RNA-40 moduyla ölçülmüş ve siRNA-Levan-AuNP etkileşimi (E_{siRNA} ya da Levan-AuNP ile kompleksleşen siRNA) Levan-AuNP ile birlikte çöken siRNA'nın oranı aşağıdaki eşitlik (Eş. 1) kullanılarak sayısal olarak ifade edilmiştir:

$$E_{siRNA} (\%) = \frac{E_{kileşen_{siRNA} miktarı}}{E_{klenen_{siRNA} miktarı}} \times 100 \quad (1)$$

E_{siRNA} derişimi 1 µM olarak ayarlanmış ve son etkileşen siRNA derişimi de (ya da miktarı) eklenenden, süpernatant derişimi (ya da miktarı) çıkarılarak bulunmuştur. Levandan kaynaklı 300-200 nm dalga boyu aralığında bir pik çıktığı için A260 ölçümlerinde Levan-AuNP kontrolleri kullanılarak düzeltme (yani G1-G3 miktarı) yapılmıştır. Tek başına siRNA kontrolü kullanılarak da siRNA'nın santrifüjle kendiliğinden çöküp çökmediği kontrol edilmiştir. Sonuçlar bar grafiği şeklinde, G1 ve G2 grupları istatistiksel açıdan kıyaslanarak sunulmuştur.

2.4. siRNA Transfeksiyon Testleri

siRNA transfeksiyon deneyleri için siGLO Green transfeksiyon indikatörü kullanılmıştır. Öncelikle 5 nmol olarak alınan ürün firma prosedürüne uygun olarak siRNA tamponu içinde (1X) çözünerek 20 µM olarak hazırlanmış, 50 µL'lik alikotlar halinde -80 °C buzdolabında deneylerde kullanılabilecek kadar stoklanmıştır. siRNA'ların son derişimi, 48 kuyucuklu plakalarda MCF-7 hücrelerine (20,000 hücre/kuyucuk) eklenirken 50 nM olarak ayarlanmıştır (Firma tarafından önerilen molarite). Bu molarite sabit tutularak transfeksiyon kimyasalının (yani Levan-AuNP grubu) derişimi değiştirilmiş böylece farklı deney grupları son karışımdaki Levan-AuNP'nin derişimine göre (Grup A: 0,9 mg.mL⁻¹, Grup B: 0,45 mg.mL⁻¹, Grup C: 0,225 mg.mL⁻¹, Grup D: 0,1125 mg.mL⁻¹, Grup E: 0 mg.mL⁻¹) oluşturulmuştur (Tablo 1). siRNA-Levan-AuNP karışımı hücrelerle karıştırıldığı zaman 10 kat daha dilüsyona uğramıştır. Grup F ise ne siGLO Green transfeksiyon indikatörü ne de Levan-AuNP içermeyen kontrol grubudur. Bu gruplar arasındaki farklılar, yani transfeksiyon verimi, nitel olarak floresan mikroskobuyla 1, 2 ve 4 günlük inkübasyon süreleri sonunda incelenmiştir. Uygulanan işlemin olası sitotoksik etkisi sonucu hücrelerin apoptozis mi yoksa nekroza uğrayıp mı öldüklerini anlamak ve hücrelerin tam olarak yerini tespit etmek için ayrıca Hoechst 33342 ve propidyum iyodür ikili floresan boyaması da inkübasyon süreleri sonunda yapılmıştır. Hoechst 33342 ve propidyum iyodür boyaları

kullanılmadan ayrıca 2 ve 4 günlük inkübasyon süreleri sonunda da siGLO Green indikatörünün floresan ışmaları incelenmiş ve farklı gruplar arasındaki kıyaslamalar bir görüntü analiz programı (ImageJ, NIH, USA) vasıtasıyla ortalama floresan şiddetleri ölçülerek (yani “mean gray value” ölçümü yapılarak) yapılmıştır. Floresan mikroskobu görüntülerindeki 3 farklı bölgeden bütün bölgenin ortalama floresan şiddeti ölçülmüş ve istatistik analizi yapılmıştır. Literatürde de benzer şekilde görüntü analizi yapılan çalışmalar mevcuttur (Chang vd., 2011; Li vd., 2014).

Tablo 1. siRNA transfeksiyon testleri için hazırlanan deney grupları

Gruplar	5 µM stoktan eklenen siRNA hacmi (µL)	Eklenen Levan-AuNP (10 mg.mL ⁻¹) hacmi (µL)	Hücre besiyeri hacmi (µL)	Son Levan-AuNP derişimi (mg.mL ⁻¹)
Grup A	20	180 (+ 0 µL MB-H ₂ O)	1800	0,9
Grup B	20	90 (+ 90 µL MB-H ₂ O)	1800	0,45
Grup C	20	45 (+ 135 µL MB-H ₂ O)	1800	0,225
Grup D	20	22,5 (+ 157,5 µL MB-H ₂ O)	1800	0,1125
Grup E	20	0 (+ 180 µL MB-H ₂ O)	1800	0
Grup F	0 (+ 20 µL 1X siRNA tamponu)	0 (+ 180 µL MB-H ₂ O)	1800	0

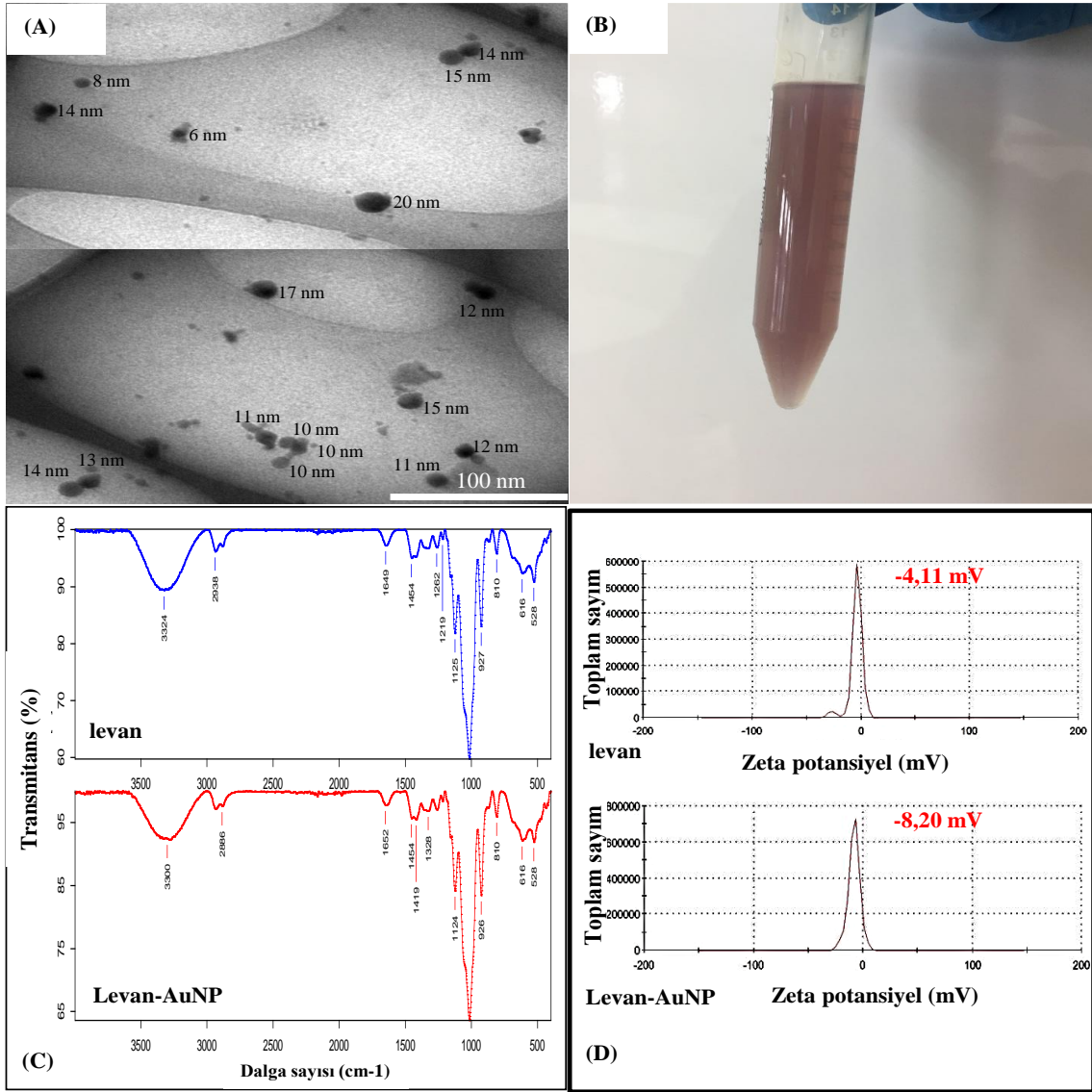
2.5. İstatistik Analizi

Elde edilen bulgular, Excel paket programı kullanılarak değerlendirilmiştir. Excel programındaki Veri Çözümleme Aracı kullanılarak gruplar arasındaki anlamlı farklar tek-etken ANOVA (Varyans Analizi) istatistik analizi ile değerlendirilmiştir. İkili gruplar arasındaki istatistiksel kıyaslama ise yine Excel’de 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. Altın Nanoparçacık Sentez ve Karakterizasyonu

TEM mikrografisine bakıldığında (Şekil 1A), oluşan nanoparçacıklar küresel gözükmektedir. Sentez sırasında kullanılan levan, görüntüde gölgeler şeklinde koyu arka yapı oluşturmuştur. Nanoparçacıkların birbirinden ayrık bir şekilde durması, kullanılan levanın nanoparçacık agregasyonunu verimli bir şekilde engellediğini kanıtlamaktadır. Ayrıca literatürde benzer şekilde lazer ablasyonu ile sentezlenen altın nanoparçacıkların büyük kümelenmeler veya zincir benzeri yapılar oluşturduğu kaydedilmiştir (Naharuddin vd., 2020). Mikrografilerde çok küçük ve kirlilik gibi görünen nanoparçacıklar (deneylerde herhangi bir saflaştırma veya boyut eleme yöntemi kullanılmadığı için) hesaba katılmadığı takdirde Levan-AuNP’lerin boyut aralığı 8-20 nm aralığında değişmektedir. Lazer ablasyonu sonucunda, AuNP’lere özgü karakteristik renk dönüşümü (kırmızı, soluk pembe) oluşmaktadır (Şekil 1B). Levadaki OH grupları ile altın nanoparçacıklarda ablasyon sonucu oluşan oksit grupları arasında etkileşim olduğu düşünülmektedir. FTIR analizinde görülen OH fonksiyonel gruplarının (3300-3321 cm⁻¹) pik şiddet ve yerlerindeki belirgin değişimler bunu doğrular niteliktedir (Şekil 1C). Levana özgü diğer karakteristik piklerin Levan-AuNP grubunda da korunması iyi bir kaplama olduğuna işaret eder (Aktürk, 2020). PLAL yöntemi ile sentezlenen altın nanoparçacıkların yüzeylerinde oksit katmanların oluştuğu daha önce de bildirilmiş (Sylvestre vd., 2004) ve bu fonksiyonel grupların hidrojen bağı etkileşimine girebileceği belirtilmiştir (Bailly vd., 2019). Çalışmada kullanılan hem ticari levanın hem de Levan-AuNP gruplarının negatif zeta potansiyeli vardır (Şekil 1D), yani siRNA kompleksleştirme çalışmalarında negatif yüklü Levan-AuNP ile negatif yüklü siRNA arasında herhangi bir elektrostatik etkileşim beklenmemektedir.



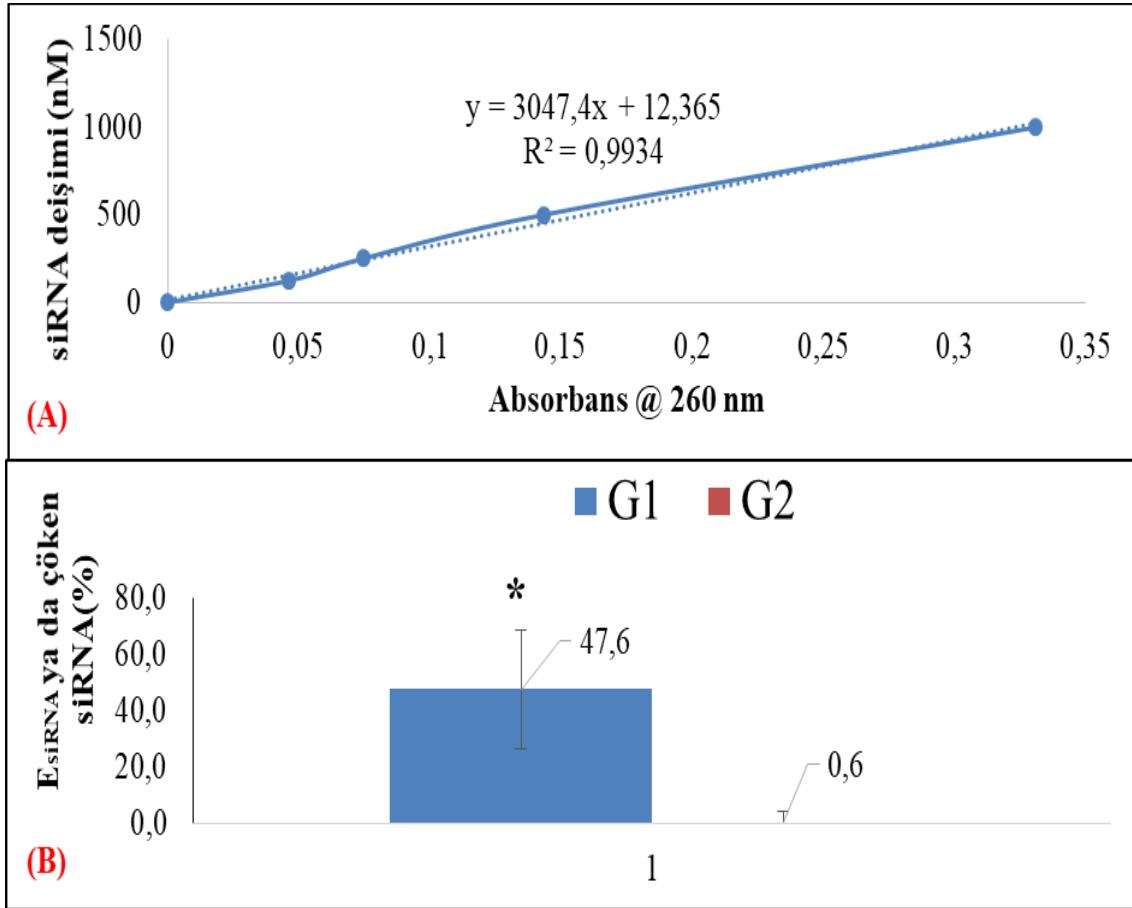
Şekil 1. Ticari levan ve Levan-AuNP grubunun karakterizasyon test sonuçları: (A) TEM mikrografileri, (B) altın nanoparçacık oluşumunu teyit eden karakteristik kırmızı renk değişimleri, (C) FTIR spektrumları ve (D) zeta potansiyel ölçümleri.

3.2. Altın Nanoparçacık ve siRNA Kompleksleştirme Çalışmaları

Tek başına siRNA kontrol kullanılarak hazırlanan farklı dilüsyonlarda (1000, 500, 250, 125 ve 0 nM) mikro-UV spektrofotometre cihazının RNA ölçüm modu (RNA-40) seçilerek elde edilen absorbans ölçümleriyle (Tablo 2) RNA nicelik tespiti için doğrusal kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur (Şekil 2A). İlk yapılan ölçümlerde 125 nM altı ölçümler cihazın tespit sınırının dışında kaldığı görüldüğü için doğrusal bir kalibrasyon eğrisi için alt değerler kullanılmamıştır. Firmanın verdiği protokol bilgileri doğrultusunda 1X siRNA tamponu içinde 1000 nM (1 μ M) olarak hazırlanan siRNA derişimi mikro-UV spektrofotometre cihazının RNA-40 modu ile kontrol edilmiş ve firma protokollerinde belirtilen değere (1 μ M siRNA = 13,3 ng. μ L⁻¹) yakın çıkmıştır. Yine aynı protokolde, belirtilen değerden sapmaların 1X siRNA tamponu içindeki tuzlardan kaynaklanabileceği söylenmektedir.

Tablo 2. Mikro-UV spektrofotometre cihazının RNA ölçüm sonuçları

siRNA konsantrasyonu (nM)	1000	500	250	125
A260	0,333	0,141	0,071	0,047
A260/A280	2,21	2,16	2,41	2,3
Ölçülen RNA konsantrasyonu (ng. μ L ⁻¹)	13,343	5,673	2,846	1,919



Şekil 2. (A) Mikro-UV spektrofotometre cihazı ölçüm sonuçları ile elde edilen siRNA kalibrasyon eğrisi, (B) % E_{siRNA} (siRNA-Levan-AuNP etkileşimi) ya da çöken % siRNA ölçümüyle G1 (siRNA+ Levan-AuNP) ve G2 (siRNA) gruplarının kıyaslanması. *: ikili gruplar arasında istatistiksel fark ($p < 0,05$).

Bu çalışmada, süspansiyon edilmiş siRNA'nın derişimini en doğru şekilde bulmak için tercih edilen yöntem 260 nm dalga boyunda absorbans ölçümü olmuştur. Zaten bilindiği üzere, zeta potansiyel ve dinamik ışık saçılımı ile hidrodinamik boyut ölçümleri, nitel olarak siRNA yüklemesini teyit etmektedir, ancak siRNA'nın 260 nm dalga boyunda (siRNA'nın pik absorbansı) absorbans ölçümü ile nicelik tayini daha önemli bilgiler sağlamaktadır (Melamed vd., 2017). Levan-AuNP ile etkileşime giren siRNA'nın, santrifüj işlemi sonunda birlikte çöktüğü kabul edilerek yapılan hesaplamalara göre yaklaşık %48 oranında enkapsülasyon değeri bulunmuştur (Şekil 2B). Bu değer, tek başına siRNA çökme oranıyla kıyaslandığında (santrifüj işlemi kaynaklı çökmelerden gelebilecek hataları elimine etmek için) istatistiksel açıdan anlamlı ölçüde yüksek çıkmıştır. Levan-AuNP'nin santrifüj işlemi sonunda çökmesi tüp tabanında oluşan pembe renkli pelet ile görsel olarak onaylanmış ve süspansiyon içinde işlem sonunda çökmeyen, geri kalan numuneden kaynaklı A260 değeri için düzeltme (G1-G3) yapılmıştır. Zaten, bunu kontrol için yapılan başka ölçümlerde, G3 grubunun (sadece Levan-AuNP) santrifüj öncesi ve sonrası ortalama A260 değerleri, sırasıyla, 1,3 ve 0,7 olarak ölçülmüştür. Yöntem, görüldüğü üzere kolaydır ve siRNA-nanoparçacık etkileşimini nicel olarak gösterebilmektedir, ancak süpernantatta kalan siRNA-nanoparçacık komplekslerinin miktarını saptayamadığı için ölçüm hassasiyeti çok yüksek değildir ve ayrıca RNA türünü (sense ve antisense iplikleri) ayırt etmek bu yöntemle mümkün değildir. Levan moleküllü amfifilik bir yapıya sahiptir (hidrofobik bir boşluk ve hidrofilik bir dış kısma sahiptir) ve bu özellik sayesinde suda kendiliğinden toplanıp nanoparçacık oluşturabilir (Kim vd., 2015). Literatürde bu özellik kullanılarak levan moleküllü içinde enkapsüle edilmiş farklı terapötik (Sezer vd., 2017) ya da görüntüleme ajanı (Kim vd., 2015) örnekleri mevcuttur. Levan kaplı altın nanoparçacıklar da suda oluşturdukları sıkı küresel konformasyonları sayesinde santrifüj işlemi sonunda kolaylıkla çökmekte ve siRNA molekülünü de yapıları içinde hapsederek tuttıkları düşünülmektedir. Bu çalışmada geliştirdiğimiz taşıyıcı molekül de zayıf anyonik yapıda levan moleküllüyle kaplı AuNP nanoparçacık olmuştur. Çöktürme yöntemi ile enkapsüllenen siRNA miktarı %48 civarında olduğu için ayrıca Levan-AuNP yapısının gelecekte katyonik moleküllerle modifiye edilmesi ile (yani yarı sentetik polimerler sentezlenerek) bağlanma verimi elektrostatik etkileşimle artabilecektir. Anyonik yapıda polisakaritlerin katyonik polimerlerle (PEI ve spermin gibi) modifiye edilip gen transfeksiyon ajanı olarak kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur (Khan vd., 2012). Bu şekilde siRNA kompleksleşme verimi artarken diğer yandan da sitotoksitenin azaldığı bildirilmiştir (Khan vd., 2012).

3.3. siRNA Transfeksiyon Testleri

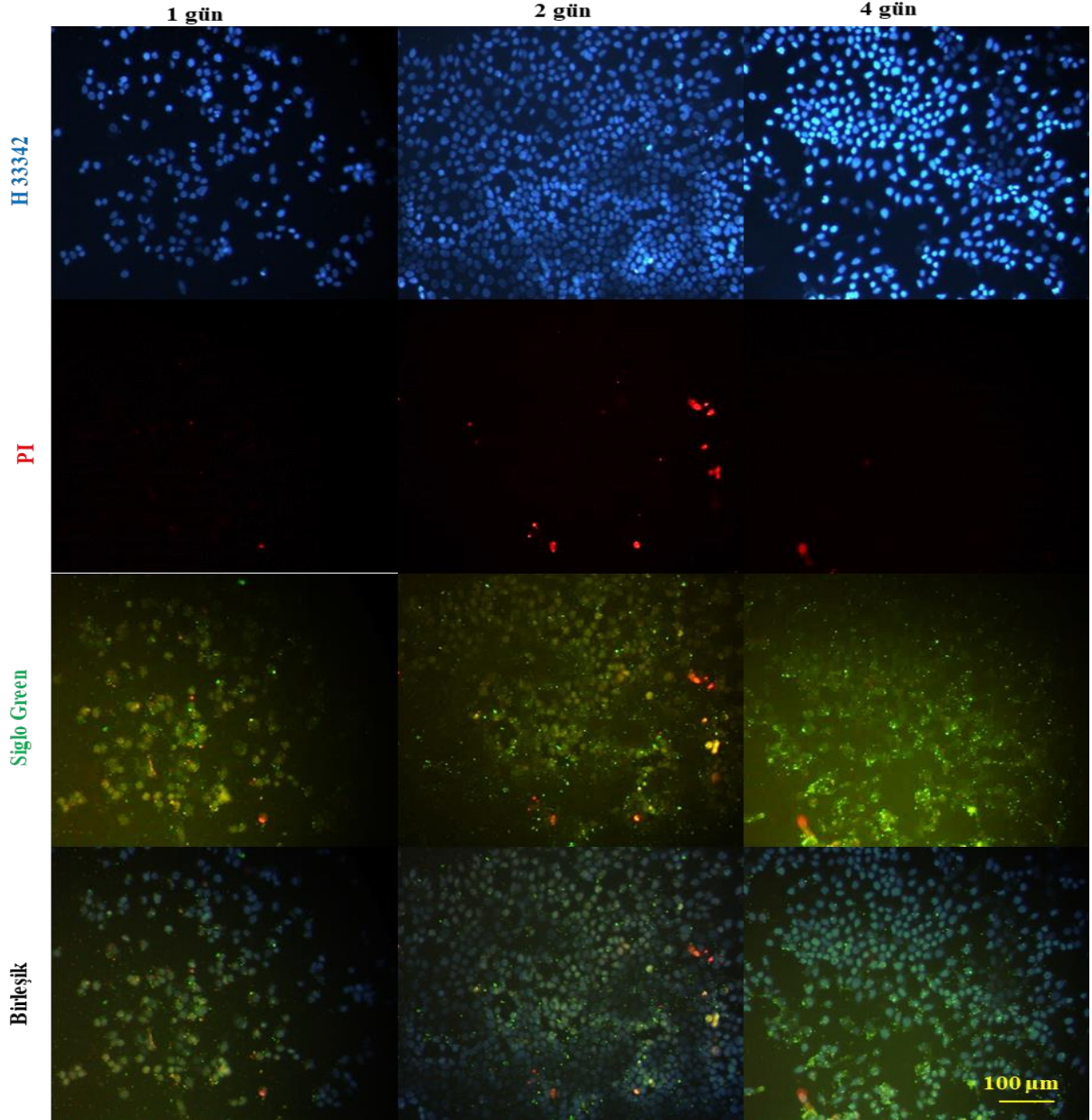
Transfeksiyon uygulaması için hazırlanan farklı deney gruplarının MCF-7 hücrelerindeki olası sitotoksik etkisini daha çok apoptotik mi yoksa nekrotik yolak ile mi gerçekleştirdiği H33342 ve PI ikili floresan boyamasıyla incelenmiştir (Şekil 3-8). Tüm deney grupları için yapılan apoptotik indekslemeye göre, en yüksek apoptotik etki Levan-AuNP/siGLO (0,9 mg.mL⁻¹/50 nM) örneği uygulaması sonucu (4. gün) %50 olarak saptanmış, bunu %10 ile siGLO (50 nM) uygulaması (4. gün) izlemiş ve diğer tüm gruplar (1, 2 ve 4. günler) için apoptotik indeks değeri %1'in altında bulunmuştur (Tablo 3). Belirtilen gruplarda (Levan-

AuNP/siGLO (0,9 mg.mL⁻¹/50 nM) ve siGLO (50 nM)), 4. gündeki artan apoptotik etkinin, hedef hücrelerin uygulanan örneğe maruziyet süresinin uzaması ile ilgili olabileceği değerlendirilmiştir. Queiroz ve arkadaşlarının (Queiroz vd., 2017) yapmış oldukları bir çalışmada benzer şekilde, Levan (0,1 mg.ml⁻¹, 48 h) uygulanan MCF-7 hücrelerinde oksidatif stres kaynaklı antiproliferatif ve pro-apoptotik etkilerin görüldüğü bildirilmiştir. Nekrotik indeks değerleri ise en yüksek siGLO (50 nM) ve Levan-AuNP/siGLO (0,9 mg.mL⁻¹/50 nM) örnekleri uygulaması (2. gün) sonucunda %5 olarak bulunmuş, diğer tüm gruplar için nekrotik indeks değerleri bu değer altında hesaplanmıştır (Tablo 3). Literatürde özellikle yüzeyi katyonik olarak modifiye edilmiş (pozitif yüklü) AuNP için sitotoksik sonuçlar olduğu bildirilmiştir (Roesler vd., 2011; Remant vd., 2011; Goodman vd., 2004; Godbey ve Mikos, 2001). Polietilenimin (PEI) (Goodman vd., 2004) ve kuaterner amonyum (Godbey ve Mikos, 2001) gibi katyonik yapıda kimyasallar negatif yüklü hücre membranına bağlanmayı sağlamakta ve hücre lizisine sebep olmaktadır.

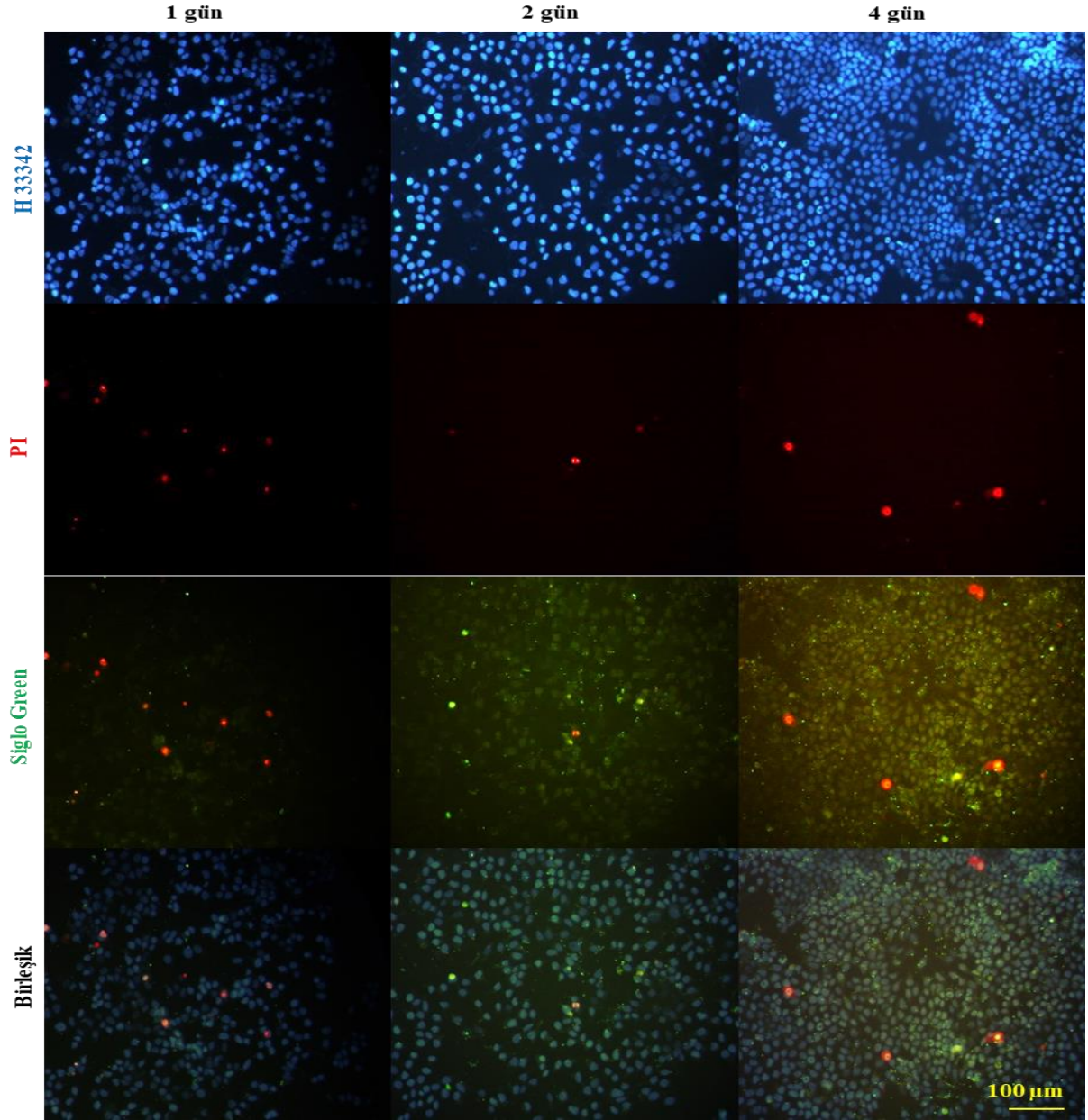
Tablo 3. Deney gruplarının uygulanması sonrasında MCF-7 meme kanseri hücreleri için hesaplanan apoptotik ve nekrotik indeks değerleri (%)

	Apoptotik İndeks (%)			Nekrotik İndeks (%)		
	1 gün	2 gün	4 gün	1 gün	2 gün	4 gün
Grup A: Levan-AuNP/siGLO (0,9 mg.mL ⁻¹ /50 nM)	-	<1	50	-	5	<1
Grup B: Levan-AuNP/siGLO (0,45 mg.mL ⁻¹ /50 nM)	<1	<1	<1	4	<1	<1
Grup C: Levan-AuNP/siGLO (0,225 mg.mL ⁻¹ /50 nM)	<1	<1	<1	3	4	<1
Grup D: Levan-AuNP/siGLO (0,1125 mg.mL ⁻¹ /50 nM)	<1	<1	<1	2	1	<1
Grup E: siGLO (50 nM)	<1	<1	10	<1	5	<1
Grup F: Kontrol	<1	<1	<1	<1	3	<1

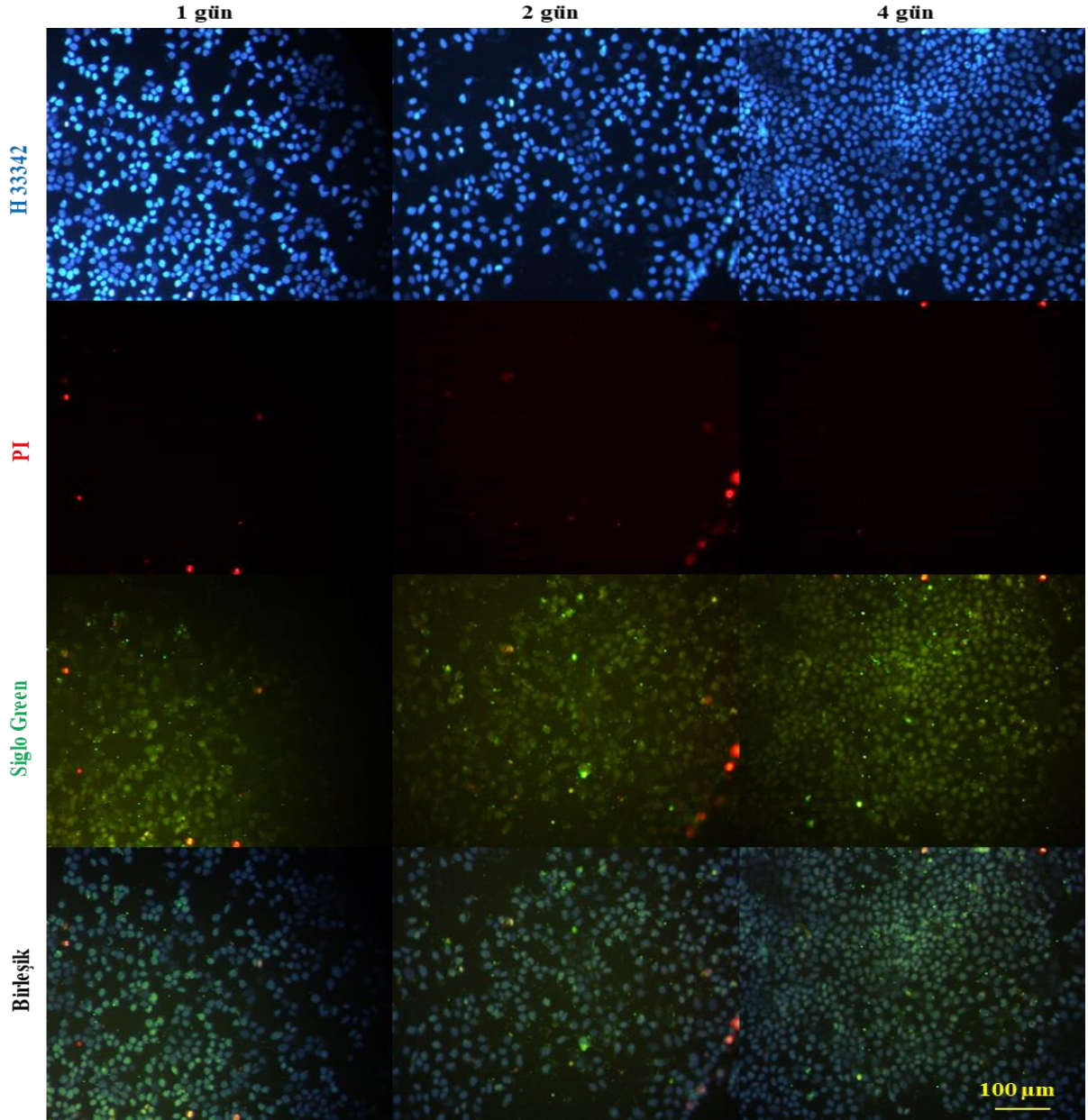
Floresan mikrografileri incelendiğinde (Şekil 3-8), ilk günde başarılı transfeksiyon (yeşil floresan ışımaya) gösteren grupları tespit etmek zordur. Ancak, Levan-AuNP derişimi artıkça yeşil floresanın şiddeti de artmaktadır. Özellikle, en yüksek derişimde Levan-AuNP içeren grubun 4. gün floresan ışımaya diğer gruplardan belirgin bir şekilde daha fazladır. Hiç Levan-AuNP içermeyen grupta ise transfeksiyon olması kullanılan siRNA molaritesinin yüksek olmasına bağlanabilir. Ayrıca, DNA, RNA ve anyonik yapıdaki diğer moleküllerin hücre yüzeyinde yer alan süpürücü reseptörlere bağlanabildiği ve hücre içine ulaşabildiği bildirilmiştir (Brodeur vd. 2008). Nanoparçacıkların hücre membranına çökelti halinde birikmesi de (Gemeinhart vd., 2005) elektrostatik temelli itici kuvvetlere karşı gelinerek hücre içine giriş yolunu reseptör aracılı olarak sağlayan önemli bir faktör olarak düşünülebilir. Daha önceki benzer bir çalışmamızda da levan kaplı altın nanoparçacıkların L929 fibroblastik hücre membranına çöktüğü ve özellikle hücrelerle etkileşime girerek endositoza uğradığı gösterilmiştir (Aktürk, 2020). AuNP'lerin canlı hücrelere girişindeki temel mekanizma endositozdur (Li vd., 2008; Shukla vd., 2005; Uboldi vd., 2009). siRNA kargosuyla yüklü AuNP'lerin hücre içine girdikten sonra endositik veziküllerde toplandığı ve belirli bir zamandan sonra endozomal kaçış yaparak siRNA moleküllerinin sitozole salındığı varsayılmaktadır (Cebrián vd., 2011). Floroforların özellikle perinükleer bölgedeki dağılımı (Şekil 3-8) Levan-AuNP-siRNA komplekslerinin endositik yollarla yoluyla hücreye alındığını göstermektedir (van Asbeck vd., 2013; El-Andaloussi vd., 2006; Chiu vd., 2004).



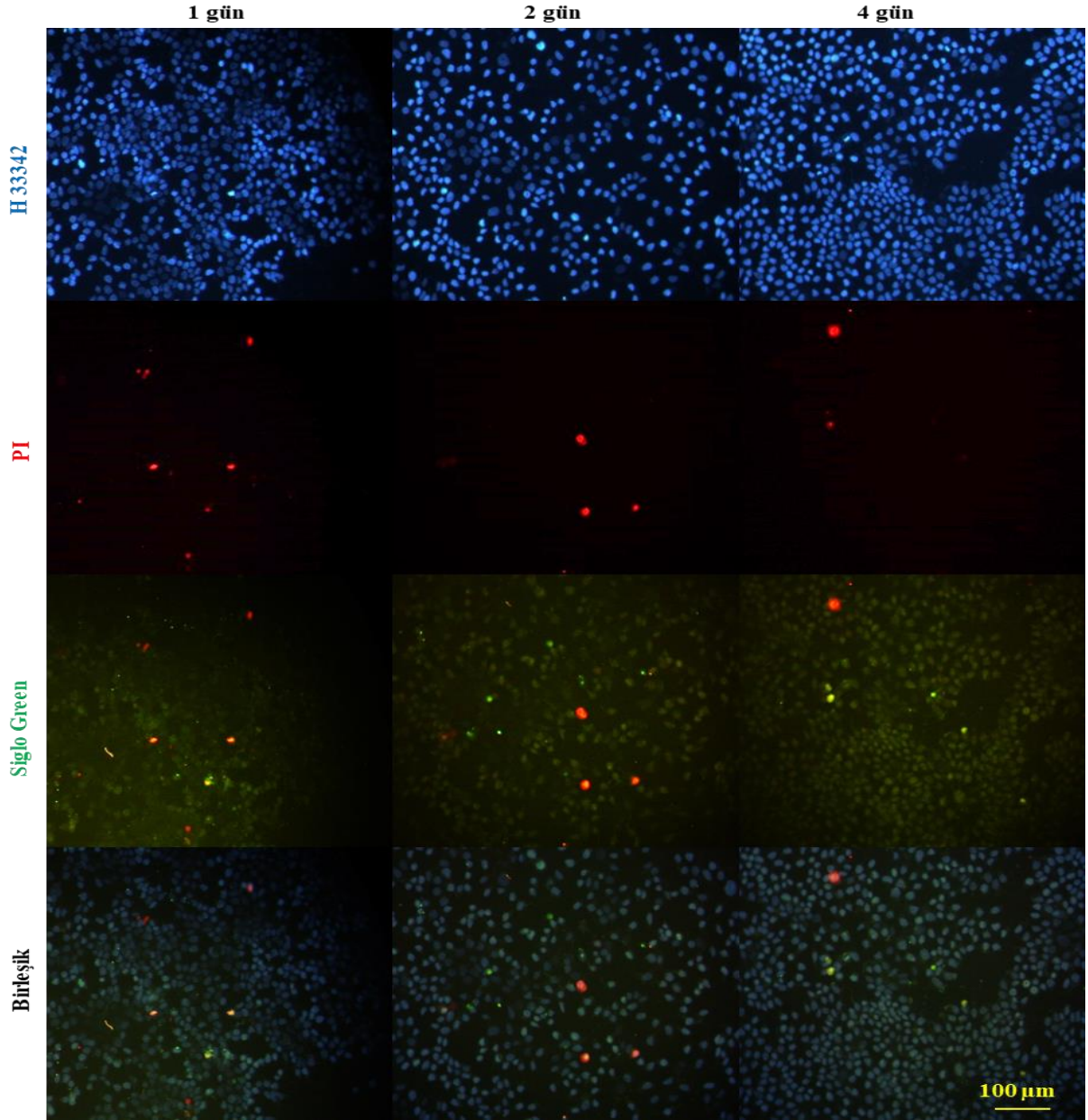
Şekil 3. Sabit molaritede (50 nM) siGLO Green transfeksiyon indikatörü ile Levan-AuNP'nin (Grup A: 0,9 mg.mL⁻¹) karıştırılması sonucu oluşturulmuş grubun floresan mikroskobu görüntüleri.



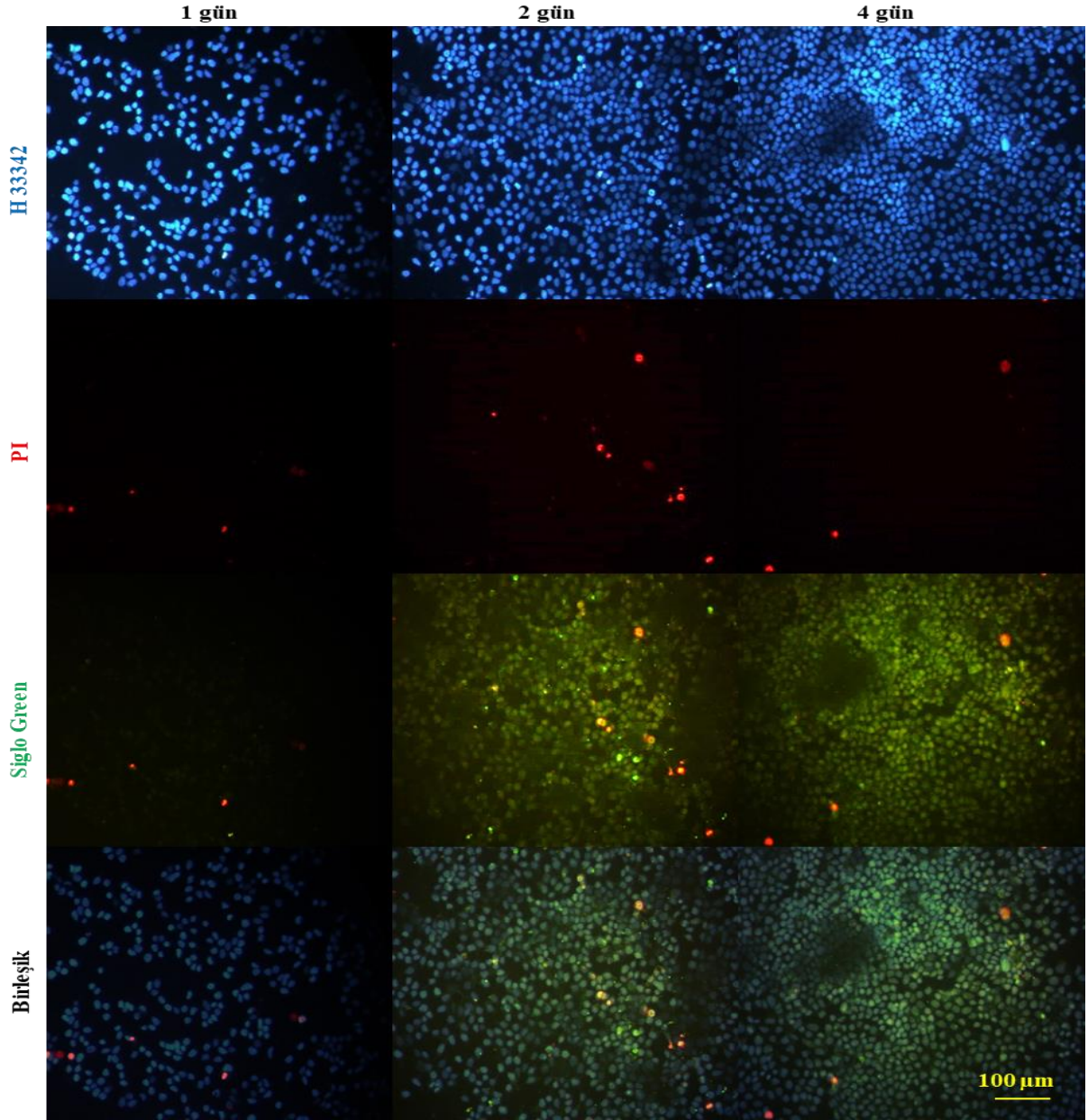
Şekil 4. Sabit molaritede (50 nM) siGLO Green transfeksiyon indikatörü ile Levan-AuNP'nin (Grup B: 0,45 mg.mL⁻¹) karıştırılması sonucu oluşturulmuş grubun floresan mikroskobu görüntüleri.



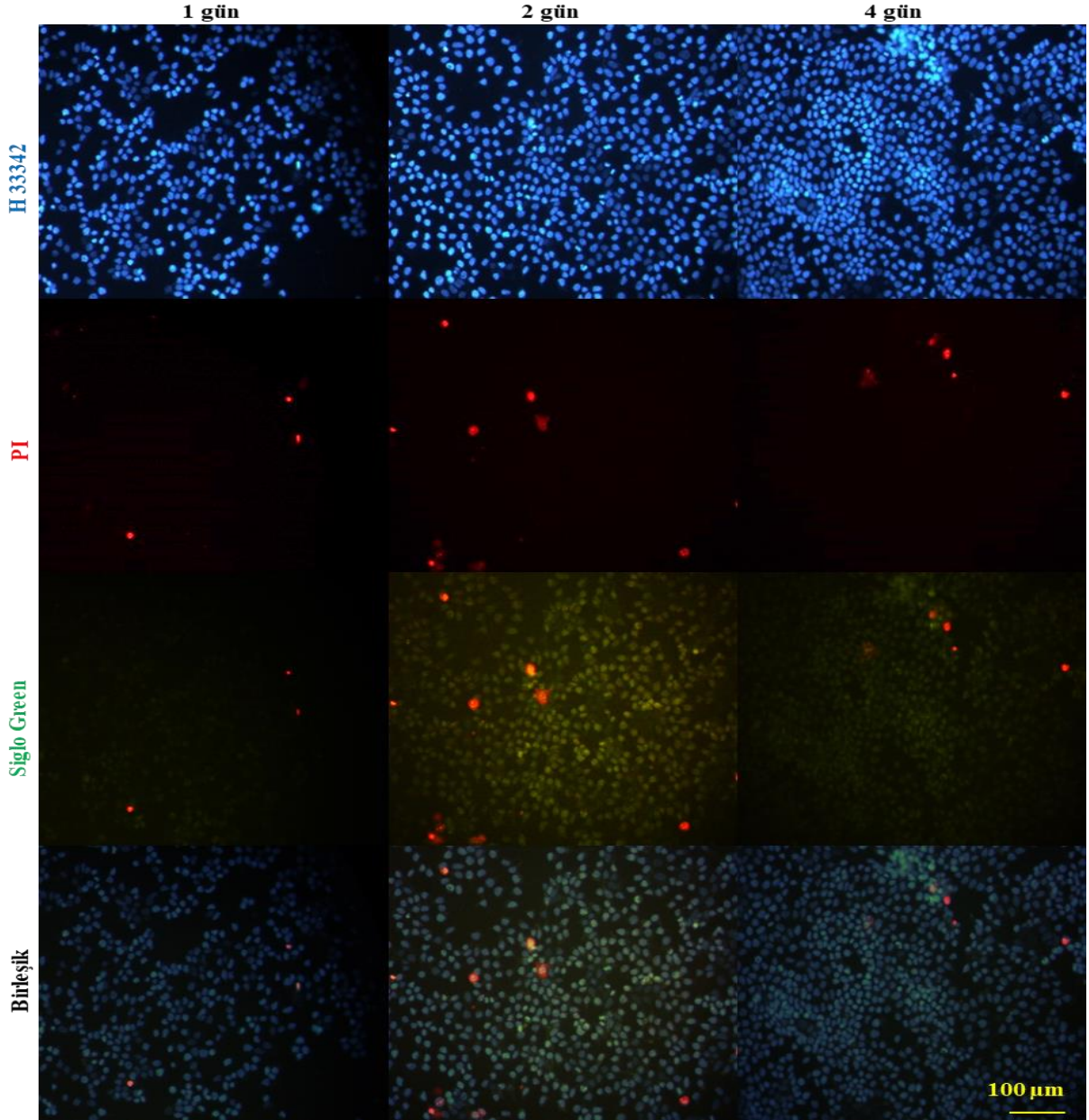
Şekil 5. Sabit molaritede (50 nM) siGLO Green transfeksiyon indikatörü ile Levan-AuNP'nin (Grup C: 0,225 mg.mL⁻¹) karıştırılması sonucu oluşturulmuş grubun floresan mikroskobu görüntüleri.



Şekil 6. Sabit molaritede (50 nM) siGLO Green transfeksiyon indikatörü ile Levan-AuNP'nin (Grup D: 0,1125 mg.mL⁻¹) karıştırılması sonucu oluşturulmuş grubun floresan mikroskobu görüntüleri.

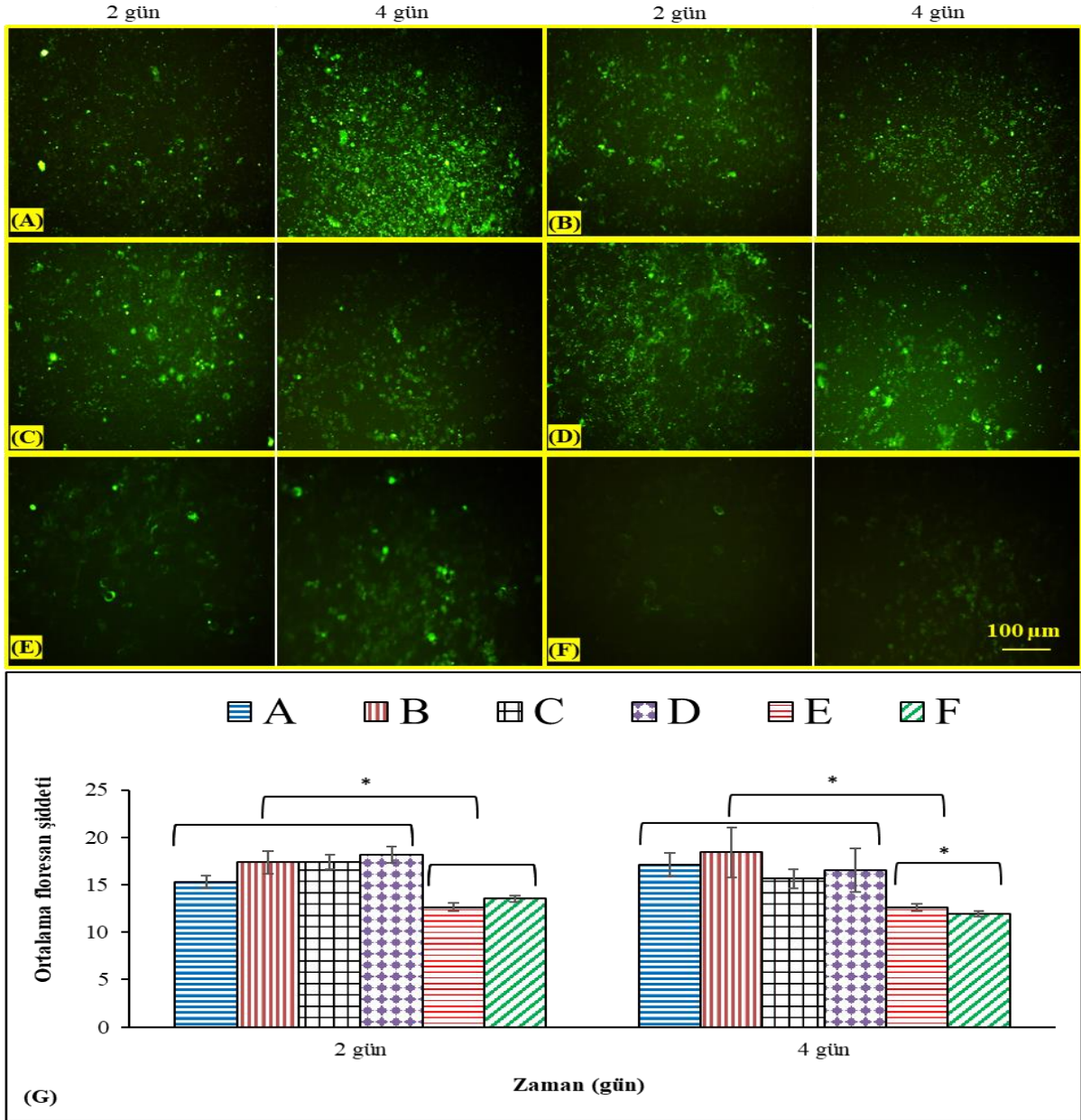


Şekil 7. Sadece sabit molaritede (50 nM) siGLO Green transfeksiyon indikatörü içeren grubun (Grup E: Levan-AuNP yok) floresan mikroskobu görüntüleri.



Şekil 8. Ne SiGLO Green transfeksiyon indikatörü ne de Levan-AuNP içermeyen grubun (Grup F: Kontrol Grubu) floresan mikroskobu görüntüleri.

PI boyası, siGLO Green transfeksiyon indikatörünü görüntülemek için kullanılan floresan filtresinde de yeşil ışımaya yaptığı için transfeksiyon değerlendirmesi bu üçlü floresan boyamasında çok verimli olmamıştır. Bu sebeple apoptoz, nekroz boyalarının kullanılmadığı gruplarda (yalnızca siGLO Green transfeksiyon indikatörü olan) transfeksiyon değerlendirmesi 2 ve 4 günlük inkübasyon süreleri sonunda tekrarlanmıştır (Şekil 9). Buradaki görüntüler Levan-AuNP'nin transfeksiyon ajanı olarak başarılı olduğunun kanıtıdır. Levan-AuNP olmayınca da yine resöptör aracılı transfeksiyon gerçekleşmiş ancak, diğer gruplara (Levan-AuNP içeren) kıyasla çok az düzeydedir. Bu kıyaslamayı sayısal olarak yapabilmek için ImageJ programında floresan şiddeti ölçülmüş ("Mean gray value" ölçümü) ve istatistiksel açıdan anlamlı farklar bulunmuştur. Levan-AuNP gruplarındaki değerler, sadece siGLO ve boş kontrolden istatistiksel açıdan daha yüksek çıkmakla beraber kendi aralarında istatistiksel açıdan anlamlı bir fark bulunamamıştır. Levan-AuNP gruplarında, yoğun bir yeşil ışımaya, özellikle parçalı bir şekilde gerçekleşmiştir. siGLO'nun bu noktalı deseni, özellikle nükleli ve sitoplazma boyunca dağılmış bir halde olması, endositik bir hücre alımı ve aynı zamanda gelişmiş bir endozomal kaçışa işaret etmektedir (Schiroli vd., 2019).



Şekil 9. Sabit molaritede (50 nM) siGLO Green transfeksiyon indikatörü ile farklı derişimlerde Levan-AuNP'nin karıştırılması sonucu oluşturulmuş grupların (A: 0,9 mg.mL⁻¹, B: 0,45 mg.mL⁻¹, C: 0,225 mg.mL⁻¹, D: 0,1125 mg.mL⁻¹, E: 0 mg.mL⁻¹), siGLO Green transfeksiyon indikatörü ve Levan-AuNP içermeyen grubun (F) floresan mikroskobu görüntüleri ve gruplar arasında ortalama floresan şiddet değeri kıyaslaması (G). *: ikili gruplar arasında istatistiksel fark (p < 0,05).

4. Sonuç

Bu çalışmada gerçekleştirilen analizler göstermiştir ki sentezlenen levan polisakariti kaplı altın nanoparçacıklar, siRNA moleküllerinin hücre içine alınmasına yardımcı olmaktadır ve transfeksiyon ajanı olma potansiyeli vardır. Sentezlenen anyonik yapıdaki Levan-AuNP, hücre membranını başarılı bir şekilde geçmiş ve siRNA (siGLO Green) transfekte olmuştur. Ancak, %48'lik kompleksleşme oranını daha da artırmak için literatürdeki çalışmalara benzer şekilde, negatif yüklü siRNA ile pozitif yüklü altın nanoparçacıkları elektrostatik olarak etkileştirmek etkili bir strateji olabilir. Bu sebeple, gelecek araştırma planımızda, kullanılan levan molekülün katyonik bir polimerle (örn; polietilenimin, spermin, spermidin vb.) modifiye edilmesi vardır. Ayrıca, siGLO Green ışması hücrelerde tespit edilse de bunun hücre içinde takibi (TEM ile hücre içi trafik çalışması) ile hangi aşamalarda ve yollardan hücre nükleusuna ulaştığı bulunmalı, transfeksiyon verimi hesabı (akış sitometrisi ile) ve gen susturma ya da gen ekspresyonu (RT-PCR ve westernblot) gibi analizler de yapılmalıdır. Bu belirtilen mantık doğrultusunda hedefli siRNA sekansları alınmış (Sense Sequence: 5'-GAAACCAACUGUUAGUGUAdTdT-3'; Anti-sense Sequence: 5'-UACACUGACAGUUGGUUCdTdT-3') ve gelecek deney planlaması yapılmaya başlanmıştır.

Referanslar

- Akturk, O. (2020). Colloidal stability and biological activity evaluation of microbial exopolysaccharide levan-capped gold nanoparticles. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 192, 111061.
- Akturk, O., Erdemli, O., Cagdas Tunalı, B. (2019). Gold nanocomposites for biomedical applications. *Materials for Biomedical Engineering: Bioactive materials, properties, and applications*. Valentina Grumezescu, Alexandru Mihai Grumezescu (eds),. Netherlands: Elsevier, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818431-8.00015-5>, 485-526.
- Akturk, O., Gün Gök, Z., Das, T. M., Erdemli, O. (2018). Synthesis and characterization of sericin-capped gold nanoparticles. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33, 675–684.
- Akturk, O., Gün Gök, Z., Erdemli, O., Yigitoglu, M. (2019). One-pot facile synthesis of silk sericin-capped gold nanoparticles by UVC radiation: Investigation of stability, biocompatibility, and antibacterial activity. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 107, 2667-2679.
- Alireza, S., Marie, S. J., Saeed, M., Hadi, R. N., Zahra, N., Sadat, H. E., Ingo, B., Javad, M. S., Heiko, L. (2019). Development and Clinical Translation of Approved Gene Therapy Products for Genetic Disorders. *Frontiers in Genetics*, 10, 868.
- Bailly, A. L., Correard, F., Popov, A., Tselikov, G., Chaspoul, F., Appay, R., Al-Kattan, A., Kabashin, A.V., Braguer, D., Esteve, M. A. (2019). In vivo evaluation of safety, biodistribution and pharmacokinetics of laser-synthesized gold nanoparticles. *Sci Rep*, 9, 12890.
- Brodeur, M. R., Brissette, L., Falstraalt, L., Luangrath, V., Moreau, R. (2008). Scavenger receptor of class B expressed by osteoblastic cells are implicated in the uptake of cholesteryl ester and estradiol from LDL and HDL3. *J Bone Miner Res*, 23, 326–37.
- Cebrián, V., Martín-Saavedra, F., Yagüe, C., Arruebo, M., Santamaría, J., Vilaboa, N. (2011). Size-dependent transfection efficiency of PEI-coated gold nanoparticles. *Acta Biomaterialia*, 7(10), 3645-3655.
- Chang, K. L., Higuchi, Y., Kawakami, S., Yamashita, F., Hashida, M. (2011). Development of lysine-histidine dendron modified chitosan for improving transfection efficiency in HEK293 cells. *J Control Release*, 156(2), 195-202.
- Chiu, Y. L., Ali, A., Chu, C. Y., Cao, H., Rana, T. M. (2004). Visualizing a correlation between siRNA localization, cellular uptake, and RNAi in living cells. *Chem. Biol.*, 11, 1165–1175.
- Ding, Y., Jiang, Z., Saha, K., Kim, C. S., Kim, S. T., Landis, R. F., Rotello, V. M. (2014). Gold Nanoparticles for Nucleic Acid Delivery. *Molecular Therapy*, 22(6), 1075-1083.
- El-Andaloussi, S., Johansson, H. J., Lundberg, P., Langel, U. (2006). Induction of splice correction by cell-penetrating peptide nucleic acids. *J. Gene Med.*, 8, 1262–1273.
- Ferreira, D., Fontinha, D., Martins, C., Pires, D., Fernandes, A. R., Baptista, P. V. (2020). Gold Nanoparticles for Vectorization of Nucleic Acids for Cancer Therapeutics. *Molecules*, 25(15), 3489.
- Gemeinhart, R. A., Luo, D., Saltzman, W. M. (2005). Cellular Fate of a Modular DNA Delivery System Mediated by Silica Nanoparticles. *Biotechnol Prog*, 21, 532–7.
- Godbey, W. T., Mikos, A. G. (2001). Recent progress in gene delivery using non-viral transfer complexes. *J Control Release*, 72, 115–25.
- Goodman, C. M., McCusker, C. D., Yilmaz, T., Rotello, V. M. (2004). Toxicity of gold nanoparticles functionalized with cationic and anionic side chains. *Bioconjugate Chem*, 15, 897–900.
- Hardee, C. L., Arévalo-Soliz, L. M., Hornstein, B. D. (2017). Advances in Non-Viral DNA Vectors for Gene Therapy. *Genes*, 8(2), 65.
- Kamaruzman, N. I., Tiash, S., Ashaie, M., Chowdhury, E. H. (2018). siRNAs Targeting Growth Factor Receptor and Anti-Apoptotic Genes Synergistically Kill Breast Cancer Cells through Inhibition of MAPK and PI-3 Kinase Pathways. *Biomedicines*, 6(3), 73.
- Khan, W., Hosseinkhani, H., Ickowicz, D., Hong, P. D., Yu, D. S., Dom, A. J. (2012). Polysaccharide gene transfection agents. *Acta Biomaterialia*, 8(12), 4224-4232.
- Kim, S. J., Baeb, P. K., Chung, B. H. (2015). Self-assembled levan nanoparticles for targeted breast cancer imaging. *Chemical Communications*, 51, 107-110.

- Koşarsoy Ağçeli, G., Cihangir, N. (2020). Nano-sized biopolymer levan: Its antimicrobial, anti-biofilm and anti-cancer effects. *Carbohydrate Research*, 494, 108068.
- Krzysztoń, R., Woschée, D., Reiser, A., Schwake, G., Strey, H. H., Rädler, J.O. (2019). Single-cell kinetics of siRNA-mediated mRNA degradation. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 21, 102077.
- Kumar, S., Diwan, A., Singh, P., Gulati, S., Choudhary, D., Mongia, A., Shuklaa, S., Gupta, A. (2019). Functionalized gold nanostructures: promising gene delivery vehicles in cancer treatment. *RSC Adv.*, 9, 23894-23907.
- Li, P., Li, D., Zhang, L., Li, G., Wang, E. (2008). Cationic lipid bilayer coated gold nanoparticles-mediated transfection of mammalian cells. *Biomaterials*, 29, 3617–24.
- Li, W., Wang, G., Liang, W., Kang, K., Guo, K., Zhang, Y. (2014). Integrin $\beta 3$ Is Required in Infection and Proliferation of Classical Swine Fever Virus. *PLoS ONE*, 9(10), e110911.
- Maciel, J. C., Andrad, P. L., Neri, D. F. M., Carvalho, Jr. L. B., Cardoso, C. A., Calazans, G. M. T., Aguiar, J. A., Silva, M. P. C. (2012). Preparation and characterization of magnetic levan particles as matrix for trypsin immobilization. *J Magn Magn Mater*, 324, 1312–1316.
- Melamed, J. R., Riley, R. S., Valcourt, D. M., Billingsley, M. M., Kreuzberger, N. L., Day, E. S. (2017). Quantification of siRNA Duplexes Bound to Gold Nanoparticle Surfaces. *Biomedical Nanotechnology. Methods in Molecular Biology*, vol 1570, Petrosko S., Day E. (eds), Humana Press, New York, NY., 1-15.
- Naharuddin, N. Z. A., Sadrolhosseini, A. R., Abu Bakar, M. H., Tamchek, N., Mahdi, M. A. (2020). Laser ablation synthesis of gold nanoparticles in tetrahydrofuran. *Opt. Mater. Express*, 10, 323-331.
- Okoampah, E., Mao, Y., Yang, S., Sun, S., Zhou, C. (2020). Gold nanoparticles–biomembrane interactions: From fundamental to simulation. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 196, 111312.
- Queiroz, E. A. I. F., Fortes, Z. B., Cunha, M. A. A., Kazak Sarilmiser, H., Dekker, A. M. B., Toksoy Öner, E., Dekker, R. F. H., Khaper, N. (2017). Levan promotes antiproliferative and pro-apoptotic effects in MCF-7 breast cancer cells mediated by oxidative stress. *International Journal of Biological Macromolecules*, 102, 565-570.
- Rao, R. C., Zacks, D. N. (2014). Cell and gene therapy, *Cell-Based Therapy for Retinal Degenerative Disease*. vol 53, Casaroli-Marano RP, Zarbin MA (eds), Dev. Ophthalmol. Basel, Karger, doi: 10.1159/000357376.
- Remant Bahadur, K. C., Landry, B., Montazeri Aliabadi, H., Lavasanifar, A., Uludag, H. (2011). Lipid substitution on low molecular weight (0.6–2.0 kDa) polyethylenimine leads to a higher zeta potential of plasmid DNA and enhances transgene expression. *Acta Biomater*, 7(5), 2209-17, 2011.
- Roesler, S., Koch, F., Schmehl, T., Weissmann, N., Seeger, W., Gessler, T., Kissel, T. (2011). Amphiphilic, low molecular weight poly(ethylene imine) derivatives with enhanced stability for efficient pulmonary gene delivery. *Gene Med*, 13, 123–33.
- Sajid, M. I., Moazzam, M., Kato, S., Cho, K. Y., Tiwari, R. K. (2020). Overcoming Barriers for siRNA Therapeutics: From Bench to Bedside. *Pharmaceuticals*, 13(10), 294.
- Schioli, D., Gómara, M. J., Maurizi, E., Atkinson, S. D., Mairs, L., Christie, K. A., Cobice, D. F., McCrudden, C. M., Nesbit, M.A., Haro, I., Moore, T. (2019). Effective In Vivo Topical Delivery of siRNA and Gene Silencing in Intact Corneal Epithelium Using a Modified Cell-Penetrating Peptide, *Molecular Therapy Nucleic Acids*. 17, 891-906.
- Sezer, A. D., Kazak, H., Toksoy Öner, E., Akbuğa, J. (2011). Levan-based nanocarrier system for peptide and protein drug delivery: Optimization and influence of experimental parameters on the nanoparticle characteristics. *Carbohydrate Polymers*, 84(1), 358-363.
- Sezer, A. D., Kazak Sarılmışer, H., Rayaman, E., Çevikbaş, A., Toksoy Öner, E., Akbuğa, J. (2017). Development and characterization of vancomycin-loaded levan-based microparticulate system for drug delivery. *Pharm Dev Technol*, 22(5), 627-634.
- Shukla, R., Bansal, V., Chaudhary, M., Basu, A., Bhonde, R. R., Sastry, M. (2005). Biocompatibility of gold nanoparticles and their endocytotic fate inside the cellular compartment: a microscopic overview. *Langmuir*, 21, 10644–54.
- Srikanth, R., Sundhar Reddy C. H. S. S., Siddhartha, G., Ramaiah, M. J., Uppuluri, K. B. (2015). Review on production, characterization and applications of microbial levan. *Carbohydrate Polymers*, 120, 102-114.

- Sylvestre, J. P., Poulin, S., Kabashin, A. V., Sacher, E., Meunier, M., Luong, J. H. T. (2004). Surface chemistry of gold nanoparticles produced by laser ablation in aqueous media. *J. Phys. Chem. B*, 108, 16864–16869.
- Uboldi, C., Bonacchi, D., Lorenzi, G., Hermanns, M. I., Pohl, C., Baldi, G., Unger, R. E., Kirkpatrick, C. J. (2009). Gold nanoparticles induce cytotoxicity in the alveolar type-II cell lines A549 and NCIH441. *Particle and Fibre Toxicology*, 6, 18–30.
- van Asbeck A. H., Beyerle, A., McNeill, H., Bovee-Geurts, P. H., Lindberg, S., Verdurmen, W. P., Hällbrink, M., Langel, U., Heidenreich, O., Brock, R. (2013). Molecular parameters of siRNA-cell penetrating peptide nanocomplexes for efficient cellular delivery. *ACS Nano*, 7, 3797-3807.
- Xue, H. Y., Liu, S., Wong, H. L. (2014). Nanotoxicity: a key obstacle to clinical translation of siRNA-based nanomedicine. *Nanomedicine*, 9(2), 295-312.



Tüketici Fiyat Endeksi (TÜFE) Hesaplamasında Yapay Zekâ Kullanan Çalışmalarının İncelenmesi

Investigation of Studies Using Artificial Intelligence in Calculating Consumer Price Index (CPI)

Abdulcebar On*¹, Necaattin Barışçı¹

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 06560, Ankara, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 11/11/2021

Kabul / Accepted: 30/01/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Tüketici Fiyat Endeksi (TÜFE), hanehalklarının tüketimine yönelik mal ve hizmet fiyatlarının zaman içindeki değişimini ölçen bir yöntemdir. Bu çalışmada yapay zeka alanında TÜFE ile ilgili yapılan birbirinden bağımsız birçok çalışma araştırılmıştır. Yapılan literatür taraması neticesinde TÜFE hesaplanmasındaki yapay zeka kullanımı “verilerin toplanma ve işleme” ile “ürünlerin sınıflandırılması” olmak üzere iki süreçte olduğu bilgisine ulaşılmıştır. Verilerin toplanma ve işleme sürecinde resmi istatistik ofisleri tarafından anket aracılığıyla veri toplama işlemine alternatif yöntem çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bunun için çevrimiçi alışveriş sitelerindeki ürün bilgileri ve fiyatları web tarama tekniği gibi yöntemler kullanılarak derlenmiştir. Ürünlerin sınıflandırılması sürecinde ise çeşitli yöntemlerle firmalardan dijital ortamda alınan ürün bilgilerinin TÜFE kapsamındaki kullanılan sınıflandırma yöntemleri ile eşleşmesi için çeşitli makine öğrenme yöntemleri kullanılmıştır. Bunun için metin tabanlı verileri dijitalleştirmek için doğal dil işleme yöntemleri uygulanmıştır. Sonuç olarak bu çalışma ile TÜFE kapsamında yapay zeka kullanan çalışmalar tek bir çatı altında toplanarak yeni alternatif hesaplama yöntemleri için öngörü oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler

web tarama, ürün eşleştirme, yapay zeka, makine öğrenme, doğal dil işleme, tüfe, bilgi çıkarımı

Abstract

The Consumer Price Index (CPI) is a method that measures the change in the prices of goods and services for household consumption over time. In this study, many independent studies on CPI in the field of artificial intelligence were investigated. As a result of the literature review, it was learned that the use of artificial intelligence in the calculation of CPI is in two processes: "collection and processing of data" and "classification of products". During the data collection and processing process, alternative method studies were carried out by the official statistics offices to the data collection process by means of questionnaires. For this purpose, product information and prices on online shopping sites have been compiled using methods such as web crawling technique. In the process of classification of products, various machine learning methods were used to match the product information obtained from companies in digital environment with the classification methods used within the scope of CPI. For this, natural language processing methods have been applied to digitize text bases data. As a result, with this study, studies using artificial intelligence within the scope of CPI were gathered under a single roof and a prediction was created for new alternative calculation methods.

Key Words

web crawling, product matching, artificial intelligence, machine learning, natural language processing, cpi, information extraction

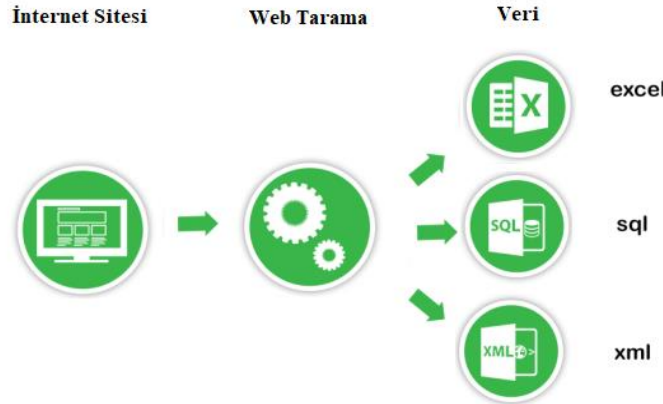
1. Giriş

Enflasyon fiyatlar genel düzeyinin etkili bir şekilde devamlı yükselmesi nedeniyle paranın sürekli olarak değer kaybetmesi, bunun sonucu olarak da tüketicilerin satın alma gücünü yitirmesidir. Enflasyon ölçümlerinden bir olan Tüketici Fiyat Endeksi (TÜFE), belirli bir referans döneminde bireylerin ortalama tüketimlerini yansıtan bir mal ve hizmet sepetinin zaman içinde fiyat değişimini gösteren bir endekstir. Bu endeks sepetinde yer alan mal ve hizmetlerin miktar ve kalite değişimleri göz önüne alınarak endeksin sadece fiyat hareketlerini yansıtmayı sağlamaktadır. Perakende fiyat değişimleri ve bu fiyat değişimlerinden bireylerin nasıl etkilendikleri ile ilgili enflasyon oranı, TÜFE değişim oranıdır.

TÜFE hesaplanması için öncelikle hangi ürünlerin fiyatlarının takip edileceği belirlenmektedir. Bunun için resmi istatistik ofisleri tarafından uygulanan hanehalkı bütçe anketlerinde, hanehalklarının referans ayında yaptıkları gıda, giyim, sağlık, ulaştırma, konut, ev eşyası ve benzeri konulardaki bütün tüketim harcamalarına ilişkin sorular sorulmaktadır. Hanehalkının yaptıkları tüketim harcamalarını günlük olarak kayıt ettiği “Hanehalkı Harcama Kayıt Defteri” ve hanede bulunan 15 yaşından büyük fertlerin bireysel harcamalarını kaydettikleri “Ferdî Harcama Kayıt Defteri” bilgileri ilgili ay içerisinde düzenli olarak anketörler tarafından toplanmaktadır. Toplanan bu bilgiler ile TÜFE kapsamına alınacak ürünler belirlenmektedir (TÜİK, 2003). 2019 yılı itibarıyla TÜFE madde sepeti 12 ana kategoriden oluşan amaca yönelik tüketim ürün gruplarına göre gerçekleştirilmektedir (United Nations et al. 2018). Bu ana kategoriler 418 alt gruba ayrılmaktadır (TÜFE, 2019).

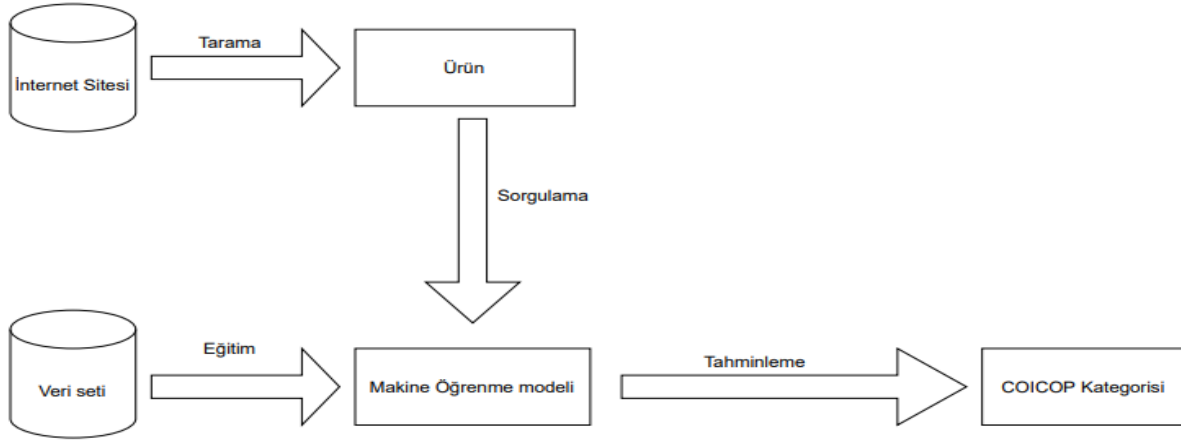
TÜFE kapsamına giren ürünler belirlendikten sonra ürünlerdeki fiyat dalgalanmasına göre fiyatlar aylık ya da haftalık şekilde anketörler aracılığıyla toplanmaktadır. İş yerlerine gidilerek tek tek fiyat alınarak yapılan bu yöntem yerine bazı ülkelerde istatistik ofisleri tarafından alternatif yollar denenmiştir. Örneğin günümüzde çevrimiçi sitelerdeki fiyatları kullanmaya yarayan web tarama yöntemi kullanılarak ürün fiyat bilgilerinin toplanabilmesi mümkün hale gelmiştir (Polzonetti&Re&Vaccari, 2013).

Web tarama, çevrimiçi sitelerde bulunan Hiper Metin İşaretleme Dili (Hyper Text Markup Language - HTML) kodunu ayrıştırma işlemidir. Bu kod web sayfasındaki bilgileri düzenli olarak gösterilmesini sağlar. Kodda yerleşim olarak kullanılan kısımlarda, her çevrimiçi site kendi standardına uygun olacak şekilde HTML içerisinde bir stil veya tanım kullanmaktadır. Ürün bilgileri bu kod kısımlarından elde edilmektedir. Geliştirilecek uygulamada tanımlanmış bir kural ile söz konusu kod kısımları kullanılarak web sayfasında bulunan tüm sayfaların taranmasıyla verilerin elde edilmesi sağlanmaktadır (Christopher&Najork, 2010; Cavallo, 2013). Elde edilen veriler yüksek boyutta, çeşitli ve karmaşıktır. Çünkü çevrimiçi sitelerde sunulan ürünler standart bir yapıda değildir. Bu verilerin TÜFE'ye uygun hale gelebilmesi için makine öğrenme, yapay zeka ve doğal dil işleme yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Aksi durumda manuel işlemlerle çok yüksek insan işgücüne ve zamana ihtiyaç duyulur (Breton vd., 2016; Chuanyang vd., 2016).



Şekil 1. Web Tarama Yöntemi ile Verilerin Toplanması

TÜFE kapsamında derlenen fiyat verileri anketörler tarafından doğrudan sahadan toplanırken her ürüne ait bir kod bulunmakta ve ilgili ürünün kodu anketör tarafından sisteme girilmektedir. Ancak doğrudan veri toplama yerine çeşitli yapay zeka yöntemleri kullanarak web tarama ya da firmalardan çekilen verilerdeki ürün bilgileri ile TÜFE kapsamındaki ürün kodları örtüşmemektedir. Bunun için ürün bilgilerinin TÜFE kapsamındaki hangi koda ait olduğunu belirlemek için yapay zeka kullanılarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2. Ürün Bilgilerinin Makine Öğrenme Yöntemi ile Tahmin Edilmesi

Bu makalenin devamında Bölüm 2’de veri toplama ve işleme sürecinde kullanılan yapay zeka çalışmaları ele alınmıştır. Bölüm 3’de ise elde edilen ürün bilgilerinin yapay zeka kullanılarak sınıflandırılması ile ilgili yapılmış çalışmalar incelenmiştir.

2. Veri Toplama ve İşleme Sürecinde Yapay Zeka Kullanan Çalışmalar

Bu bölümde TÜFE hesaplamasının veri toplama ve işleme sürecinde yapay zeka kullanan çalışmalar ele alınmıştır. Firmalar tarafından tutulan fiyat verileri, çevrimiçi alışveriş siteleri gibi internet ortamında erişilebilen veriler son yıllarda arttığı için kaynakların büyük çoğunluğu yakın zamana aittir.

Cavallo tarafından yapılan bir çalışmada web tarama verileri enflasyon ölçümü için ele alınmıştır. Veriler Ekim 2007’den Mart 2011’e kadar MIT (Massachusetts Institute of Technology) ’deki The Billion Prices Project (BPP) ile toplanmıştır (Cavallo&Rigobon, 2016). Toplanan veriler 6 süpermarket’in çevrimiçi sitelerinde sunduğu ürünlerden oluşmaktadır. Ürünler için, fiyat verisi, ürün kimlikleri ve bir kategori göstergesi bilgilerini içeren veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti kullanılarak çevrimiçi TÜFE hesaplanmıştır. Bu çalışmada ele alınan metodoloji 5 ülke için uygulanmıştır. Ülkelerin çevrimiçi süpermarket pazar payı hesaplanmış ve bu bilgiler ile ülkelerin aylık ve yıllık enflasyonları çevrimiçi TÜFE ile karşılaştırılmıştır. Regresyon analizi yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlara göre Arjantin hariç diğer ülkelerin web tarama TÜFE’si ile resmi TÜFE’si arasında çok yakın benzerlikler olduğu ortaya çıkarılmıştır (Polzonetti vd., 2013).

Hang ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada kullanıcıların web ortamında aramalar için kullandığı anahtar kelimelerin enflasyon endeksiyle ilişkilendirilmesi üzerine bir model geliştirmişlerdir. Anahtar kelime seçimi TÜFE ilgili terimlerden seçilmiştir. Tekrarlanan kelimeler kaldırıldıktan sonra 140 dan fazla anahtar kelime elde edilmiştir. Her anahtar kelimenin Pearson korelasyon katsayısı hesaplanmış ve Ulusal İstatistik Bürosundan TÜFE hesaplanarak, aralarındaki korelasyon test edilmiştir. Ortalama kişi korelasyon katsayısının 0.6’nın üzerinde olduğu 21 anahtar kelime seçilmiştir. Bu anahtar kelimeler ekonomik etkilerine göre arz ve talep kategorilerine ayrılmıştır. İlişkili olmayan anahtar kelimeler silinip granger testi yapılarak 4 farklı kategori oluşturulmuştur. Kategoriler; önde gelen, tutarlı, zaman gecikmeli ve ilişkisiz anahtar kelimeler olarak oluşturulmuştur. Anahtar kelimeler için Dickey-Fuller test yöntemi uygulanmıştır. Ayrıca bütünlük testi uygulanmıştır. Bunun için 8 anahtar kelime silinip diğer 13 anahtar kelime ile birlikte Johansen-Juselis bütünlük testi yapılmıştır. Bu çalışmada SPSS istatistiksel yazılımının kullanımı ile her bir anahtar kelimenin ağırlık oranına daha iyi bir çözüm sağlayan ve önde gelen bir enflasyon endeksini oluşturmak için temel bir bileşen analizi benimsenmiştir (Hang vd., 2013).

Yuan ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada haber sitelerinde bulunan makale bilgileri kullanılarak TÜFE için tahmin modeli oluşturulmuştur. Ekonometrik veriler için Otoresif Entegre Hareketli Ortalama (Autoregressive Integrated Moving Average - ARIMA) modeli, taranmış makale bilgileri için Geri Yayımlı Sinir Ağları (Backpropagation Neural networks - BNN) yöntemi kullanılmıştır. Bu iki yöntem kullanılarak hibrit bir model oluşturulmuştur. Haber bilgileri verileri Çin’de en çok ziyaret edilen haber sitelerinden biri olan sina.com.cn adresinden alınmıştır. Elde edilen bulgular ile haber bilgilerinin TÜFE tahminine çok yakın değerde olduğu gösterilmiştir (Yuan vd., 2013).

Hollanda İstatistik Ofisi Metodoloji departmanında Griffioen ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada web tarama ile giyim kategorisi için TÜFE hesaplanmasını yapan bir proje geliştirilmiştir. Çalışmanın amacı, giyim fiyat endekslerini tahmin etmek için farklı yaklaşımları karşılaştırmak ya da tercih edilen bazı yöntemleri önermemektir. Web tarama ile elde edilen ürünlerden tekrarlı olanlar zamanla tespit edilip kaldırılmıştır. Ayrıca aynı internet adresinden erişim sağlayan farklı ürünler de tespit edilip endekse olan etkileri azaltılmıştır. Çevrimiçi verilerin TÜFE için araştırılmasına yönelik çalışmaların bir parçası olarak, giyim için standart bir

sınıflandırma sistemi geliştirilmiştir. Bu sınıflandırma sistemi kadınlar, erkekler, çocuklar ve bebek kıyafetleri gibi dört kategoriye ayrılmıştır. Sınıflandırma için ürünlerin kısa açıklamalarından faydalanılmıştır. Uzun açıklamalar sınıflandırmayı daha da kolaylaştırmıştır. Sınıflandırma işlemi web tarama ile elde edilen ürünlerin kategori bilgileriyle sağlanmıştır. Sınıflandırma başarısı yüzde 98 gibi bir doğruluk oranıyla gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırma yapıldıktan sonra her ürün kategorisi için endeksler hesaplanmıştır. Web tarama ile satış miktarı elde edilemediği için ürün ağırlıklandırılması yapılmamıştır. Bu yüzden bir sınıflandırma için ortalama fiyat kullanılmıştır. Fiyatlar günlük olarak gözlemlendiğinden, bir ay içinde daha sık gözlenen öğelerin aylık ortalama fiyatları diğer öğelere göre daha fazla ağırlık kazanmıştır. Giyim kategorisi için en önemli sorunun çevrimiçi satılan ürünün iade edilme durumunun ortaya çıkması olduğu bilgisine ulaşılmıştır. Bu da endekse etki eden durumlardan bir tanesidir (Griffioen vd., 2014).

Büyük verinin ürün fiyatları istatistikleri üzerindeki etkisini araştıran bir çalışmada büyük veri yönteminin istatistik ofisleri için anlık olarak fiyat yükselişlerindeki değişimleri bildirebilecek bir potansiyeli olduğu araştırılmıştır. Veriler 3 farklı yöntemle elde edilmiştir. Bunlar marketlerden alınan veriler, web tarama ile elde edilen veriler ve mobil uygulama verileridir. Örnek bulgular için Brezilya ürün fiyatları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile büyük veri TÜFE'si ile Brezilya resmi TÜFE'si karşılaştırılmıştır (Dubey& Gennari, 2014).

D. P. Manik ve Albarda tarafından yapılan bir çalışmada büyük veri kapsamında web tarama verisi kullanılarak TÜFE hesabının günlük düzeye indirgenmesi hedeflemiştir. Bunun için web tarama yöntemi kullanılarak marketlerin çevrimiçi alışveriş sitelerinden günlük ürün fiyatları elde edilmiştir. Günlük TÜFE hesaplama akışı; çevrimiçi marketleri belirleme, web tarama gerçekleştirme, veri ayrıştırma, kayıt gerçekleştirme, TÜFE hesaplama ve veri görselleştirme aşamalarından oluşmuştur. Bu çalışmada 3 farklı veri toplama yöntemi kullanılmıştır; marketlerden veri toplanması, web tarama ve mobil uygulama verileri. Bu yöntemler ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır ve web tarama yönteminin avantajları sunulmuştur. Bu çalışmada web tarama yönteminin veri toplama maliyetini azalttığı, verilerin TÜFE için günlük düzeyde hesaplanabildiği, veri çeşitliliğinin fazla olduğu ve detaylı veri özelliklerinin olduğu gösterilmiştir (Manik, 2015).

Swier yaptığı bir çalışmada web tarama ile çevrimiçi 3 marketten ürün bilgilerini toplamıştır. Bu çalışma ile elde ettiği sonuçların İngiltere İstatistik Ofisi için enflasyon ölçümünde etkili bir yöntem olabileceğini göstermiştir. Web tarama yönteminin maliyeti azalttığı, veri kapsamını genişlettiği, güncelleme sıklığını artırdığını ve yeni endeksler için araştırma sağladığı vb. avantajlarından bahsedilmiştir. TÜFE sepetinde bulunan 35 ürün kategorisi için ortalama 6500 fiyat teklifi toplanmıştır. Toplamda 424011 ürün verisi üzerinde işlemler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ürünler 'Munging' yöntemi kullanılarak sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma işlemi TÜFE sepetinde bulunan ürün kategorilerine göre gerçekleştirilmiştir (Swier, 2015).

Norveç İstatistik Ofisi TÜFE'deki çevrimiçi fiyatların payının artırılması ve etkin çevrimiçi veri toplama çalışmalarının artırılması için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Norveç'te çevrimiçi en çok satış işlemi gerçekleşen kategorilerin tatil ve eğlence amaçlı seyahatler olduğu bilgisine ulaşılmıştır. Bu da çevrimiçi satışların toplam yüzde 44'üne denktir. Yabancı sitelerden alınan ürün oranı ise yüzde 23'üne denk gelmektedir. Satın alınan ürünlerin yaklaşık yüzde 50'si düşük fiyatlı ürünlerdir (23 Euro'dan düşük). Bu çalışmada web tarama işlemi import.io web uygulamasıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca özel yazılımlar da kullanılmıştır. Başlangıç için, kişisel bakım ürünleri ve ev elektroniği gibi çevrimiçi satın almaların yüksek bir kısmını temsil eden tüketici grupları seçilmiştir. Test hesaplamaları yapmak için İstatistiksel Analitik Sistem (Statistical Analysis System -SAS) programında tam ürün kapsamına sahip olan gıda ve alkolüz içeceklerin endeksinde kullanılan tarayıcı veri üretim sistemini büyük oranda kopyalayan bir üretim sistemi kurulmuştur (Nygaard, 2015).

İtalya İstatistik Ofisi'nde (ISTAT) yapılan bir çalışmada elektronik eşya ve uçak biletleri fiyatlarının web tarama ile elde edilmesini ve bu veriler ile TÜFE'nin hesaplanması hedeflenmiştir. Test işlemleri veri toplama sürecinde ISTAT tarafından (%21'den fazla ürün ile) yapılmış ve internet üzerinden gerçekleştirilen İtalyan tüketici fiyat anketi kapsamında yapılmıştır. 21 gün içerisinde hesaplanan resmi anket verileri web tarama ile 16 güne indirilebilmiştir. Ancak çoğu çevrimiçi site web tarama için engel koyduğundan sınırlı sayıda bilet fiyatları alınabilmiştir. İstat, engel koyulan siteler ile hukuki bir anlaşma yaparak ürün kapsamını genişletmiştir (Polidoro vd., 2015).

Barcaroli ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada istatistik ofislerine yönelik olarak web tarama yönteminin daha etkin kullanabilmeleri için bir strateji geliştirmişlerdir. Bu çalışmanın amacı işletmelerin kullandığı internet adres bilgilerinin doğruluklarının teyit edilmesi ve internet sayfasında bulunan verilerin sağlıklı bir şekilde elde edilmesidir (Barcaroli vd, 2015).

Bu çalışmada Java ile bir uygulama geliştirilmiştir. Uygulamada web tarama modülü geliştirilmiş ve 20000 e yakın işletmenin (çevrimiçi marketler de mevcut) internet sayfaları adres bilgileri kullanılmıştır. Makine öğrenme teknikleri kullanılarak işletmelerin internet adreslerinin doğrulukları test edilmiştir. İnternet adres bilgilerinin doğrulukları için yapay sinir ağları, Rastgele Orman (Random Forest – RF) ve Logistic Regresyon (LR) yöntemleri kullanılmıştır. RF yöntemi ile yüzde 82 doğruluk oranı elde edilmiştir (Barcaroli vd., 2016).

İngiltere İstatistik Ofisi tarafından yapılan bir çalışmada web tarama yöntemi ile TÜFE sepetinde bulunan 520 tane ürün kategorisi için ürün bilgileri elde edilmiştir. İngiltere'de gıda pazarının yüzde 50'sine denk gelen üç çevrimiçi market zincirinden web tarama

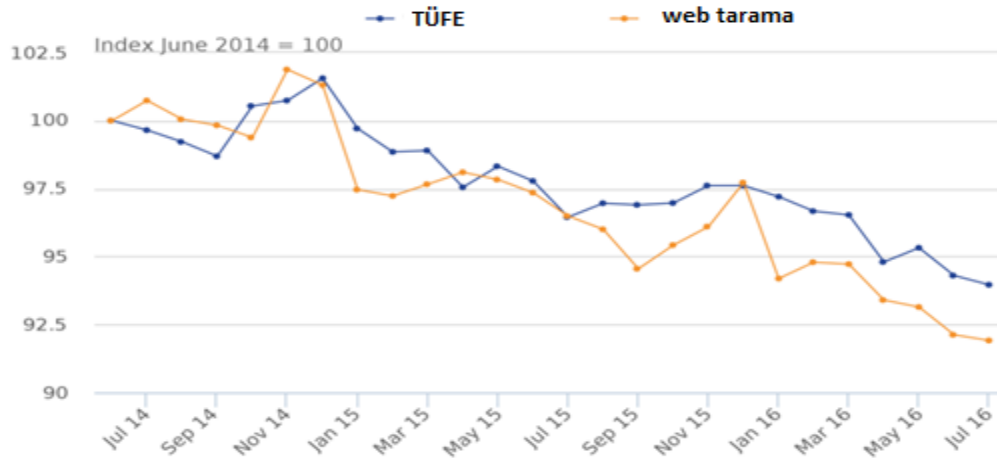
yöntemi ile ürün bilgileri toplanmıştır. Web tarama Python kütüphanesinde bulunan Scrapy ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Web tarama, TÜFE ögesi açıklamasına uyan uygun ürünleri tanımlamak için web sitelerinin kendi sınıflandırma yapısını kullanmıştır. 33 TÜFE sınıflandırması için günde yaklaşık 150.000 fiyat toplanmıştır. Bu da her bir sınıf için yaklaşık 5000 farklı ürün fiyatı tekabül etmiştir. Elde edilen ürünlerin sınıflandırılması aşamasında TÜFE sınıflandırma yapısına uygunluğu için fiyatların toplanabileceği temsili ögeler seçilmiştir. Bu aşamada denetlenen makine öğrenme yöntemlerinden Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine - SVM) tekniği kullanılarak ürünlerin sınıflandırılması hedeflenmiştir. Bu çalışmada kullanılan sınıflandırma sistemine en yakın market ürün kategorileri seçilmiştir. Bu kategoriler SVM’de veri seti olarak kullanılmıştır. Verilerin yüzde 80’i eğitim yüzde 20’si test verileri için kullanılmıştır. Bu eğitim verilerini oluşturmak için toplanmış ürünlerin TÜFE madde endekslerinin her biri için uzman fiyat toplayıcılarına binlerce örnek verilmiştir. SVM ile sınıflandırma eğitimi tamamlandıktan sonra hatalı sınıflandırılmış veriler için denetlenmeyen makine öğrenme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile sınıflandırması yapılan ürünlerin fiyat uyumsuzlukları tespit edilmiştir. Bu işlemlerden sonra SVM yöntemi ile yüzde 85 ile sonuç alınmıştır (Chuanyang vd., 2016).

Cavallo ve Rigobon yaptıkları bir çalışmada TÜFE’den başlayarak geleneksel ekonomik göstergelerin hesaplamasını iyileştirmek için yeni bilgi kaynaklarının kullanılmasını hedeflemişler. Web tarama için kullanılacak çevrimiçi marketler özenle seçilmiştir. Bu marketler hem çevrimiçi hem de çevrimdışı satışlar yapabilmektedir. Ayrıca TÜFE sepetinde bulunabilecek ürünlerin kategorileri baz alınarak çalışmalara devam edilmiştir. Daha sonra, çevrimiçi fiyat endekslerini hesaplamak ve çoğu ülkedeki tüketici fiyatları endeksleriyle nasıl birlikte hareket ettiğini göstermek için kullanılan metodoloji tanımlanmıştır. Çevrimiçi fiyatların, resmi fiyat endeksleri için ve tarayıcı fiyatları için toplanan fiyatlara kıyasla çok farklı fiyat değişiklikleri sergilediği gösterilmiştir. Veriler toplandıktan sonra veri temizleme aşamasına geçilmiştir. Sonra ürünler ortak bir veritabanında TÜFE kategorilerine uyacak şekilde sınıflandırılmıştır. Zaman içinde ürün özellikleri ve performanslarını gözlemlemek için göstergeler hesaplanmıştır. Bir çevrimiçi market endekse dahil edilmeden önce 1 yıl boyunca verileri izlenmiştir. Yaklaşık 25 ülke için veri seti, TÜFE sepetinin en az yüzde 70’ini kapsayan kategorilerden oluşmaktadır. Bu çalışmada hedonik(kalite ayarlama) teknikler de ele alınmıştır. İki mal bir süredir birlikte mevcutsa, üst üste gelen fiyatlar, kalite değişikliği tahminini elde etmek için kullanılabilir. Uygulamada bu yaklaşımın, yeni ürün çeşidinin piyasaya sürülmesindeki fiyat aralığının daha çok kalite farkını yansıttığını varsaymaya eğilimli olduğu sonucuna varılmıştır (Cavallo&Rigobon, 2016).

Gabrielli ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada veri toplama maliyetlerinin ve endeksin gerçek zamanlı olarak kullanılabilirliğinin azaltılması amacıyla TÜFE hesaplanması için perakende veri piyasası verileriyle büyük veri yöntemini kullanmışlardır. Endeks için kullanılan büyük veri seti, süpermarket zinciri Coop’un kullanıcılarına ait tüm işlemlerden oluşan verilerdir. Bu veri kümesindeki her kayıt, satın alma tarihi, işlem numarası, ürün numarası, satın alınan öğelerin sayısı, öge fiyatı hakkında bilgiler içermektedir. Test işlemleri için 2011 ve 2012’nin ilk çeyreğine karşılık gelen veriler kullanılmıştır. Veri kümesi 56 milyon işlemten oluşmaktadır (ortalama 80 milyon ürün için). Coop ürünleri resmi TÜFE’ye uygun olarak sınıflandırılmıştır. Ürün fiyatları birim üzerinden hesaplanmış ve TÜFE sepeti ağırlıklandırılması için her kategorinin satın alma sıklığı hesaplanmıştır (Gabrielli vd., 2016).

Avusturya İstatistik Ofisi web tarama ile TÜFE hesaplamasını hedeflemektedir. Web tarama için en önemli hedef kategoriler, nakliye(örneğin uçak bileti, tren biletleri, tatil paketi turları), teknik ekipman, giysi ve oteller olmuştur. Giyim haricinde, bu kategoriler esas olarak merkezi fiyat toplama ile karşılanmaktadır. Anlık olarak, Avusturya’daki TÜFE sepetinin yaklaşık %10’u web tarama ile sağlanabilmektedir. Bu çalışma, TÜFE derlemesi için tarayıcı ve web tarama verileri kullanılırken ortaya çıkan zorlukları göstermiştir. Web tarama için import.io sitesi kullanılmıştır (Auer& Boettcher, 2016).

Metcalfe ve diğerleri İngiltere İstatistik Ofisinde yaptıkları bir çalışmada web tarama ile elde edilen verilerin ürün fiyatları endeksleri için veri kümelenmesini sağlayan bir model geliştirmişlerdir. Bu model benzer ürün gruplarının oluşturulmasını ve bu grupların zaman içindeki fiyat değişimlerinin izlenmesini sağlamaktadır. Bu modeli bir tüketicinin belirli bir üründen ziyade belirli ürün türlerini satın alma eğilimi teorisine dayanmaktadır. Benzer ürün gruplarını bir araya getirmek için denetlenmeyen bir makine öğrenme yaklaşımlarından Mean-Shift algoritması kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda web tarama ile hesaplanan TÜFE ile resmi hesaplanan TÜFE arasındaki ilişkiye ait nicel bir bulgu açıklanmamıştır. Ancak iki endeks arasındaki ilişkiye ait şekil 3’de gösterilen grafik sunulmuştur. Grafikten de anlaşılacağı üzere iki endeks arasında anlamlı bir ilişki saptanmıştır (Metcalfe vd., 2016).



Şekil 3. Web Tarama ile Hesaplanan TÜFE ile Resmi Yayınlanan TÜFE Arasındaki İlişki

Thakur ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada Geri Yayımlı Çok Katmanlı İleri Beslemeli Sinir Ağı (Multilayer Feedforward Neural Network - MLFFN) yöntemi kullanarak Hindistan için enflasyonu tahmin eden bir model geliştirmişlerdir. Hindistan için 2000 ve 2012 yılları arasındaki geçmişteki veriler incelenmiştir. Sinir ağı için kullanılan girdi değerleri gayri safi yurt içi hasıla, faiz oranları, ithalat ve ihracat bilgileri, altın ve petrol fiyatları, cari açık bilgileri ve uluslararası rezervler bilgileri olmuştur. Matlab ortamında verilerin yüzde 70'i eğitim, yüzde 15'i test ve yüzde 15'i de doğrulama için kullanılmıştır. Bu çalışmada oluşturulan enflasyon tahmin modeli ile gerçek enflasyonu arasında 2014 yılı için yüzde 6,37 fark oluşmuştur (Thakur vd., 2016).

Griffioen ve diğerleri Hollanda İstatistik ofisinde yaptıkları bir araştırmada web tarama verilerinin TÜFE için bir kaynak olabileceğini göstermişlerdir. 16 web tarama robotu ile 19 çevrimiçi siteden giyim ürünleri toplanmıştır. Çalışmaya göre giyim kategorisi daha homojen bir yapıya sahip olduğu için ürün sınıflandırılması manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Ancak çalışmanın sonraki aşamalarında makine öğrenme teknikleri kullanılarak ürün sınıflandırılması hedeflenmiştir (Griffioen vd., 2016).

Avrupa İstatistik Ofisi tarafından 2016 yılında ESSNet Big Data projesi oluşturulmuştur. Bu projenin amacı büyük veri kaynaklarının resmi istatistiklerin üretilmesine katkı sağlamasıdır. Proje kapsamında TÜFE için kullanılacak veri kaynaklarına web tarama verilerinin eklenmesi hedeflenmiştir (Struijs vd., 2017).

Nugroho ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada büyük veri ve bulut teknolojisi yöntemlerini kullanarak günlük TÜFE tahmin modelinin geliştirilmesine yönelik bir araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada bulut teknolojisi kullanılarak Destek Vektör Regresyonu (Support Vektör Regression - SVR) ve Rastgele Orman Regresyonu (Random Forest Regression - RFR) yöntemleri ile günlük TÜFE tahmini modeli geliştirilmesi hedeflenmiştir. Sonuçların doğruluğunu artırmak için GridSearch ve Random yöntemlerinden faydalanılmıştır. Ürün bilgileri 2012-2016 yılları arasında web tarama yöntemi ile çevrimiçi sitelerden toplanmıştır. Verilerin yüzde 70'i eğitim yüzde 30'u test için kullanılarak TÜFE tahmini için bir sistem oluşturulmuştur. Geliştirilen sistem kişisel bilgisayar ortamında 837 saniyede gerçekleşirken bulut ortamında 522 saniye iken gerçekleşmiştir. Bu çalışmada TÜFE hesabının kişisel bilgisayar ve bulut teknolojisine aktarıldığındaki performans karşılaştırması üzerinde de durulmuştur. Bu çalışma ile SVR'nin aylık tahminde 0.3454, günlük tahminlerde 0.0095 daha az hata oranına sahip olduğu gösterilmiştir. RFR yöntemi için sonuçlar günlük tahmin değeri için 0.0171 hata oranında olmuştur (Nugroho vd., 2017).

Powell ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada kategori düzeyinde ayrıştırılmış TÜFE'yi resmi anketlerle karşılaştırarak gizli enflasyon durumunu ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışmanın amacı bir ürünün piyasaya sürülmeden önce ait olduğu TÜFE kategorisinin durumunu tahmin etmeye yardımcı olmaktadır. Zamanla web tarama ile toplanan ürünler ile en iyi anket verileriyle birleştirildiğinde, daha sık ara dönem toplam TÜFE tahmini elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmanın ikincil amacı yayınlanan TÜFE için öngörüler üretmektir; böylece ilgili taraflar için resmi enflasyon istatistiklerinin açıklanmasından önce, tahminleri değerlendirebilir hale gelmesi sağlanmıştır. BPP çalışmalarını temel alan bu çalışma, enflasyon için tahmin aralıkları üretilmesine ve modele uygun parametrelerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Parametreler için Ampirik Bayes tahminlerini hesaplamak için log-posterior yoğunluğun sayısal optimizasyonu, R programlama dilinde uygulanan Nelder-Meadsimpleks yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tahmin öncesinde model uyumunun bir yan ürünü olarak, bu çalışmadaki metodoloji aynı zamanda farklı ürünlerin fiyat değişkenliğini kodlayan hiperparametreler için tahminler üretmiştir. Bu çalışmada web tarama ürünlerinin fiyat endeksi yüksek olduğu için anketlerin ötesine geçebileceği ancak web tarama ile elde edilmiş ürünlerin kullanılması durumunda riskler olabileceği belirtilmiştir. Çünkü bu çalışmada parekendecilerin TÜFE'yi etkilemek üzere çevrimiçi fiyatlar üzerinde manipülasyon yaptıklarından bahsedilmiştir (Powell vd., 2018).

Sutiawan ve Nugraha yaptıkları bir çalışmada tüketim malları (TÜFE emtia) için çevrimiçi fiyat tahmini sistemi geliştirmişlerdir. Hypermart ve Alfacart çevrimiçi marketlerden web tarama ile veri toplanmıştır. Web tarama ile elde edilen veriler Weka ile geliştirilmiş bir tahmin modeline sunulmuştur. Tahmin için önceden veri setleri hazır hale getirilmiştir. Veritabanına kayıt edilen ürünlerin ortalama fiyatı veri kapsamını oluşturmaktadır. Tahmin modeli için yapay sinir ağlarından Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi Layer Perceptron - MLP) yöntemi kullanılmıştır. Uygulama için kullanılan alt yapı teknolojileri PHP programlama dili ve Yii Framework 2.0 ve Mysql veritabanıdır. Bu araştırmadaki kullanıcı yanıtları, Endonezya İstatistik Ofisi çalışanlarından elde edilmiştir. Toplam 33 katılımcı anketleri doldurmuştur. Kullanıcılardan veri toplandıktan sonra, istatistiksel test olarak tanımlayıcı ve regresyon analizi kullanılmıştır. Ankete katılanların %83,34'ünün bu sistemin geçerli bir karar destek sistemi olabileceği gösterilmiştir (Sutiawan&Nugraha, 2017).

Aparicio ve Bertolotto yaptıkları bir çalışmada çevrimiçi marketlerden toplanan fiyatların önceki ürün fiyatlarına göre TÜFE'nin gelecekteki seviyesini tahmin etmede daha etkili araçlar olduğunu araştırmıştır. Bir ay öncesinde TÜFE enflasyon oranını tahmin edip ardından iki ve üç aylık önde tahminler hesaplanmıştır. Bu tahminler Bloomberg tahmincilerine göre daha başarılı sonuçlar ortaya çıkarmıştır. MIT'deki BPP'den ayrılan özel bir şirket olan PriceStats tarafından sağlanan çevrimiçi endeks verileri kullanılmıştır. Resmi TÜFE'ye öncesinde yol göstericilik yapan çevrimiçi endeksler oluşturulmuş ve bu endeksleri oluşturan bir model geliştirilmiştir (Aparicio&Bertolotto, 2020).

Huang ve diğerleri yaptıkları bir makale araştırmasında büyük veri kapsamında web tarama verilerinin TÜFE için alternatif bir kaynak olabileceğini ifade etmişlerdir. Web tarama ile toplanan verilerin TÜFE için belirlenen bazı ana kategorileri sağlayabileceğini savunmuşlardır. Bu çalışmada herhangi bir nicel sonuca ulaşılmamış olup genel perspektiften önerilerden bahsedilmiştir (Huang vd., 2017).

Yeni Zelanda İstatistik Ofisi tarafından yapılan bir araştırmada büyük veri modelleri kullanılarak TÜFE hesaplanması için hangi aşamaların ihtiyaç olabileceği üzerine çalışma yapılmıştır. İstatistik Ofisinde Sabit Etkiler endeksi geliştirilmiş ve bu endekse bağlı olarak büyük veri yöntemleri TÜFE için kullanılabilir hale getirilmiştir. BPP tarafından toplanan web tarama çevrimiçi verileri kullanılmıştır. Bu veriler ile birlikte Yeni Zelanda'da çevrimiçi satış yapan perakendecilerin potansiyeli hakkında fikir sağlamıştır. Bu çevrimiçi veriler anket ve marketlerden alınan tarayıcı verileri ile kullanıldığında istatistik ofisinde endeks hesaplaması için büyük imkânlar sağlamıştır. Ayrıca bu çalışmada büyük verilerin elektronik eşya ve ikinci el arabalarda kullanılan kalite ayarlamalarındaki etkisi araştırılmıştır (Bentley&Krsinich, 2017).

Cavallo tarafından yapılan bir çalışmada web tarama ile elde edilen çevrimiçi fiyatlar ile normal perakende fiyatları arasındaki değişimler gözlemlenmiştir. Bu çalışmada zaman serisinde çevrimiçi fiyatların gerçek fiyatlarla yüzde 72 oranında aynı olduğu tespit edilmiştir. Yapılan incelemeler ile çoklu perakendeci bulunduran çevrimiçi sitelerin fiyat değişimlerinde genelde daha tutarlı olduğu gösterilmiştir (Cavallo, 2017).

Hull ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada İsveç'te bulunan çevrimiçi marketlerden meyve ve sebze ürünlerini web tarama yöntemiyle toplayarak kısa vadeli enflasyon tahmini için bir sistem geliştirmişlerdir. Geliştirilen sistem Linux sunucusunda kurulmuştur. Bu sunucuda 4 çevrimiçi market için veri toplayan uygulama geliştirilmiştir. Ürünlerin kategorilerinin oluşturulması için sözlük tabanlı bir veri tabanı kurulmuştur. Bu sözlük, toplanan web tarama ürün bilgilerini TÜFE kategorileriyle eşleştirilmesini sağlamıştır (Hull vd., 2017).

Zhou yaptığı bir çalışmada market verilerini kullanarak İsveç enflasyonu için bir modelleme araştırması gerçekleştirmiştir. Bu modelleme sürecinde tüketici bakış açısından TÜFE için web tarama verilerinin kullanılabilirliği vurgulanmıştır (Zhou, 2017).

Whitaker tarafından yapılan bir çalışmada istatistik ofisleri için anket verileri ile büyük veri bilgileri karşılaştırılmıştır. Büyük veri, anket verilerinin ne kadarını karşılayabileceği tartışılmış ve bulgular ile başarılı sonuçlar alınmıştır. Büyük veri için Equifax tüketici kredisi kayıtları ve New York Tüketici Kredisi Paneli / Equifax Federal Reserve Bank bilgileri kullanılmıştır (Analytic Dataset, 2018). Bu çalışmada her iki veri kümesinde yer alan değişkenlerin yanı sıra kredi kayıtlarına dahil edilen nüfus sayımı toplam demografi verilerine sahip modellerde kullanarak hanehalkı borç modellerinin tahmini oluşturulmuştur. Politik öneriler için genelde anket verilerinden faydalanılmıştır. Bu çalışmada yapılan analizlerle borç dengelerinin yaş, gelir ve aile yapısı arasındaki ilişkiler nasıl etkisinin olduğu araştırılmıştır (Whitaker, 2018).

Harchaoui ve Janssen yaptıkları bir çalışmada farklı frekanslarda örneklenen verileri barındıran bir model kullanarak BPP TÜFE'sinin öngörücü içeriğini değerlendirmiştir. Bu model zaman periyotlarının çeşitliliği için iyi tahminler üretmektedir. Resmi TÜFE rakamlarının tahmini doğruluk oranına önemli bir katkıda bulunmuştur. Bu çalışmada uygun bir modelleme stratejisiyle günlük BPP TÜFE'sinin, resmi TÜFE'nin zamanlamasını güvenilir bir şekilde arttırmak için verimli bir şekilde kullanılabilirliğini savunulmuştur. Bu model ile ABD enflasyonunun bir uygulama ile değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Alınan sonuçlar ile 12 aylık tahminin 0,4 oranında iyileşmesi ve 0,6 gibi bir doğruluk gibi sonuçlar alınmıştır. Elde edilen bulgular ile bu modelin günlük BPP TÜFE'sinin zaman aralıklarında genel olarak sağlam sonuçlar elde ettiği gösterilmiştir (Harchaoui&Janssen, 2018).

Cavallo yaptığı bir çalışmada web tarama yöntemi ile elde edilen ürün bilgilerini, marketlerden toplanan tarayıcı ürün bilgileri ile karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırma ile fiyat değişim süreleri ve fiyat değişim büyüklüğü analizleri yapılmıştır. Web tarama verileri PriceStat tarafından elde edilmiştir. Söz konusu veriler 31 ülkeye ait 181 perakendecinin ürün bilgileridir. Büyük veri seti ile istatistiksel analizler yapılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre ülkelerin TÜFE oranı, fiyat değişim oranı ve ortalama fiyat büyüklüğü oranı vb. bilgiler elde edilmiştir (Cavallo, 2018).

Abe ve Shinozaki yaptıkları bir çalışmada dayanıklı ürünlerin kalite değişimi sonucu oluşan fiyat değişiklikleri için makine öğrenme ve doğal dil işleme tekniklerini kullanmışlardır. Eski ürünlerin yerine geçen yeni ürünler eşleştirilerek kalite değişimleri tespit edilmiştir. Ürünler web tarama yöntemi ile Japonya'da bulunan kakaku.com çevrimiçi alışveriş sitesinden elde edilmiştir. Metin eşleştirme için Jaro-Winkler Distance yöntemi, makine öğrenme için SVM yöntemi kullanılmıştır. Web tarama ürünleri ve resmi olarak anketler ile elde edilen ürünler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda 20 elektronik ev eşyası için kaliteden kaynaklı fiyat değişimleri gözlemlenebilmiştir (Abe&Shinozaki, 2018).

Cavallo ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada BPP verilerini, Uluslararası Karşılaştırmalar Programı (International Comparison Program - ICP) ve Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (Organisation for Economic Co-operation and Development - OECD) tarafından sunulan tüketim ürün verileriyle karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada kullanılan veriler, 2011'den 2017'ye kadar üç ana tüketim kategorisinde, gıda ve içecek, yakıt ve elektronik olmak üzere toplam 11 ülkeyi kapsamaktadır. BPP tarama verilerinin ICP ve OECD tarafından sunulan istatistik verileri arasında ülkeler için ortalama yüzde 15 farklılık göstermiştir (Cavallo vd., 2018).

Bosch ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada web tarama ve anket verilerini birleştirerek istatistik ofisleri için genel bir metodoloji önermişlerdir. Web tarama verileri hakkında detaylı bilgileri elde etmek için birden fazla çevrimiçi siteden veriler toplanmıştır. Bu süreçte edinilen tecrübeye bağlı olarak web tarama yöntemi için izlenecek adımlar belirlenmiştir. Ayrıca web tarama verilerinin anket verilerine uyumluluğunu ölçmek için belli aşamalar tanımlanmıştır. Süreç içerisinde web tarama yönteminin istatistik ofisleri için anket yanıt yükünü hafifletmesi ile istatistik üretim süreçlerini iyileştirip hızlandırdığı ele alınmıştır. Dezavantaj olarak web tarama ile işlenmemiş verilerin elde edildiği ve bunun bir maliyeti olabileceği vurgulanmıştır (Bosch vd., 2018).

TÜFE için yapılan büyük veri çalışmalarının literatür karşılaştırmaları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Büyük veri çalışmalarının karşılaştırılması

Yazarlar	Konu	Özellikler	Yöntem	Veri Seti	Hassasiyet
Cavallo	Çevrimiçi ve resmi fiyat endeksleri: Arjantin'in enflasyonunu ölçmek	Çevrimiçi TÜFE hesaplanması	Web tarama, Büyük veri	Web verileri	tarama
Hang	Web arama verilerine göre enflasyon endeksinin oluşturulmasına ilişkin bir çalışma	Anahtar kelimeler ile TÜFE tahmini	Büyük veri, Granger Test, Dickey-Fuller Test, SPSS	Arama logları	motoru
Yuan ve diğerleri	İnternet haber makaleleriyle hibrit Sarima ve Sinir Ağı Modelini Kullanarak TÜFE Tahmini	TÜFE tahmini	Web tarama, Büyük veri, ARIMA	Haber sitelerindeki haber ve makale bilgileri	
Griffioen ve diğerleri	İnternette giyim verisi toplamak	Web tarama ile giyim kategorisi için TÜFE hesaplanması	Web tarama, Büyük veri	Çevrimiçi alışveriş site verileri (Giyim)	98
Dubey ve Gennari	Büyük miktarda veri içeren tüketici fiyat endeksleri: Kamu-özel tamamlayıcılıklar	Büyük veri TÜFE'si ile resmi TÜFE karşılaştırılması	Web tarama, Büyük veri	Web verileri, Verileri	tarama Market Mobil
Manik ve Albarda	İstatistik Endonezya'da büyük veri yöntemiyle günlük TÜFE oluşturma stratejisi	Günlük TÜFE	Web tarama, Büyük veri	Web verileri, Verileri	tarama Market Mobil

Tablo 1 (devam). Büyük veri çalışmalarının karşılaştırılması

Yazarlar	Konu	Özellikler	Yöntem	Veri Seti	Hassasiyet
Breton diğerleri	ve Tüketici fiyat endekslerini oluşturmak için web tarama verileri kullanma	Aylık ve günlük Çevrimiçi hesaplanması	Web tarama, Büyük veri, Munging	Tesco, Sainsbury ve Waitrose çevrimiçi market verileri	
Nygaard	Norveç Tüketici Fiyatları Endeksinde çevrimiçi fiyatların kullanımı	Çevrimiçi tahmini	TÜFE Web tarama, Büyük veri, import.io	Çevrimiçi market verileri	
Federico diğerleri	ve İtalyadaki Harmonik TÜFE derlemesi için tüketici elektroniği ve uçak bileti verileri toplamak için web tarama teknikleri	TÜFE hesaplanması	Web tarama, Büyük veri	Çevrimiçi alışveriş site verileri (Elektronik Eşya ve Uçak Biletleri)	
Barcaroli diğerleri	ve İnternetin Resmi İstatistikler İçin Veri Kaynağı Olarak Kullanılması: Web tarama teknolojisinin Karşılaştırmalı Analizi	Web tarama yönteminin daha etkin kullanılması	Büyük veri, Web tarama	Çevrimiçi alışveriş site verileri	
Barcaroli diğerleri	ve İstatistiğinin Veri Kaynağı Olarak İnternet Kullanımı: İnternetteki İşletmeleri Belirleme Stratejisi	Çevrimiçi marketlerin internet adreslerinin doğruluklarının ölçülmesi	Büyük veri, Web tarama Random Forest, Logistic Model, Web Tarama	Çevrimiçi alışveriş site verileri	82
Cavallo Rigobon	ve Milyar Fiyatlar Projesi: Ölçüm ve Araştırma İçin Çevrimiçi Fiyatları Kullanma	TÜFE tahmini iyileştirmek	Web tarama, Büyük veri	Çevrimiçi market verileri	
Gabrielli diğerleri	ve Perakende Fiyat piyasasını kullanarak TÜFE için Büyük Veri yöntemi kullanılması	TÜFE hesaplanması	Web tarama, Büyük veri	Coop çevrimiçi market verileri	
Auer diğerleri	ve Yeni büyük veri kaynakları fiyat istatistikçilerinin endeks derleme prosedürlerini tekrar ele alınması	TÜFE hesaplanması	Web tarama, Büyük veri, import.io	Çevrimiçi alışveriş site verileri (Tren ve Uçak Biletleri, tatil siteleri)	
Metcalf diğerleri	ve Web'deki fiyat verilerini kullanarak araştırma endeksleri: büyük veri kümelerini fiyat endekslerine kümelemek	Tüketicinin ihtiyaç ürünlere olan eğiliminin ölçülmesi	Web tarama, Büyük veri, Mean-Shift	Çevrimiçi alışveriş site verileri	
Thakur diğerleri	ve Hindistan'da Enflasyon Tahmini için Yapay Sinir Ağı Tabanlı Model	Enflasyon Tahmini	Büyük veri, Geri Yayılımlı Çok Katmanlı İleri Beslemeli Sinir Ağı	2000-2012 yılları arası resmi veriler(GSYH, Faiz oranları, ithalat ve ihracat, altıp ve petrol fiyatları)	93.63

Tablo 1 (devam). Büyük veri çalışmalarının karşılaştırılması

Yazarlar	Konu	Özellikler	Yöntem	Veri Seti	Hassasiyet
Griffioen ve diğerleri	Hollanda TÜFE'si için İnternet verilerinin kullanımı	Web tarama verilerinin TÜFE için kaynak olabilmesi	Web tarama, Büyük veri	Çevrimiçi alışveriş site verileri (Giyim)	
Struijs	ESSnet Big Veri projesi	Büyük veri yönteminin İstatistik ofisleri için istatistikleri üretmesi	Büyük veri, Web tarama		
Nugroho ve diğerleri	Destek vektör regresyon yöntemi tabanlı bulut bilişim kullanarak günlük tüketici fiyat endeksini tahmin etmek	Günlük TÜFE tahmini	Web tarama, Destek Vektör Regresyon (SVR), Random Forest, Bulut teknolojisi, Grid Search, Random Search, Büyük veri	Web tarama verileri	
Powell ve diğerleri	Web tarama fiyat mikro verilerini kullanarak fiyatları izleme ve modelleme: otomatik günlük tüketici fiyat endeksi tahminine doğru	Günlük TÜFE tahmin modeli	Web tarama, Log-posterior yoğunluğu sayısal optimizasyonu, Büyük veri	BPP Verileri	
Sutiawan ve Nugraha	Tüketim mallarının çevrimiçi fiyat tahmin sistemi	Çevrimiçi fiyat tahmini	Web tarama, Big Data, Weka, MLP	Hypermart ve Alfacart çevrimiçi market verileri	83.34
Aparicio ve Bertolotto	Çevrimiçi Fiyatlarla Enflasyon Tahmini	TÜFE tahmini	Web tarama, Büyük veri	BPP Verileri	
Huang ve diğerleri	Sepet Güncellemelerinin Frekansı ve Uygulama Gecikmesinin Kanada TÜFE'sine Etkileri	Web tarama yönteminin TÜFE için alternatif olması	Web tarama, Büyük veri		
Bentley ve Krsinich	Yeni Zelanda için büyük veri kapsamında TÜFE	TÜFE hesaplanması, ürünleri kalite ayarlamaları	Web tarama, Büyük veri	BPP Verileri, Çevrimiçi alışveriş site verileri, Market Verileri	
Cavallo	Çevrimiçi ve Çevrimdışı Fiyatlar Benzer misiniz? Büyük Çok Kanallı Perakendecilerin Kanıtları	TÜFE için fiyat istikrarının hesaplanması	Web tarama, Büyük veri	BPP Verileri	
Hull ve diğerleri	Çevrimiçi olarak toplanan fiyat bilgileri ve kısa vadeli enflasyon tahminleri	Kısa vadeli enflasyon tahmini	Web tarama, Büyük veri	Çevrimiçi market verileri (meyve ve sebze)	
Zhou	Piyasa Verilerini Kullanarak İsveç Enflasyonunu Modellemek	Market verilerinin TÜFE için kaynak olabilmesi	Büyük veri	Market verileri	

Tablo 1 (devam). Büyük veri çalışmalarının karşılaştırılması

Yazarlar	Konu	Özellikler	Yöntem	Veri Seti	Hassasiyet
Whitaker	Ankete Karşı Büyük Veri	Büyük	Büyük veri	Equifax tüketici kredisi kayıtları, New York Tüketici Kredisi Paneli / Equifax Federal Reserve Bank bilgileri	
Harchaoui ve Janssen	Büyük veriler resmi istatistiklerin zamanlamasını nasıl artırabilir?: ABD tüketici fiyat endeksi örneği	TÜFE tahmini için zamanlama modeli	Web tarama, Büyük veri, MIDAS	BPP verileri	
Cavallo	Web tarama verileri ve yapışkan fiyatlar	Market verileri ve Web tarama verilerinin karşılaştırılması	Web tarama, Büyük veri	BPP Verileri, Çevrimiçi alışveriş site verileri	
Abe ve Shinozaki	Büyük Veri ve Makine Öğrenimi Kullanarak Deneysel Fiyat Endekslerinin Derlenmesi	Tüketici ürünlerinin kalite değişimlerine bağlı olarak fiyat değişimleri	Büyük veri, Web tarama, SVM, Jaro-Winkler	Çevrimiçi alışveriş site verileri (kakaku.com: elektronik eşya)	
Cavallo ve diğerleri	Ülkeler Arasında Gerçek Tüketimi Ölçmek İçin Çevrimiçi Fiyatların Kullanılması	BPP tüketici ürünlerinin ICP ve OECD tüketici ürünleri ile karşılaştırılması	Web tarama, Büyük veri	BPP Verileri	85
Bosch ve diğerleri	Web tarama anket tasarımı karşılar: güçlerin birleştirilmesi	Web tarama ve anket verilerinin birleştirilmesi TÜFE hesaplanması	Büyük veri, Web tarama	Çevrimiçi alışveriş site verileri, Anket verileri	

3. Ürünlerin Sınıflandırılmasında Yapay Zeka Kullanan Çalışmalar

Bu bölümde TÜFE hesaplaması için ürün sınıflamasında kullanılan yapay zeka çalışmalarına yer verilmiştir.

Ghani ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada çevrimiçi sitelerden toplanan ürün metin bilgileriyle nitelik değer çıkarma yöntemi geliştirmişlerdir. Çalışmanın amacı özellik-değer çiftleri ile bir veritabanı oluşturarak ürünlerin sınıflandırmasını gerçekleştirmektedir. Spor malzemeleri ve giyim kategorisi ürünleri kullanarak farklı yöntemler ile sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Metin sınıflandırma işlemi için Naive Bayes teorimi, etiketsiz ürün bilgileri için ise Expectation-Maximization (EM) yöntemi kullanılmıştır. Ürün markaları ile yapılan deneyde Naive Bayes yöntemi kullanılarak yüzde 87 ile en iyi sonuç elde edilmiştir (Ghani vd., 2006).

Kannan ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada Bing arama motoru için ürün eşleştirme yöntemi geliştirmişlerdir. Çalışmanın amacı arama motoru üzerinden alınan tekliflerin hedef ürünlere uyacak şekilde uygulanabilir bir sistem geliştirmektir. Eşleştirme için ürün açıklamaları kullanılmıştır. Veri seti için 54 kategoriden oluşan 20 bin ürün kullanılmıştır. Geliştirilen Li & Wong subtractMM (LVMM) modeli ile ortalama yüzde 85 doğruluk elde edilmiştir (Kannan vd., 2011).

Kannan ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada ürün sınıflandırmasını iyileştirmek için ürün özellikleri ve ürün resimlerini kullanarak kategorilerin oluşturulmasını hedeflemişlerdir. Ürün açıklaması, tanımlanmış alt kategoriyi bulmada kullanılmıştır. Ürün resimleri eşleştirme başarı oranını artırmak için kullanılmıştır. Bu çalışmada görüntü sinyallerinin nasıl etkin bir şekilde kullanılabileceğini araştıran nispeten keşfedilmemiş ortam üzerinde bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Eğitim için 17989, test için 10026 ürün kullanılmıştır (Kannan vd., 2011).

Köpcke ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada e-ticaret sitelerinde bulunan elektronik ürünlerin eşleştirmelerini iyileştirmek için ürün tanımları kullanılarak özellik çıkarma tekniği uygulamışlardır. Eşleştirme için makine öğrenme ve doğal dil işleme teknikleri kullanılmıştır. Makine öğrenmesi için SVM ve doğal dil işleme için Term Frequency - Inverse Document Frequency (TF-IDF), Trigram ve Jaccard yöntemleri kullanılmıştır. Bir e-ticaret sitesi tarafından sağlanan yaklaşık 100 bin ürün üzerinde yapılan eşleştirmede ortalama yüzde 85 oranında en iyi sonuç elde edilmiştir (Köpcke vd., 2012).

Zahavy ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada web tarama ile çevrimiçi alışveriş sitesinden(Walmart.com) ürün verilerini toplamışlardır. Bu çalışmada çok modlu ürün sınıflandırması için karar düzeyinde füzyon yaklaşımı modeli önerilmiştir. Bu model için ürünlerin metin ve görüntü bilgileri girdi olarak kullanılmıştır. Model içeriğinde girdi olarak kullanılan bilgiler ile derin sinir ağları eğitilmiştir ve girdi türü için aralarında seçim yapmayı öğrenen yeni bir yöntem ele alınmıştır. Bu iki yöntemle Walmart çevrimiçi sitesinde bulunan ürünlerin sınıflandırması için doğruluk oranı yüzde 1 olarak artırılmıştır (Zahavy vd., 2016).

Cevahir ve Murakami yaptıkları bir çalışmada e-ticaret siteleri için belirli bir ürün başlığı veya tanımlaması ile ürünün kategorisini tahmin eden bir model geliştirmişlerdir. Bunun için iki sinir ağı(Deep Belief Nets and Deep Autoencoders) modeli birlikte kullanılmıştır. Sinir ağları modelleri grafik işlemci birimleri tarafından eğitilmiştir. E-ticaret sitelerinden elde edilen 150 milyon ürünün 28338 kategoriye eşleştirilmesi yapılmıştır. Yapılan testler ile e-ticaret sitelerinin ürün kategorisi eşleştirme doğruluk oranı yüzde 81 olarak gerçekleşmiştir (Cevahir&Murakami, 2016).

Ristoski ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada derin öğrenme tekniklerini, ürün eşleme ve sınıflandırma için standart sınıflandırma yaklaşımlarıyla birlikte kullanan bir yaklaşım ele almışlardır. Metinsel ürün açıklamalardan özellik-değer çifti çıkarma yeteneğine sahip eğitim özelliği çıkarma modelleri için denetimli olarak yapılandırılmış ürün verileri kullanılmıştır. Büyük miktarda kamuya açık ürün verilerinden kelime yerleştirmeleri üretmek için sinirsel dil modelleri kullanılmıştır. Ayrıca, ürün görüntülerinden görüntü yerleştirmeleri üretmek için derin Konvansiyonel Sinir Ağı kullanılmış; bu da her iki aşamada daha iyi sonuçları ortaya çıkarmıştır. Aynı ürün birçok farklı e-mağazada bulunabilir, ancak ürün teklifleri hakkındaki bilgiler farklı e-mağazalar arasında büyük farklılık gösterir. Ürün sınıflandırılmasında kullanılan resimler için derin sinir ağları görüntü bindirmeleri (deep neural nets image embeddings) yöntemi kullanılmıştır (Ristoski vd., 2018).

Xia ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada Japonya'da bulunan Rakuten Ichiba çevrimiçi alışveriş sitesi ürünleri için 35 ana kategoriye sınıflandıran bir model geliştirmişlerdir. Japon alfabesine uyacak şekilde Dikkat Evrimsel Sinir Ağı (Attention Convolutional Neural Network - ACNN) sinir ağı kullanılmıştır. Sinir ağı modelini eğitmek için geçen süre 3 haftadan 3 güne indirilmiştir. Rakuten çevrimiçi sitesinde 44000 satıcı için yaklaşık olarak 239 milyon ürün bulunmaktadır. Bu ürün verileri için yapılan eşleştirmede doğruluk oranı yüzde 96 olarak gerçekleşmiştir (Xia vd., 2017).

Roels ve Loon'un Belçika İstatistik Ofisi'nde (Statbel) yaptıkları bir çalışmada web tarama ile tüketici elektroniği, ayakkabı, otel, ikinci el araba ve öğrenci pansiyonları kategorileri için TÜFE hesaplaması gerçekleştirmişler. Elde edilen bu ürünler için veri temizleme ve veri sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Veri sınıflandırması için En Yakın Komşu (K-Nearest Neighbors - KNN), SVM, Naive Bayes ve Random Forests makine öğrenme yöntemleri kullanılmıştır. Verilerin yüzde 85'i eğitim ve yüzde 15'i test için kullanılmıştır. Yüzde 86 doğruluk oranıyla Random Forests yöntemi en iyi sonucu vermiştir (Loon&Roels, 2018).

Shah ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada eBay çevrimiçi sitesinin ürün bilgileri için eşleştirme yöntemi önermişlerdir. Elektronik eşya, giyim ve aksesuar kategorilerinde bulunan ürünlerin eşleştirilmesi için Sığ Sinir Ağı-FastText (Shallow Neural Network) ve Siyam Ağları (Siamese Networks) yöntemleri kullanılmıştır. Kullanılan ürün veri setinin yüzde 80'ini uluslararası standart etiketleri olan ürünlerdir. Geriye kalan ürünler satıcılar tarafından veya üçüncü kaynaklardan sağlanmıştır. Sığ sinir ağı yöntemi kullanılarak yapılan eşleştirmelerde elektronik eşya için yüzde 88.8 giyim için yüzde 78.8 aksesuar için yüzde 96.4 doğruluk değerleri elde edilmiştir. Siyam sinir ağı yöntemi kullanılarak yapılan eşleştirmelerde elektronik eşya için yüzde 89.9 giyim için yüzde 82.4 aksesuar için yüzde 97.1 değerleri elde edilmiştir (Shah vd., 2018).

Bonnett yaptığı bir çalışmada Lynks çevrimiçi alışveriş sitesinde satılan ürünler için ürün açıklamaları ve ürün resimleri bilgilerini kullanarak bir sınıflandırma modeli geliştirmiştir. Giyim ve moda ürünleri kategorileri için VGG sinir ağı yöntemi kullanılmıştır. Sadece ürün açıklamaları kullanılarak yüzde 85 oranıyla eşleştirme gerçekleştirilmiştir. Ürün resimlerini eşleştirmek için ImageNet eğitilmiş veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti için öğrenme transferi yöntemi kullanılarak yapılan eşleştirmede yüzde 85 doğruluk oranı elde edilmiştir. Son aşamada hem ürün açıklamaları hem de ürün resimleri veri seti olarak kullanılmış ve yüzde 93 doğruluk oranı elde edilmiştir (Bonnett, 2016).

More yaptığı bir çalışmada Walmart çevrimiçi alışveriş sitesinde bulunan ürün bilgileri ile benzer ürünler için eşleştirme işlemini gerçekleştirmiştir. Ürün eşleşmesi için ürün isimleri, ürün özellikleri, ürün fiyatları ve ürün resimleri kullanılmıştır. Ürün isimleri ve özellikleri kullanılarak yapılan eşleştirme için tekrarlayan sinir ağları (Long Short Term Memory - LSTM) ve evrimsel sinir ağları (Convolutional Neural Network - CNN) yöntemleri kullanılmıştır. Bu eşleştirme ile Walmart sitesindeki ürünler yüzde 99 doğruluk oranıyla eşleşebilmiştir. Ürün resimleri için Residual Networks (ResNet), Visual Geometry Group (VGG) ve Inception sinir ağları kullanılmıştır. Aynı sitede farklı satıcıların aynı ürün için sunduğu farklı açılardan, farklı yakınlaştırmalardan ve farklı renk tonlarından resimleri bulunmaktadır. Bu şekilde farklı sunulan resimler için elde edilen doğruluk oranları farklı olmuştur. Farklı

yakınlaştırmaları olan resimler için ResNet sinir ağı ile yüzde 99, farklı renk tonları ve farklı açıları olan ürünler için Inception sinir ağı ile yüzde 99, farklı renk tonları olan resimler için VGG sinir ağı ile yüzde 88 gibi en iyi doğruluk oranları elde edilmiştir. Ürün fiyatları üzerinden yapılan eşleştirme için Grubs' Test yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile fiyat aralığını aşan ürünler, eşleştirme dışında tutulmuştur (More, 2017).

Ürün eşleştirme için yapılan büyük veri çalışmalarının literatür karşılaştırmaları Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Ürün Eşleştirme için Yapılan Çalışmaların Karşılaştırılması

Yazarlar	Konu	Özellikler	Yöntem	Veri Seti	Hassasiyet
Ghani ve diğerleri	Ürün özellik çıkarımı için metin madenciliği	Çevrimiçi sitelerden toplanan ürün metin bilgileriyle ürün nitelik değerini çıkararak sınıflandırma işlemi	Naive Bayes, Expectation-Maximization	Çevrimiçi site verileri	87
Kannan ve diğerleri	Yapılandırılmamış ürün tekliflerini yapısal ürün özelliklerine uygun hale getirmek	Arama motoru üzerinden alınan tekliflerin hedef ürünlere uyacak şekilde uygulanması	LVMM	Bing arama motoru, 54 kategoriden oluşan 20 bin ürün	85
Kannan ve diğerleri	Görüntüleri Kullanarak Ürün Sınıflandırmasını İyileştirme	Ürün özellikleri ve ürün resimlerini kullanarak kategorilerin oluşturulması	NLP, ANN	28015 ürün veri seti	
Köpcke ve diğerleri	Eşleşen ürün teklifleri için varlık çözümü tasarlama	Çevrimiçi sitelerde bulunan elektronik ürünlerin eşleştirmelerini iyileştirmek	SVM, TF-IDF, Trigram, Jaccard	Bir e-ticaret sitesi tarafından sağlanan yaklaşık 100 bin ürün	85
Zahavy ve diğerleri	E-ticarette Ürün Sınıflandırmasına Yönelik Çok Amaçlı Bir Füzyon Mimarisi	ürün özellikleri ve ürün resimlerini kullanarak eşleştirmenin gerçekleştirilmesi	Decision Level Fusion	Wallmart alışveriş sitesi verileri	
Cevahir ve Murakami	Bir E-Ticaret Devri İçin Büyük Ölçekli Çok Sınıflı ve Hiyerarşik Ürün Sınıflandırması	Web tarama verileriyle ürünün kategorisini tahmin eden bir model	Deep Belief Nets, Deep Auto encoders	Çevrimiçi alışveriş sitesi verileri (150 milyon ürün)	81
Ristoskia ve diğerleri	Ürün Eşleştirme ve Sınıflandırma için Makine Öğrenmesi Yaklaşımı	Farklı çevrimiçi alışveriş sitelerinin ürünlerinin eşleştirilmesi	CNN, Doğal Dil İşleme (Natural Language Processing - NLP), Deep Neural Nets Image Embeddings	Çevrimiçi alışveriş site verileri	
Xia ve diğerleri	Sinir Dikkat Modelleri Kullanarak Japon Ürün Başlıklarının Büyük Ölçekli Sınıflandırılması	Çevrimiçi alışveriş sitesi ürünleri için 35 ana kategoriye sınıflandırma	ACNN	Rakuten çevrimiçi sitesinde 44000 satıcı için yaklaşık olarak 239 milyon	96

Tablo 2 (devam). Ürün Eşleştirme için Yapılan Çalışmaların Karşılaştırılması

Yazarlar	Konu	Özellikler	Yöntem	Veri Seti	Hassasiyet
Roels ve Loon	Tüketici fiyat endeksi için web tarama, çevrimiçi veri toplama ve işleme	Ürün eşleştirme sonucunda TÜFE hesaplanması	KNN, SVM, Naive Bayes, Random Forests	Çevrimiçi alışveriş sitesi verileri (elektronik eşya, ayakkabı, otel, 2.el araba, öğrenci pansiyonları)	86
Shah ve diğerleri	Ürün Eşleştirme için Sinir Ağı Tabanlı Aşırı Sınıflandırma ve Benzerlik Modelleri	Çevrimiçi alışveriş sitede bulunan ürün bilgileriyle eşleştirme	Sığ Sinir Ağı-FastText(Shallow Neural Network), Siyam Ağları(Siamese Networks)	eBay çevrimiçi alışveriş sitesi verileri	97.1
Bonnett	E-ticaret ürünlerinin görüntülere ve metne göre sınıflandırılması	Çevrimiçi alışveriş sitede bulunan ürünler için ürün açıklamaları ve ürün resimleriyle sınıflandırma	VGG	Lynks çevrimiçi alışveriş sitesi verileri, ImageNet verileri	93
More	Derin öğrenmeyi kullanarak e-Ticarette Ürün Eşleştirme	Çevrimiçi alışveriş sitede bulunan ürün bilgileriyle eşleştirme	Tekrarlayan sinir ağları (LSTM), CNN, Residual Networks(ResNet), VGG, Grubs' Test	Wallmart çevrimiçi alışveriş sitesi verileri	99

4. Sonuçlar

Bu makalede TÜFE için web tarama ve yapay zeka ile ilgili çalışmalar ve farklı yöntemlerle elde edilen ürünlerin sınıflandırılmaları ile ilgili çalışmalar ele alınmıştır. Web tarama verileri istatistik ofisleri için büyük bir veri kaynağı olmuştur. Genel olarak veri toplama maliyetini azaltan bir yöntem olarak ele alınmıştır. Ancak web tarama verileri, veri işleme hacmini artırmaktadır. Çünkü veri toplama işlemi günlük olarak çevrimiçi marketlerden toplanarak veri tabanlarına kaydedilmektedir. Ve bu veri toplama yöntemi her çevrimiçi markete özel olarak yapılmaktadır. Bu veriler çevrimiçi marketlerde farklı olduğu için çeşitliliği ve karmaşıklığı fazladır. Buna bağlı olarak istatistik ofislerinin bu verileri işlemesi için yüksek işlemcili ve yüksek kapasiteli bilgisayar ortamlarına ihtiyacı vardır. Bu şartlar oluştuğunda web tarama verileri daha faydalı hale gelmektedir. İstatistik ofisleri web tarama verilerinin anketlerin bir kısmını karşılayabilecek şekilde işlemeye çalışmaktadır. Bu süreçte web tarama ile elde edilen tüketici ürün bilgileri karmaşık ve çeşitli olduğundan dolayı ürünlerin düzenli hale getirilmesine ihtiyaç vardır. Ürünlerin düzenli bir şekilde sınıflandırılması sonucunda resmi istatistik ofisleri TÜFE hesaplayabilmektedir. Ürünlerin sınıflandırılması yapıldıktan sonra ayrıca bu sınıflandırmaların TÜFE ürün kategorilerine uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Bu durum ürün eşleştirmenin önemini ortaya koymaktadır. Büyük veri kapsamında TÜFE işlemleri ile ürün sınıflandırma işlemleri birleştirildiğinde resmi istatistik ofisleri için faydalı bir sonuca dönüşmektedir. Yapılan literatür çalışmaları ile genel bir tasarım oluşturulduğunda web tarama verilerinin elde edilmesinden ürün eşleştirmeye doğru işlem adımlarının uygulanmasının ihtiyaç olduğu ortaya çıkmaktadır.

Yapılan literatür çalışmalarına göre tasarlanacak işlem adımları özet olarak şu şekilde ele alınabilir;

- Çevrimiçi marketlerden ürün bilgilerinin web tarama ile elde edilmesi
- Elde edilen ürün bilgilerinin sınıflandırılması
- Sınıflandırılan ürünlerin TÜFE için belirlenmiş Uluslararası amaca yönelik Kişisel Tüketim sınıflamasına eşleştirilmesi
- Resmi olarak belirlenmiş tüketim ürünlerinin harcama ağırlıklandırmaları kullanılarak yapılan çalışmalarla elde edilmiş ürün sınıflaması ile günlük veya aylık periyotta olacak şekilde TÜFE'nin hesaplanması

Bu adımlardan en zorlu olanı 2.adımda gösterilen ürünlerin sınıflandırılmasıdır. Çünkü yapılan araştırmalarda ürün sınıflandırma için makine öğrenme, yapay zeka ve doğal dil işleme gibi yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlere ihtiyaç duyulmasının temel nedeni aynı ürünlerin farklı çevrimiçi marketlerde farklı şekilde sunulabilmesidir. Ya da aynı ürünlerin farklı varyantları olabilmektedir. Ürün

eşleştirme başarısı TÜFE göstergesi için önemli bir adımdır. Çünkü istatistik ofisleri TÜFE'yi hesaplarken tüketici ürünlerinin ana kategorileri(COICOP) ile ve bu kategorilere bağlı olan ürün sınıfları üzerinde ölçümü gerçekleştirmektedir. Bu durumda web tarama ürünlerinin sınıflandırılması ve bu sınıflandırılmış ürünlerin TÜFE için resmi olarak belirlenen ürün sınıflandırılmalarına eşleştirilmesi önemli bir adım olarak görülebilir. Eşleştirme performansına bağlı olarak TÜFE ölçümü daha kısa sürede elde edilebilecektir.

Referanslar

Fiyat Endekleri ve Enflasyon, Sorularla Resmi İstatistik Dizisi-3, TÜİK, 2008

United Nations. (2018). Classification of Individual Consumption According to Purpose (COICOP)

<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Tuketici-Fiyat-Endeksi-Ocak-2019-30849>, "Tüketici Fiyat Endeksi, Ocak 2019", (2019)

Polzonetti, A., Re, B., & Vaccari, C. Big Data in Official Statistics 2013-2014. Available on: http://www.academia.edu/7571682/PhD_Thesis_on_Big_Data_in_Official_Statistics_, 26-43.

Olston, C., & Najork, M. (2010). Web crawling. Now Publishers Inc.

Cavallo, A. (2013). Online and official price indexes: Measuring Argentina's inflation. *Journal of Monetary Economics*, 60(2), 152-165.

Breton, R., Flower, T., Mayhew, M., Metcalfe, E., Milliken, N., Payne, C., ... & Woods, A. (2016). Research indices using web scraped data: May 2016 update. Newport: Office for National Statistics. Available from www.ons.gov.uk/file.

Chuanyang, F., & Hao, J. L. W. (2016). Experiences with the Use of Online Prices in Consumer Price Index.

Cavallo, A., & Rigobon, R. (2016). The Billion Prices Project. *Journal of Economic Perspectives*. Forthcoming.

Hang, C., Yi, S., Xin, Y., & Benfu, L. (2013, July). A study on construction of inflation index based on web search data. In 2013 International Conference on e-Business (ICE-B) (pp. 1-8). IEEE.

Yuan, H., Zhang, D., Xu, W., Wang, M., & Dong, W. (2013, November). Forecasting the CPI Using a Hybrid Sarima and Neural Network Model with Web News Articles. In 2013 Sixth International Conference on Business Intelligence and Financial Engineering (pp. 84-88). IEEE.

Griffioen, R., de Haan, J., & Willenborg, L. (2014, May). Collecting clothing data from the Internet. In Proceedings of Meeting of the Group of Experts on Consumer Price Indexes, May (Vol. 2628).

Dubey, S., & Gennari, P. (2014). Now-casting food consumer price indexes with big data: Public-private complementarities. FAO Working Paper.

Manik, D. P. (2015, November). A strategy to create daily Consumer Price Index by using big data in Statistics Indonesia. In 2015 International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI) (pp. 1-5). IEEE.

Swier, N. (2015). Using Web Scraped Data to Construct Consumer Price Indices, referat wygłoszony na konferencji NTTS 2015, 10-12 marca 2015, Bruksela.

Nygaard, R. (2015). The use of online prices in the Norwegian Consumer Price Index. Statistics Norway.

Polidoro, F., Giannini, R., Conte, R. L., Mosca, S., & Rossetti, F. (2015). Web scraping techniques to collect data on consumer electronics and airfares for Italian HICP compilation. *Statistical Journal of the IAOS*, 31(2), 165-176.

Barcaroli, G., Scannapieco, M., Scarno, M., & Summa, D. (2015). Using internet as a data source for official statistics: a comparative analysis of web scraping technologies. In Proceedings of Proceedings of the New Techniques and Technologies for Statistics Conference (NTTS).

Barcaroli, G., Scannapieco, M., & Summa, D. (2016). On the use of internet as a data source for official statistics: a strategy for identifying enterprises on the web. *Rivista italiana di economia, demografia e statistica*, 70(4), 20-41.

Cavallo, A., & Rigobon, R. (2016). The billion prices project: Using online prices for measurement and research. *Journal of Economic Perspectives*, 30(2), 151-78.

Gabrielli, L., Riccardi, G., & Pappalardo, L. Using retail market Big Data to nowcast Customer Price Index.

Auer, J., & Boettcher, I. (2016). From price collection to price data analytics. How new large data sources require price statisticians to re-think their index compilation procedures. Experiences from web-scraped and scanner data. Statistics Austria.

Metcalfe, E., Flower, T., Lewis, T., Mayhew, M., & Rowland, M. (2017, May). Research indices using web scraped price data: clustering large datasets into price indices (CLIP). In th meeting of the Ottawa Group (pp. 10-12).

Thakur, G. S. M., Bhattacharyya, R., & Mondal, S. S. (2016). Artificial neural network based model for forecasting of inflation in India. *Fuzzy Information and Engineering*, 8(1), 87-100.

Griffioen, A. R., & Ten Bosch, O. (2016, May). On the use of internet data for the Dutch CPI. In Statistics Netherlands. Paper presented at the UNECE/ILO Meeting of the Group of Experts on Consumer Price Indices, Geneva, May (pp. 2-4).

Struijs, P., Consten, A., Daas, P., Debusschere, M., Ilves, M., Nikic, B., ... & Swier, N. (2017, May). The ESSnet Big Data: Experimental Results. In STATISTICS AND DATA SCIENCE: NEW CHALLENGES, NEW GENERATIONS.

Nugroho, S. M. S., Budiastuti, I. A., & Hariadi, M. (2017, August). Predicting daily consumer price index using support vector regression method based cloud computing. In 2017 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA) (pp. 313-318). IEEE.

Powell, B. J., Nason, G., Elliott, D., Mayhew, M., Davies, J., & Winton, J. (2018). Tracking and modelling prices using web-scraped price microdata: towards automated daily consumer price index forecasting. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)*, 737-756.

Sutiawan, N. S., & Nugraha, I. B. (2017, October). Online price prediction system of consumption commodities. In 2017 International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI) (pp. 145-150). IEEE.

Aparicio, D., & Bertolotto, M. I. (2020). Forecasting inflation with online prices. *International Journal of Forecasting*, 36(2), 232-247.

Huang, N., Wimalaratne, W., & Pollard, B. (2017). The Effects of the Frequency and Implementation Lag of Basket Updates on the Canadian CPI. *Journal of Official Statistics*, 33(4), 979-1004.

Bentley, A., & Krsinich, F. (2017). Towards a big data CPI for New Zealand. In 15th Meeting of the Ottawa Group on Price Indices, Eltville am Rhein.

Cavallo, A. (2017). Are online and offline prices similar? Evidence from large multi-channel retailers. *American Economic Review*, 107(1), 283-303.

Hull, I., Löf, M., Tibblin, M., & Riksbank, S. (2017). Price information collected online and short-term inflation forecasts. In Proc. IFC-Bank Indonesia Satellite Seminar on " Big Data" at the ISI Regional Statistics Conference.

Zhou, Y. (2017). Modelling Swedish Inflation Using Market Data.

<https://www.equifax.com/business/analytic-dataset/>, "Analytic Dataset", (2018)

Whitaker, S. D. (2018). Big data versus a survey. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 67, 285-296.

Harchaoui, T. M., & Janssen, R. V. (2018). How can big data enhance the timeliness of official statistics?: The case of the US consumer price index. *International Journal of Forecasting*, 34(2), 225-234.

Cavallo, A. (2018). Scraped data and sticky prices. *Review of Economics and Statistics*, 100(1), 105-119.

Abe, N., & Shinozaki, K. (2018). Compilation of Experimental Price Indices Using Big Data and Machine Learning: A Comparative Analysis and Validity Verification of Quality Adjustments (No. 18-E-13). Bank of Japan.

Cavallo, A., Diewert, W. E., Feenstra, R. C., Inklaar, R., & Timmer, M. P. (2018, May). Using online prices for measuring real consumption across countries. In AEA Papers and Proceedings (Vol. 108, pp. 483-87).

- ten Bosch, O., Windmeijer, D., van Delden, A., & van den Heuvel, G. (2018, October). Web scraping meets survey design: combining forces. In Big Data Meets Survey Science Conference, Barcelona, Spain.
- Ghani, R., Probst, K., Liu, Y., Krema, M., & Fano, A. (2006). Text mining for product attribute extraction. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 8(1), 41-48.
- Kannan, A., Givoni, I. E., Agrawal, R., & Fuxman, A. (2011, August). Matching unstructured product offers to structured product specifications. In Proceedings of the 17th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining (pp. 404-412).
- Kannan, A., Talukdar, P. P., Rasiwasia, N., & Ke, Q. (2011, December). Improving product classification using images. In 2011 IEEE 11th International Conference on Data Mining (pp. 310-319). IEEE.
- Köpcke, H., Thor, A., Thomas, S., & Rahm, E. (2012, March). Tailoring entity resolution for matching product offers. In Proceedings of the 15th International Conference on Extending Database Technology (pp. 545-550).
- Zahavy, T., Magnani, A., Krishnan, A., & Mannor, S. (2016). Is a picture worth a thousand words? a deep multi-modal fusion architecture for product classification in e-commerce. arXiv preprint arXiv:1611.09534.
- Cevahir, A., & Murakami, K. (2016, December). Large-scale Multi-class and Hierarchical Product Categorization for an E-commerce Giant. In Proceedings of COLING 2016, the 26th International Conference on Computational Linguistics: Technical Papers (pp. 525-535).
- Ristoski, P., Petrovski, P., Mika, P., & Paulheim, H. (2018). A machine learning approach for product matching and categorization. *Semantic web*, 9(5), 707-728.
- Xia, Y., Levine, A., Das, P., Di Fabrizio, G., Shinzato, K., & Datta, A. (2017, April). Large-scale categorization of japanese product titles using neural attention models. In Proceedings of the 15th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics: Volume 2, Short Papers (pp. 663-668).
- Loon, K.V., & Roels D., (2018). Le webscraping, la collecte et le traitement de données en ligne pour l'indice des prix à la consommation.
- Shah, K., Kopru, S., & Ruvini, J. D. (2018, June). Neural network based extreme classification and similarity models for product matching. In Proceedings of the 2018 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Volume 3 (Industry Papers) (pp. 8-15).
- Bonnett, C. (2016). Classifying e-commerce products based on images and text. *Adventures in Machine Learning*.
- More, A. (2017). Product matching in ecommerce using deep learning.



Toz Metalurjisi ile Üretilen Cu-Al-Ni Alaşımlarında Yaşlandırma Süresinin Aşınma Davranışlarına Etkisi

The Effect of Aging Time on Wear Behavior of Cu-Al-Ni Alloys Produced by Powder Metallurgy

Doğan Şimşek¹

¹Mili Savunma Üniversitesi, Kara Astsubay Meslek Yüksekokulu, 10100, Altıeylül, Balıkesir, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 07/10/2021

Kabul / Accepted: 05/01/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Bu çalışmada, mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilen Cu-Al-Ni alaşımlarında (nikel alüminyum bronz) yaşlandırma süresinin aşınma davranışları üzerine etkisi incelenmiştir. Mekanik alaşımlanmış tozlar soğuk preslenerek (600 MPa) Ø10x6 mm boyutlarında ham numuneler üretilmiştir. Üretilen ham numuneler 950 °C sıcaklıkta 60 dk sinterlenerek fırın ortamında oda sıcaklığına soğutulmuştur. Sinterlenen numuneler 900 °C sıcaklıkta 8 saat solüsyona alındıktan sonra suda hızlı soğutulmuştur. Yaşlandırma işlemleri 500 °C sıcaklıkta 20 dk, 60 dk ve 80 dk süre ile yapılmıştır. Yaşlandırma işlemi sonrasında standart metalografik çalışmalar yapılarak mikroyapı, sertlik ve yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Aşınma testlerinde 2 ms⁻¹ kayma hızı, 2 farklı yük (25 N ve 50 N) ve 4 farklı kayma mesafesi (250 m, 500 m, 750 m ve 1000 m) kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda maksimum sertlik 60 dk yaşlandırılan alaşımda 228 HV olarak elde edilmiştir. Yoğunluk sonuçlarında ise artan yaşlandırma süresiyle yoğunlukta azalma meydana gelmiş ve en düşük yoğunluk değeri 60 dk yaşlandırılan alaşımda (6,08 gr/cm³) olarak ölçülmüştür. Aşınma testi sonuçlarında, en düşük ağırlık kaybı 60 dk yaşlandırılan alaşımda elde edilirken, en yüksek ağırlık kaybının 80 dk yaşlandırılan alaşımda elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Cu-Al-Ni alaşımı, yaşlandırma, toz metalurjisi, aşınma”

Abstract

In this study, was investigated the effect of aging time on wear behavior Cu-Al-Ni alloy (nicel aluminum bronze) produced by mechanical alloying method. Mechanical alloying powders were produced cold pressed (600 MPa) and green compacts of Ø10x6 mm dimensions. The produced green compacts were sintered at 950 °C for 60 min and cooled to room temperature in the furnace environment. Sintered samples were taken to the solution at 900 °C for 8 hours and then cooled rapidly in water. Aging processes were carried out at 500 °C for 20 min, 60 min and 80 min. After aging, standard metallographic studies done and microstructure, hardness and density were measured. In wear tests were used 2 ms⁻¹ sliding speed, 2 different loads (25 N and 50 N) and 4 different sliding distance (250 m, 500 m, 750 m and 1000 m). As a result of the studies, the maximum hardness was obtained as 228 HV in the alloy aged 60 min. In the density results, the density decreased with increasing aging time and the lowest density value was measured as (6.08 gr/cm³) in the alloy aged for 60 min. In the wear test results, while the lowest weight loss was obtained in the alloy aged 60 min, the highest weight loss was obtained in the alloy aged 80 min.

Key Words

“Cu-Al-Ni alloy, aging, powder metallurgy, wear”

1. Giriş

Bileşiminde %9-12 alüminyum ve %6 ya kadar demir ve nikel içeren bakır alaşımları ticari Cu-Al-Ni alaşımlarının (nikel alüminyum bronzlarının) önemli bir grubudur. Bu alaşımlar özellikle yüksek mukavemeti ve iyi sönümleme kapasitesine (çeliğe kıyasla iki kat daha fazla) sahiptir. Bununla birlikte bu alaşımlar iyi korozyon ve aşınma direnci gösterir. Cu-Al-Ni alaşımlarının sağladığı bu üstün özellikleri nedeniyle sınıftaki en kullanışlı mühendislik malzemelerinden biri yapmaktadır (Yaseen vd. 2018). Cu-Al-Ni alaşımları havacılık denizcilik ve petrol endüstrilerinde yaygın kullanım alanları bulmaktadır. Cu-Al-Ni alaşımları havacılık sektöründe iniş takımı (Yaseen vd. 2018), denizcilik sektöründe gemi pervaneleri, pompalar ve valfler (Şimşek vd., 2020), petrol ve gaz endüstrilerinde kıvılcım çıkarmayan aletler, vanalar (Richardson, 2016) gibi farklı uygulamalarda yaygın kullanım alanları bulmaktadır. Cu-Al-Ni alaşımı üretiminde klasik döküm yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Cu-Al-Ni alaşımları çok fazlı alaşımlar olduğundan ısı işlemlere uygundur. Literatürde Cu-Al-Ni alaşımlarında ısı işlemlerin etkisini üzerine birçok araştırma bulunmaktadır. Jain ve Nigam (2013), yaptıkları bir çalışmada döküm yöntemiyle ürettikleri Cu-Al-Ni alaşımlarının farklı sıcaklık ve sürelerde çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemi uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda, alaşımın sertliği, döküme göre çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemlerinden sonra arttığını belirtmişlerdir. En yüksek sertliğin 400 °C sıcaklıkta 3 saat yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımında elde ettiklerini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, Yasees vd., (2018) yaptıkları bir çalışmada sıcak dövme Cu-Al-Ni alaşımlarının soğutma hızının mikroyapı ve tribolojik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlarda, fırında oda sıcaklığına soğutulan Cu-Al-Ni alaşımlarının farklı parametrelerle ısı işlem uygulanan Cu-Al-Ni alaşımlarına göre daha iyi tribolojik özellik gösterdiğini rapor etmişlerdir.

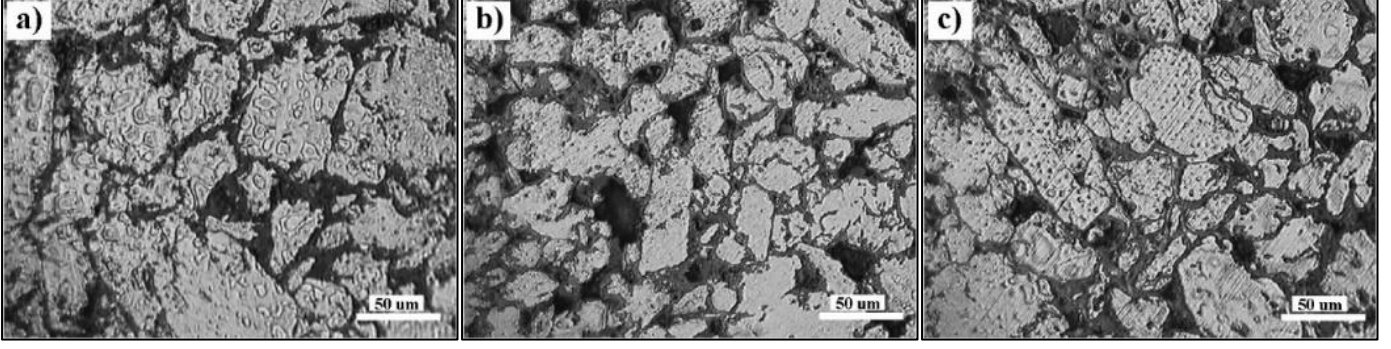
Yapılan bu çalışmada, bir toz metalurjisi yöntemi olan mekanik alaşımlama (MA) yöntemiyle üretilen Cu-Al-Ni alaşımlarının farklı yaşlandırma sürelerinin sertlik ve tribolojik özelliklerine etkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

2. Malzeme ve Metod

Çalışmada mekanik alaşımlama yöntemiyle üretilen Cu-Al-Ni alaşımlarının farklı sürelerde yaşlandırma işleminin sertlik yoğunluk ve aşınma davranışları incelenmiştir. Üretilen Cu-Al-Ni alaşımı (Al bronz) % ağırlıkça 82 Cu, 10 Al, 3 Fe ve 5 Ni kimyasal bileşimine sahiptir. Belirtilen kimyasal bileşime sahip tozların alaşımlama işlemi, atritör tipi mekanik alaşımlama cihazında 304-L paslanmaz çelik öğütme hücreinde yapılmıştır. Mekanik alaşımlama işlemi, 8 mm çapında paslanmaz çelik bilye, 10:1 bilye toz oranı, %50 kap doluluk oranı ve 120 dk alaşımlama süresi kullanılmıştır. Alaşımlama işlemi argon atmosferinde yapılmıştır. Mekanik alaşımlanan tozlar tek yönlü hidrolik pres kullanılarak Ø10x6 mm boyutlarında 600 MPa basınç altında soğuk preslenerek ham numuneler üretilmiştir. Presleme işlemi sonrasında numunenin kalıptan çıkarılırken hem kalıbın hemde numunenin olası hasarı önlemek için yağlayıcı olarak çinko stearat kullanılmıştır. Üretilen ham numuneler 950 °C sıcaklıkta 60 dk sürede sinterlenmiş ve fırın içerisinde oda sıcaklığına soğutulmuştur. Sinterleme işleminin ardından 900 °C sıcaklıkta 8 saat solüsyona alınan numuneler suda hızlı şekilde oda sıcaklığına soğutulmuştur. Solüsyona alma işlemi sonrasında 500 °C sıcaklıkta 3 farklı sürede (20 dk, 40 dk ve 80 dk) yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Yaşlandırma işleminde belirlenen sıcaklıkta belirlenen süre bekletilen numuneler fırın ortamında oda sıcaklığına soğutulmuştur. Yaşlandırma ısı işlemi sonrasında standart metalografi işlemiyle hazırlanan numuneler 5 gr FeCl₃, 50 ml HCl, and 100 ml H₂O dağılayıcı ile yaklaşık 45-50 sn dağlanmış. Mikroyapı çalışmalarında MEIJI ML 7100 optik mikroskop kullanılmıştır. Ardından numunelerin sertlik ve yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümleri AFFRİ VRSD251 sertlik cihazında her gruptan 3 numuneden 5 farklı noktadan yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinde 10 sn süre ve 5 N yük kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri merkezden dış doğru sıralı olarak yapılmıştır. Yoğunluk ölçümleri Precisa XB200h yoğunluk ölçüm kiti kullanılarak Archimed prensibine göre yapılmıştır. Yoğunluk ölçümleri her gruptan 3 numuneden yapılmış ve ortalama değer kullanılmıştır. Aşınma testleri standart pin-on-disk aşınma test cihazında yapılmıştır. Aşınma testlerinde, 2 ms⁻¹ kayma hızı, 2 farklı yük (25N ve 50N), 4 farklı kayma mesafesi (250m, 500m, 750m ve 1000m) kullanılmıştır. Aşınma testleri öncesinde numune yüzeyleri 3 µm elmas solüsyon ile parlatılmıştır. Aşınma testleri her gruptan 3 numunede tekrarlanmış ve ortalama değer alınmıştır. Karşılık disk olarak 230 mm çapında 25 mm kalınlığında Ç1040 malzemeden ısı işlem uygulanmış 50 Rc sertliğe sahip disk kullanılmıştır. Testlere başlanmadan önce numune ve karşılık disk yüzeyi aseton ile temizlenmiştir. Aşınma testleri sonrasında aşınma yüzeyler incelenerek oluşan aşınma mekanizması belirlenmeye çalışılmıştır.

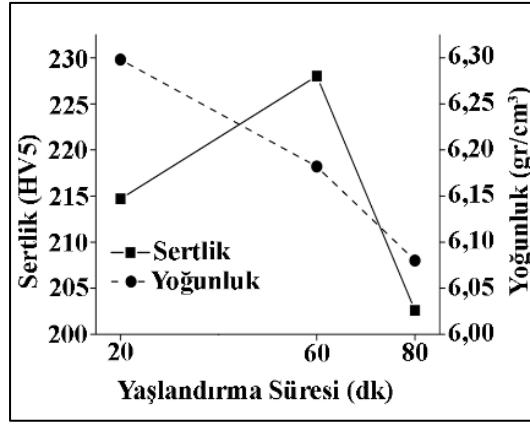
3. Bulgular ve Tartışma

Farklı sürelerde yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımlarının optik mikroskop görüntüleri Şekil 1.'de verilmiştir



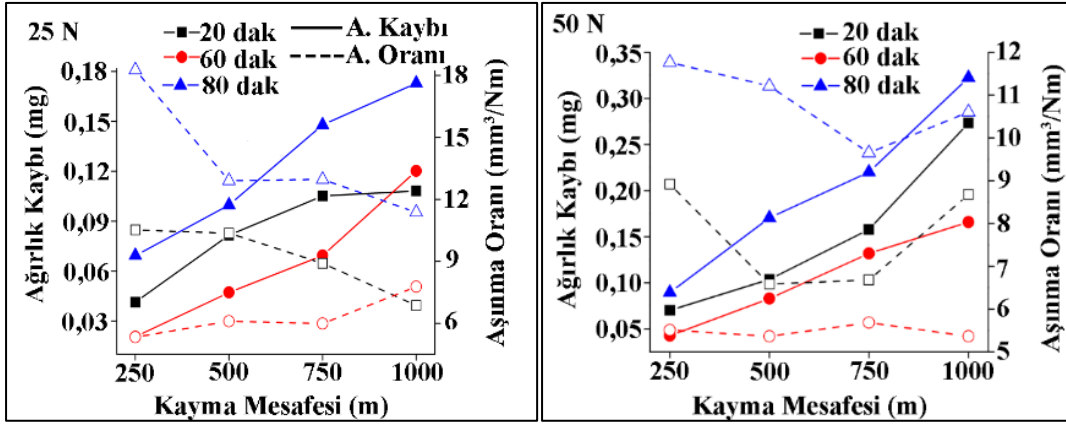
Şekil 1. Yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımlarının optik mikroskop görüntüleri a) 20 dk b) 60 dk ve c) 80 dk

Şekil 1’de farklı sürelerde yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımlarının optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, yapıda farklı bölgelerin (fazların) oluştuğu görülmektedir. Alaşımların yapısında 3 farklı bölgenin olduğu görülmektedir. Açık renkli bölgeler, koyu siyah bölgeler ve tane sınırlarında belirgin olan gri bölgelerdir. Şimşek vd. (2020), tarafından yapılan bir çalışmada mekanik alaşımlama üretilen al bronzu yapısında farklı bölgelerin olduğunu belirtmişlerdir. Bu bölgelerin ana alaşım elementi olan Cu, Fe’ce zengin bölgelerin ve Ni’ ce zengin bölgelerin olduğunu belirtmişlerdir. Buna ek olarak Arifin vd., (2014), tarafından yapılan bir çalışmada ise Fe’ ce zengin bölgelerin genel olarak Fe_3Al olduğu belirtilmiştir. Ayrıca Yaşar ve Altunpark (2009), bu alaşımlara $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında yaşlandırılması ile martenzitik β' - $CuAl_3$ fazında γ_2 ($Cu_{32}Al_{19}$) parçacıklarının da çökmesine yol açacağını belirtmişlerdir. Farklı sürelerde yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımlarının sertlik ve yoğunluk sonuçları Şekil 2’de verilmiştir.



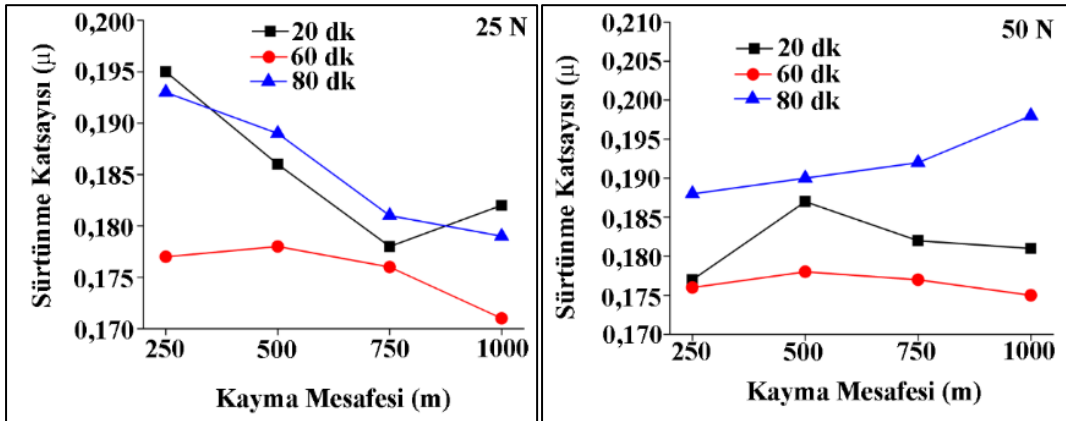
Şekil 2. Farklı sürelerde yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımlarının sertlik ve yoğunluk sonuçları

Şekil 2’de verilen farklı sürelerde yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımlarının sertlik sonuçları incelendiğinde, artan yaşlandırma süresi ile sertliğin arttığı görülmektedir. Yaşlandırma etkisi ile yapıda oluşan ikinci faz partiküllerinin dislokasyon hareketlerini engellemesi sertlik artışına neden olmaktadır (Simsek vd. 2019). Daha önce yapılan bir çalışmada alaşımların sertlik değerinin yapıda oluşan Fe’ce ve Ni’ce zengin bileşiklerden kaynaklandığı belirtilmiştir (Simsek vd.,2020). Ayrıca artan yaşlandırma süresi ile sertlik sonuçlarında tekrardan azalma olduğu görülmektedir. Sertlik ölçümü sonucunda değerlerdeki azalma, artan yaşlandırma süresiyle çökelti boyutlarının büyümesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yaşar ve Altunpak, (2009) tarafından yapılan bir çalışmada artan yaşlandırma sıcaklığı ile sertliğin azaldığını bunun nedeninin malzemenin aşırı yaşlanma periyoduna geçmesinden kaynaklandığı bildirilmiştir. Şekil 2’de verilen yoğunluk grafiği incelendiğinde artan yaşlandırma süresiyle yoğunluğun azaldığı görülmektedir. Yoğunluk sonuçlarındaki bu azalma yapıda oluşan Fe ce zengin ikinci faz partiküllerinin oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Artan yaşlandırma süresiyle yapıda oluşan Fe ve Al içeren bileşiklerin artması yoğunluk değerlerinin azalmasına neden olmaktadır (Simsek vd.,2019). Farklı sürelerde yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımlarının ağırlık kaybı ve aşınma oranı sonuçları Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımının farklı yükler altındaki ağırlık kaybı ve aşınma oranı sonuçları

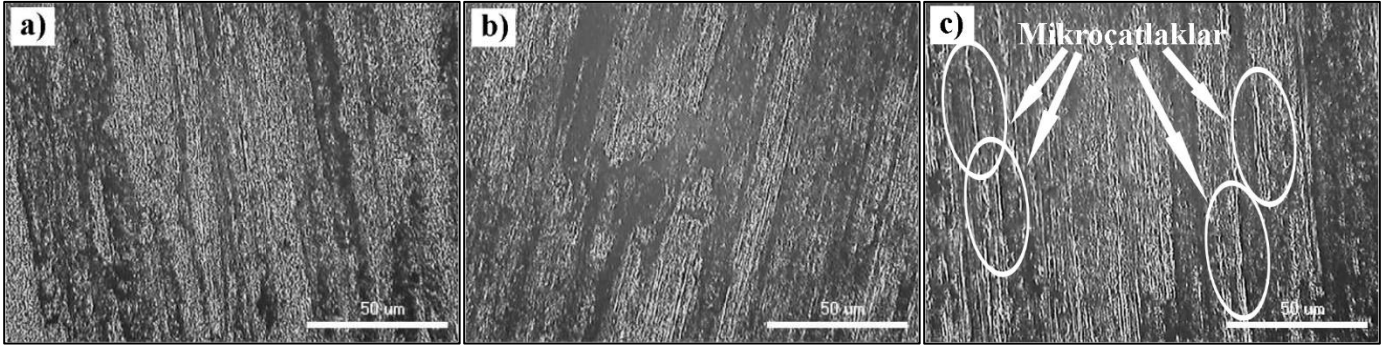
Şekil 3'te verilen 25N yükte elde edilen ağırlık kaybı sonuçları incelendiğinde bütün yaşlandırma sürelerinde artan kayma mesafesiyle ağırlık kaybının azaldığı görülmektedir. En yüksek ağırlık kaybı 80 dk yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımında elde edilirken en düşük ağırlık kaybı 60 dk yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımında elde edilmiştir. 50 N yük altında elde edilen ağırlık kaybı sonuçlarında da benzer durum söz konusudur. Yaşlandırma ile yapıda çökelen ikinci faz parçacıklar sertlik artışı sağlar bu da aşınma direncini artırmaktadır. Şekil 2'de verilen sertlik sonuçları ile ağırlık kaybı sonuçları birbirini desteklemektedir. Bilindiği gibi malzemelerin sertliğindeki artış genel olarak aşınma direncini de artırır (Özyürek ve Tekeli, 2010). 25 N yük altında elde edilen sonuçlarda 60 dk yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımının 1000m kayma mesafesinde ani bir ağırlık artışının olduğu görülmektedir. Ağırlık kaybındaki bu ani artış kayma esnasında numune yüzeyinden iri bir parçacığın kopmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı alaşımın aşınma oranı sonucunda aynı kayma mesafesinde (1000 m) bu durumu desteklemektedir. Verilen grafiklerde aşınma oranı sonuçları incelendiğinde elde edilen aşınma oranlarının genel olarak azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. 50 N yük altında elde edilen aşınma oranı sonuçlarında 20 ve 80 dk yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımında 750 m kayma mesafesine kadar aşınma oranlarının azaldığı görülürken 1000 m kayma mesafesinde aşınma oranlarında ani artışların olduğu görülmektedir. Kayma esnasında numune yüzeyinden kopan iri bir parçacık aşınma oranlarının ani olarak artmasına neden olmaktadır. 60 dk yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımında ise aşınma oranının daha düzensel bir şekilde olduğu görülmektedir. Aşınma oranlarındaki azalmalar kayma sırasında numune disk temas yüzeyinde açığa çıkan ısı etkisiyle oluşan koruyucu oksit tabakasının oluşmasından kaynaklanmaktadır (Sağlam, vd., 2011). Farklı sürelerde yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımının farklı yükler altındaki sürtünme katsayıları Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Farklı sürelerde yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımının farklı yük altındaki sürtünme katsayısı sonuçları

Şekil 4'te verilen farklı sürelerde yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımının farklı yükler altındaki sürtünme katsayısı değişimleri incelendiğinde en yüksek sürtünme katsayısının kullanılan iki yükte de (25 N ve 50 N) 80 dk yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımında elde edildiği görülmektedir. 25 N yük altında elde edilen sürtünme katsayısı sonuçları incelendiğinde sürtünme katsayılarının azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Sürtünme katsayılarındaki bu azalma, aşınma esnasında açığa çıkan ısı etkisiyle numune yüzeyinde oluşan oksit tabakasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı yükte 20 dk yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımında 750 m kayma mesafesinden sonra sürtünme katsayısında ani bir artışın olduğu görülmektedir. Kayma esnasında numuneden kopan mikro talaşların tribolojik sistemden uzaklaşmadan numune yüzeyine tekrardan yapışması (batması) sonucunda yüzey pürüzlülüğünün artması sürtünme katsayısında artmasına neden olmaktadır. Yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde 20 dk, 60 dk ve 80 dk yaşlandırılan alaşımın yüzey pürüzlülüğü sonuçları sırasıyla 2,632 Ra, 2,421 Ra ve 2,982 Ra olarak elde edilmiştir. Şekil 3'te verilen ağırlık kaybı sonuçları incelendiğinde aynı numunenin 750 m kayma mesafesinden sonra ağırlık kaybı artışının yatay olarak ilerlemesi bu durumu

desteklemektedir. Numune yüzeyine batan mikro talaşlar ağırlık kaybı azalmasına neden olurken yüzey pürüzlülüğünü artırarak sürtünme katsayısının artmasına neden olmaktadır. 50 N yük altında elde edilen sürtünme katsayısı sonuçlarında ise 60 dk yaşlandırılan Cu-Al alaşımında sürtünme katsayısının azaldığı görülmektedir. Aynı yükte 20 dk yaşlandırılan alaşımında ise 500 m kayma mesafesinde sürtünme katsayısının arttığı, artan kayma mesafesi ile tekrardan azaldığı görülmektedir. Aşınma testlerini ilk aşamasında numune disk temas yüzeyinde sürtünmeden kaynaklı oluşan kesme gerilmelerinden dolayı sürtünme katsayısı artmaktadır. Bununla birlikte artan kayma mesafesi ile sürtünme katsayısının azalması, numune disk temas yüzeyinde artan ısı ile numune yüzeyinde oluşan koruyucu oksit film tabakasının katı yağlayıcı etkisinden kaynaklanmaktadır (Sımsek, vd., 2019). Farklı sürelerde yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımlarının farklı yük altındaki aşınmış yüzey görüntüleri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Farklı sürelerde yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımlarının 50 N yük altındaki aşınmış yüzey görüntüleri a) 20 dk b) 60 dk c) 80 dk

Şekil 5'te verilen farklı sürelerde yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımlarının farklı yük altındaki aşınmış yüzey görüntüleri incelendiğinde kayma yönüne paralel aşınma çizgileri net olarak görülmektedir. 20 dk yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımının yüzeyinde yüzeye batan aşınma parçacıklarının (beyaz bölgeler) diğer numunelere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum sürtünme katsayısı sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir. Yüzeye batan aşınma parçacıkları, yüzey pürüzlülüğünü artırarak sürtünme katsayısının artmasına neden olmaktadır. 60 dk yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımında ise numune yüzeyinde geniş düzlemsel yüzeylerin olduğu görülmektedir. Yaşlandırma süresinin artmasıyla numune yüzeyinde çatlak oluşumları da görülebilmektedir. Artan yüzey pürüzlülüğü ile numune yüzeyinde kesme gerilmesi bölgesel olarak alaşımın akma gerilmesini aşabilir. Alaşımın akma gerilmesini aşan kesme gerilmeleri yüzeyinde çatlak oluşumuna neden olmaktadır (Zhai, vd., 2017).

4. Sonuçlar

Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen Cu-Al-Ni alaşımlarının yaşlandırma süresinin aşınma davranışları üzerine etkisinin incelendiği çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Üretilen Cu-Al-Ni alaşımlarının mikroyapılarında farklı bölgelerin (fazların) oluştuğu görülmektedir.
- Yaşlandırılan alaşımların sertlikleri yaşlandırma süresine bağlı olarak arttığı görülmüştür. En yüksek sertlik 60 dk yaşlandırılan alaşımında 228 HV olarak elde edilmiştir. Yaşlandırma süresinin 80 dk olmasıyla sertliğin tekrardan azaldığı (202 HV) görülmüştür.
- Farklı sürelerde yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımlarının yoğunluklarının yaşlandırma süresinin artmasıyla azaldığı görülmüştür. En yüksek yoğunluk 20 dk yaşlandırılan alaşımında $6,30 \text{ gr/cm}^3$ elde edilirken, en düşük yoğunluk 80 dk yaşlandırılan alaşımında $6,08 \text{ gr/cm}^3$ olarak elde edilmiştir.
- Farklı sürelerde yaşlandırılan alaşımların ağırlık kaybı sonuçlarında bütün yükler altında en düşük ağırlık kaybı 60 dk yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımında elde edilirken en yüksek ağırlık kaybı 80 dk yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımında elde edilmiştir.
- Farklı sürelerde yaşlandırılan Cu-Al-Ni alaşımlarının aşınma oranı sonuçlarında en yüksek aşınma oranı 80 dk yaşlandırılan alaşımında elde edilirken en düşük aşınma oranı 60 dk yaşlandırılan alaşımında elde edilmiştir.

Bilgilendirme

Bu çalışma III. Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu'nda sunulmuştur.

Referanslar

- Arifin, A., Sulong, A. B., Muhamad, N., Syarif, J., ve Ramli, M. I. (2014). Material processing of hydroxyapatite and titanium alloy (HA/Ti) composite as implant materials using powder metallurgy: a review. *Materials & Design*, 55, 165-175.
- Jain, P., ve Nigam, P. K., (2013). Influence of heat treatment on microstructure and hardness of Nickel Aluminium Bronze (Cu-10Al-5Ni-5Fe). *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 6(4), 16-21.

- Michler, T., ve Naumann, J., (2010). Influence of high pressure hydrogen on the tensile and fatigue properties of a high strength Cu–Al–Ni–Fe alloy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(20), 11373-11377.
- Özyürek & Tekeli, S. (2010). An Investigation on Wear Resistance of SiCp-Reinforced Aluminium Composites Produced by Mechanical Alloying Method. *Science and Engineering of Composite Materials*, 17(1), 31-38.
- Richardson, I. (2016). Guide to nickel aluminium bronze for engineers. Copper Development Association.
- Sağlam, I., Özyürek, D., ve Çetinkaya, K. (2011). Effect of ageing treatment on wear properties and electrical conductivity of Cu-Cr-Zr alloy. *Bulletin of Materials Science*, 34(7), 1465-1470.
- Şimşek, D., Colak, N. Y., Şimşek, I., ve Ozyurek, D. (2020). Dry Sliding Wear Behaviors of Iron Addition to by Nickel–Aluminum Bronze Produced Mechanical Alloying. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73(2), 319-326.
- Şimşek, I., Şimşek, D., Ozyurek, D., ve Tekeli, S. (2019). The effect of the aging time on microstructure and mechanical properties of the AA7075 alloy after T6 heat treatment. *Metallofizika Noveishie Tekhnology*, 41(6), 817-824.
- Torralba, J. D., Da Costa, C. E., ve Velasco, F. (2003). P/M aluminum matrix composites: an overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 133(1-2), 203-206.
- Vu, A. T., Nguyen, D. N., Mai, B. L., ve Mai, K. P. (2020). A study on the phase transformation of BCuAl9Fe4 alloy. *International Journal of Modern Physics B*, 34(22-24), 2040140
- Yaşar, M., ve Altunpak, Y. (2009). The effect of aging heat treatment on the sliding wear behaviour of Cu–Al–Fe alloys. *Materials & Design*, 30(3), 878-884.
- Yaseen, M. K., Mansoor, M., Ansari, H. A., Hussain, S., ve Khan, S., (2018). Effect of heat treatment on tribological characteristics of CuAl10Ni5Fe4 nickel aluminum bronze. In *Key Engineering Materials*, 778, 61-67.
- Zhai, W., Lu, W., Zhang, P., Zhou, M., Liu, X., ve Zhou, L., (2017). Microstructure, mechanical and tribological properties of nickel-aluminium bronze alloys developed via gas-atomization and spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 707, 325-336.



Developing A New Scheduling Algorithm for Wi-Fi 6 Technology Based on Machine Learning

İbrahim Masri*,¹² , Erdal Erdal² 

¹Huawei R&D Center, Istanbul, Turkey

²Faculty of Engineering and Architecture, Computer Engineering Department, Kırıkkale University, Kırıkkale, Turkey

Başvuru/Received: 27/05/2021

Kabul / Accepted: 12/11/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Abstract

Wireless mobile communications have experienced tremendous growth in the number of users, data rate requirements, and coverage in recent years. As the data rate and system throughput requirements increase, researchers and system designers need to develop efficient methods to meet these requirements with reasonable effort and cost. In this paper, we discuss an efficient approach to deal with diminishing the overhead of Downlink (DL) and feedback using Machine Learning (ML) for 802.11ax. In particular, the antennas that are related to the router were divided into two gatherings. We used good samples of Channel State Information (CSI) that were taken from an open-access dataset and used it to train our linear regression model. The first group of antennas was used as input to our model and the second group was used as the output of the model. In the online mode, we need to estimate only one group of antennas and for the second group, we can predict it using the trained linear regression model by using the estimated CSI group as input to the model. Therefore, the output of the model using as the CSI for the second group. In this way, we can reduce the overhead of the DL in the router as shown in the result table so the router will work more efficiently compared to the existing systems. From the results table in the last section, the average sum rate has increased between 20% and 30%.

Key Words

“802.11ax Standard, Wireless Network, Wi-Fi 6, Leaner Regression, Machine Learning, Scheduling Algorithm”

1. Introduction

The Internet has been dominated by things we could not live without, according to an Opinium Research online survey conducted by Direct Line, which asked some people to rank the things you could not live without. Some of those things were family, food, TV, cars... and more. Of course, Wi-Fi (Internet) was also one of those things. The result is shown in Figure 1. We can see that when asked "How important is Wi-Fi in (daily) life?" so these days, when we move to a new house the first thing that we think about it is the Internet. therefore we are spending a large time surfing the Internet more than the time than spending it with our family or eating food,, with the rule nowadays being "No Wi-Fi, no homework"(Thomas, 2015; Newsroom, 2014).

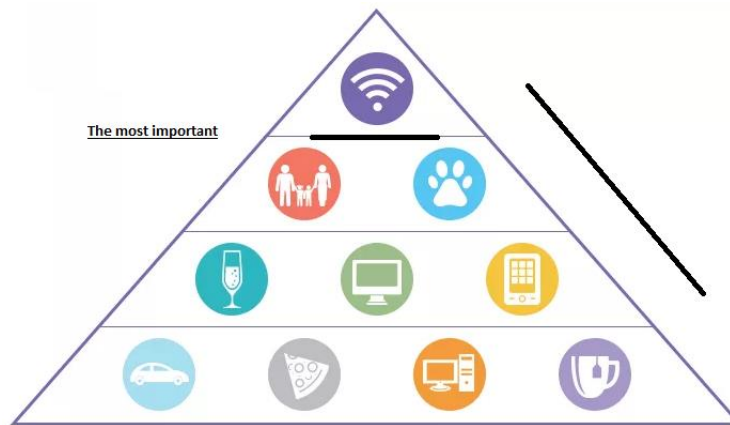


Figure 1. Important things in the people's live (Thomas, 2015)

We use the Internet on portable devices such as smartphones (cell phones), tablets, or PCs. To make it more convenient for us, we use Wi-Fi instead of using wired connections like Ethernet. In fact, we make connections with a device connected to the Internet called a 'router'. Wi-Fi uses radio waves to transmit data on specific frequencies, usually on 2.4 GHz and 5 GHz. Multiple channels, referred to as the frequency range in which wireless devices can operate, help to spread the load so that signals from individual devices are not overloaded or interrupted by other traffic, although this does happen in busy networks (Newsroom, 2014; Stallings & Beard, 2016).

Wi-Fi has become ubiquitous in our lives: in universities, homes, stadiums, subways, meetings, and more. As mentioned earlier, we connect to a router through which we can use the Internet. So we need to find a good scheduling algorithm to make the router work fast and improve its efficiency and quality of service (QoS) (Stallings & Beard, 2016; Lodwal et al., 2019; Gopalan, Caramanis, Shakkottai, et al., 2012).

Starting from this topic, we come to the concept of MIMO, which means "multiple-input multiple-output," where the router can serve multiple users simultaneously. The concept of multiple-output is so important in making Wi-Fi more efficient and faster. It was developed during the generations of the Wi-Fi (Stallings & Beard, 2016; K. Lee & Kim, 2015).

In order to develop efficient algorithms for MIMO user scheduling, the following two concepts must be mentioned:

- Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM): or named multicarrier modulation. each channel has multiple carrier signals on the frequency domain but in the same period, it used to transmit just the packets are related to one user as shown in Figure 2.
- Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA): it is a type of multi-user version of the OFDM digital modulation plan. Here multiple access is accomplished in OFDMA by allocating subsets of subcarriers to particular managers. Therefore, it transmits packets by using the frequency and time domains together as presented in Figure 3.

The last generation of Wi-Fi, called IEEE 802.11ax, used OFDMA technology. 802.11ax therefore provides for the introduction of OFDMA into Wi-Fi first. It allows the use of multiplexing users in the frequency range (Afaqui et al., 2016; Omar et al., 2016; Wang & Psounis, 2018).

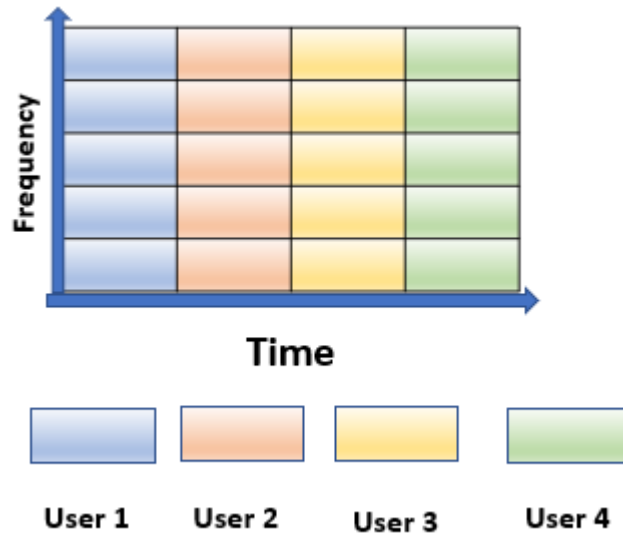


Figure 2. OFDM scheme

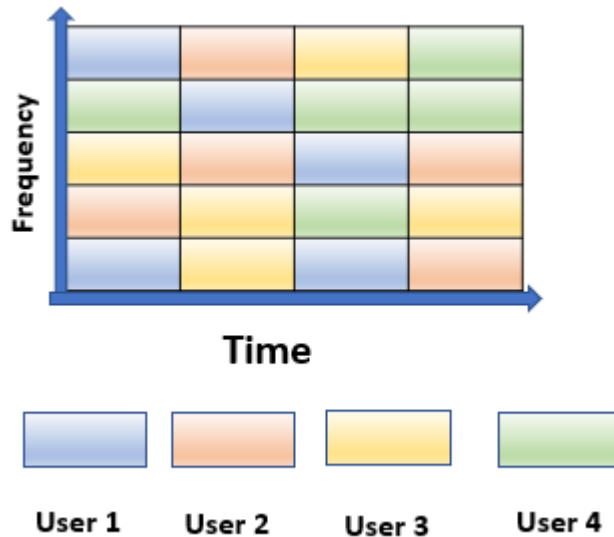


Figure 3. OFDMA scheme

In IEEE 802.11ax, subcarriers are isolated into Resource Units (RUs) for scheduling. Thus, the bandwidth contains subsets of subcarriers, all of which are called RUs. We can also say that the RU is a group of sections called “tones” assigned to a station (STA). The size of the RU has a certain number of tones according to IEEE 802.11ax. The amount of RUs available depends on the channel width (CISCO(team), 2018; Wang & Psounis, 2018; Karthik & Palaniswamy, 2018).

Nowadays, machine learning (ML) has a great importance in different areas of life, where it receives enormous attention in both industry and academia due to its ability to analyze data and make fast and accurate decisions (Bi et al., 2015). So, to find an optimal algorithm for user scheduling in Wi-Fi, we should think about working with ML, where ML has shown great utility in solving some problems in wireless communication, as we will see in the literature section.

This work concentrates on developing a novel resource distribution and scheduling algorithm in a downlink based on artificial intelligence for Wi-Fi 6, and tests it using MATLAB and the network simulator ns-3. The capability of ML is used to quickly analyze data and make appropriate decisions to obtain a more efficient and effective algorithm in crowded systems. Our basic idea is to combine ML, which achieves the best efficiency, with a previous resource scheduling and allocation algorithm based on Wi-Fi 6 to develop a new, more efficient algorithm.

The remainder of this article is organized as follows. Section 2 speaking about previous work. In Section 3 presents a technical background that contributes to the understanding of our work. While in Section 4, we present our new resource allocation and scheduling algorithm based on the submitted materials and methods. Simulation results are shown in Section 5. In Section 6, we are showing a conclusion of our work.

2. Related Work

One of the critical issues in wireless networks is management and resource allocation to achieve more effective throughput and perfect fairness among users, where throughput and fairness are traditional benchmarks for evaluating the performance of a wireless network. Therefore, there are a lot of studies on this topic to improve the performance of the wireless network (Pilosof et al., 2003; Bottigliengo et al., 2004; Bhagwat et al., 1996; Urvoy-Keller & Beylot, 2008; Yao et al., 2015).

From the perspective of previous studies on new techniques of wireless planning, they can be mainly divided into the following categories:

2.1. Cellular Network Scheduling Based

Mobile networks are constantly being developed to make them more efficient and suitable for applications with high data rates. The most important technology used in this perspective is Long Term Evolution (LTE). Packet scheduling algorithm in LTE/LTE Advanced has been well studied in previous work (Tabany & Guy, 2015; Md Zain et al., 2015; Zubairi et al., 2015; Baghi & Daneshvar Farzanegan, 2015; Liu & Chen, 2015; Shukla & Bhatia, 2018; Bazzi et al., 2019; Huang et al., 2019; Uyan & Gungor, 2019). In (Shukla & Bhatia, 2018), the work was about reducing high packet loss and improve it, which will improve the QoS, by made an algorithm dependent on packet priority. In (Bazzi et al., 2019) on the other hand, the new technology IEEE 802.11 p, which includes LTE, was studied and compared with LTE direct vehicle-to-vehicle (LTE-V2V) communication in the article "Analytical Investigation of Two Benchmark Resource Allocation Algorithms for LTE-V2V".

In (Huang et al., 2019), on the other hand, the issue was Carrier-Sensing Adaptive Transmission (CSAT), that affects the synchronization of LTE and Wi-Fi in unlicensed spectrum. The main problem between LTE and Wi-Fi is that radio resources need to be shared among multiple channels and many sub-channels, so the solution is to develop an optimal scheduling algorithm to allocate radio resources in real time. Thus, the UL and DL rate constraints of each LTE user could be met by optimally allocating radio resources at the sub-channel and channel level.

2.2. Wi-Fi Scheduling Based

Because of the importance of this issue, Wi-Fi scheduling has been well studied in previous work. We have a problem of measuring the execution of the scheduling algorithm in Wi-Fi, where efficiency and fairness are the most important measures of the performance of any Wi-Fi scheduling algorithm. To improve the performance of Wi-Fi, we need to achieve high efficiency and high fairness, which are often in conflict with each other. In other words, more efficiency leads to less fairness and vice versa (Lodwal et al., 2019; Yao et al., 2015; Tabany & Guy, 2015; Pantelidou & Ephremides, 2009; Walrand, 2010).

2.2.1. Packet scheduling

In (Yao et al., 2015) presents a new algorithm used for packet scheduling, called DAT in a crowded 802.11 WLAN. This work allows access points (APs) to automatically modify the time windows for supplying each active WLAN, dynamically shifting the weight between fairness and efficiency.

In (Gabale et al., 2013), on the other hand, an overview of scheduling algorithms in wireless mesh networks was given. In (Das et al., 2013), an overview of the most suitable scheduling algorithm for WIMAX-Wi-Fi was also given. Here in (Kathrine & Raj, 2012) an overview of packet scheduling in different networks has been done. Designs the RAS algorithm by fully utilizing the high-speed channel rate of an 802.11 n Wi-Fi router (Han et al., 2015).

To improve the efficiency of Wi-Fi, consideration was given to how we could serve multiple clients simultaneously. Initially, a technique was thought of to send packets from one transmitter to multiple receivers by using multiple antennas at the transmitter AP. So, in (Zhang et al., 2013), the study was concerned with the "one-sender-multiple-receiver (OSMR)" transmission technique. After that, attention was focused on a new technique called Multiple Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO), which includes two types: Multi-user-Multi-input-Multi-output (MU-MIMO) transmission and Single-user-Multi-input-Multi-output (SU-MIMO) transmission. In (K. Lee & Kim, 2015), a new MU-MIMO MAC protocol called 802.11ac+ is proposed, which includes a novel user scheduling algorithm that uses channel hint-based polling and active CSI feedback. The algorithm determines the best user set during the CSI feedback phase so that AP does not receive CSI from all users, thus obtaining more efficiency. In (Shen et al., 2015), a novel MU-MIMO MAC, called SIEVE, is presented to search for the best group. Where in (Gopalan, Caramanis, & Shakkottai, 2012) selecting subsets with the largest queue sum of squares followed by selecting a user with Max-Weight within the subset is throughput optimal with CSI.

2.2.2. Power scheduling

Improve AP and client power consumption by tuning AP to allow clients to remain in low-power mode whenever possible to consume less power. Due to the importance of an energy-efficient Wi-Fi network, energy-efficient scheduling in AP has been well studied in the literature (Anand et al., 2005; Rozner et al., 2010; Dogar et al., 2010; Manweiler & Roy Choudhury, 2012; Enayet et al., 2016). This paper focuses on scheduling and resource allocation on Ap in Wi-Fi 6, where energy saving mode is not enabled.

2.3. 802.11ax Scheduling Based

The 802.11ax is a new technique in the Wi-Fi with OFDMA and Multi-User Multiple Inputs Multiple Outputs (MU-MIMO), so most previous work was to explore the difference that exists at the physical layer and energy saving advances through the tutorial (Khorov et al., 2019; Bellalta & Kosek-Szott, 2019), surveys (Qu et al., 2019) and the main challenges (Afaqui et al., 2016), performance analysis (K. H. Lee, 2019a), QoS evaluation (Sanchez-Mahecha et al., 2018), and solving some of the problems faced by the IoT when using 802.11ax (Kwon et al., 2018).

Also, in previous work, researchers had developed some scheduling algorithms for different objectives, such as maximizing user sum rate (Wang & Psounis, 2018), maximizing QoS throughput (Chao et al., 2015; Islam & Kashem, 2019), and trying to reduce real-time delay to less than one millisecond (Avdotin et al., 2019). Some scheduling algorithms have been developed using different techniques, such as in (Afaqui et al., 2015) based on the average received signal strength, this algorithm dynamically adjusts the carrier sense threshold (CST) using an adaptation of IEEE 802.11e Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) (Karthik & Palaniswamy, 2018) based on a wireless distributed computing system (Ramji et al., 2014) based on multi-user transmission (Ghanem et al., 2019). In (K. H. Lee, 2019b), the AP estimates and collects multiple CSI values from the uplink OFDMA framework. Where in (Li et al., 2018) scheduling video streaming.

Some previous works addressed the optimization of resource allocation and scheduling algorithms in the downlink through many methods, such as the Lagrangian dual decomposition method (Seong et al., 2006), TCP goodput optimization (Sharon & Alpert, 2018), and the use of nonorthogonal multiple access (NOMA) schemes (Tseng et al., 2020).

Some work addressed improving scheduling in the uplink by minimizing delay (Bankov et al., 2017; Bankov et al., 2018) and improving scheduling strategies for TCP traffic (Sharon & Alpert, 2019). While in (Naik et al., 2018) the performance analysis of uplink multi-user OFDMA and in (Sharon & Alpert, 2017) the scheduling strategies and throughput optimization were explained. Here In (Dovelos & Bellalta, 2018), the original stochastic utility maximization problem is solved while throughput is maximized (Bhattarai et al., 2019).

2.4. Wi-Fi Scheduling with ML Based

In (Cui et al., 2019), a deep learning methodology was applied to circumvent channel estimation and efficiently schedule links based solely on the geographic locations of transmitters and receivers, eliminating the costly channel estimation phase. In (Cao et al., 2018), Deep Belief Networks (DBNs) and Support Vector Machines (SVMs) were applied to develop an optimal algorithm for scheduling and power control. In (Dong et al., 2018), Support Vector Regression (SVR) and LR are used to reduce the overhead of downlink channel estimation and feedback by dividing the indices of antennas at the base station (BS) into two groups. The estimation (prediction) of CSI in the second set is then done using CSI, which was considered in the first set. In (Ye et al., 2018), Deep Learning is used for signal detection and channel estimation OFDM structures. And in (Utami & Iskandar, 2019a) using Genetic Algorithm for Resource Allocation in OFDMA and using Genetic Algorithm to resource allocation Analysis in LTE MIMO-OFDMA Cellular System (Utami & Iskandar, 2019b).

Another direction in previous work is to improve throughput and fairness using an online learning-based methodology over a unified logical control design. In (Karmakar et al., 2019), a reinforced learning strategy is used to dynamically select the most appropriate configurations at regular intervals to obtain optimal intellectual MU-MIMO user choice with connection modification.

3. Technical Background

3.1. Wi-Fi History

In the table 1 we can see the major different between the standards of Wi-Fi and give a brief overview of the most recently accepted technologies outlined from the past to the present. Other technologies (802.11ax), 802.11ay and 802.11az- are still in the research process.

Wi-Fi 6 is the latest form, as famous as 802.11ax, and it will be standardized in 2019. It will increase speed and reduce latency by about 30 percent. The main point is that it can provide more data to each device at the same time. It can be used efficiently where there are many devices, such as at trade shows, press conferences, stadiums, and the like. Due to the increase of data and devices, stronger networks will be needed in the future.

Table 1. The major different between the standard Wi-Fi

Name of Wifi	Year	Data Rate (Mbps)	Frequency Band	Chanel Bandwidth	Modulation Signal Encoding	Spectrum Protocol	Antenna Configuration
802.11a	1999	54	5 GHz	20 MHz	64 QAM	OFDM	1X1 SISO
802.11b	1999	11	2.4 GHz	20 MHz	11 CCK	DSSS	1X1 SISO
802.11g	2003	54	2.4 GHz	20 MHz	64 QAM	DSSS, OFDM	1X1 SISO
802.11n	2009	65- 600	2.4 or 5 GHz	20,40 MHz	64 QAM	OFDM	4X4 MIMO
802.11ac	2012	78-3.2 Gbps	5 GHz	40,80,160 MHz	256 QAM	SU-OFDM	8X8 MIMO, MU-MIMO
80.11ad	2014	6.76 Gbps	60 GHz	2160 MHz	64 QAM	SU-OFDM	1X1 SISO

3.2. Wi-Fi MU-MIMO System

MU-MIMO increases wireless capacity because AP can send packets to multiple users simultaneously (beamform) by equipping them with multiple antennas. The important question in this technique is "How do we select the user group to process in real time in the scheduling process?", or in other words, we select the beamforming group. An incorrect method of selecting a sending group can result in decrease the data rates and decrease capacity instead of improving it. To find a better beamforming group, we need to calculate the CSI array, which contains the data about the status of the links between the users' antennas and the AP antennas (Shen et al., 2015).

3.3. Wi-Fi Scheduling and Resource Allocation Problem (SRA)

In wireless systems, resources such as sending signals and transmit power are restricted, so resource management and allocation is constantly a crucial problem. In recent years, this issue has become more complex with new techniques such as Long-Term Evolution (LTE), MIMO, MU-MIMO, OFDM and OFDMA (802.11ax). Here we have small channels called subcarriers and RU. Our task is to determine the size and location of these subcarriers and then consider how best to distribute users (user groups) across these subcarriers. Therefore, there are many works in the literature to solve this problem, and due to the conditions of each standard, we cannot apply the scheduling algorithm to all of them. For example, in the LTE scheduling algorithm, the user can assign multiple subchannels and the area of the subchannels can be change, while the location of the RUs is restricted and only a single RU can be allocated to a user in the 802.11ax algorithm (Wang & Psounis, 2018; Bhattarai et al., 2019).

3.4. LR model in ML

ML was launched in 1950 and means that a computer can learn from input data by preprocessing the data and extracting features from it to use as a training set. So, the ML process involves input data (dataset) from which we then extract the features and then build our prediction model or classification model. There are several types of ML: Supervised ML, here we have input and output used in prediction and classification problems. Unsupervised ML, here we have only input which is used in clustering. In regression model, we have a set of data as input which are related to each other. After we have processed the input data and obtained the model, if we input new data into the model, we can regress the desired result.

3.5. 802.11ax Standard

802.11ax supports this type of transmission in Wi-Fi: MU-MIMO, OFDMA and MU-MIMO & OFDMA together. 802.11ax comes with several features: OFDMA, MU-MIMO, Overlapping Basic Service Set (OBSS), Target wake Time (TWT), 1024 QAM modulation and longer OFDM symbols. We will explain some of them:

OFDMA is a multiple access technique based on orthogonal frequency division multiplexing (OFDM). OFDM and OFDMA divide the entire bandwidth into small subchannels called subcarriers. The difference between OFDMA and OFDM is that in OFDM, a single user is assigned all subcarriers, whereas in OFDMA, a user or group of users is assigned only a subset of subcarriers, called RU, and data is transmitted only on that RU. Thus, in this way, a frame can multiplex multiple users or user groups simultaneously. The bandwidths 20MHz, 40MHz, 80MHz, 80+80MHz, and 160 MHz are supported by 802.11ax (CISCO (team), 2018; Wang & Psounis, 2018). As we mentioned earlier, OFDMA transmission divides the bandwidth into multiple RUs. Then, the RUs can be divided smaller and smaller, up to 26 subcarriers, and the size of RUs in the frequency domain can be: 26, 52, 160, 242, 484, or 996 subcarriers (Khorov et al., 2019). Figure 4 presents the positions of RUs in a 40MHz example HE PPDU.

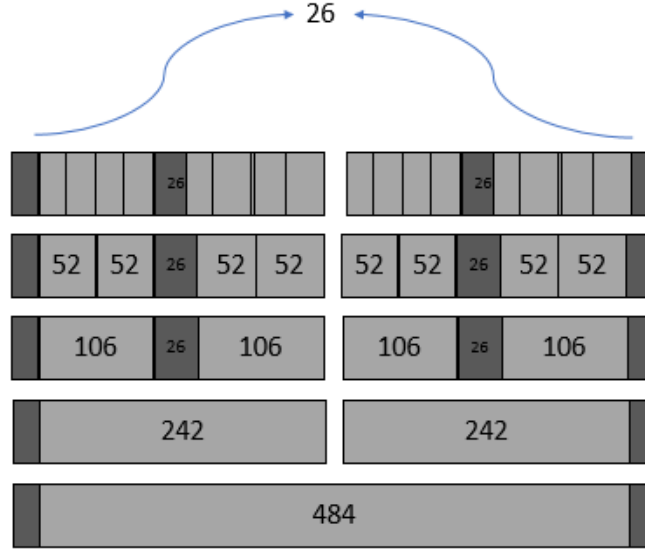


Figure 4. RU locations in a 40MHz HE PPDU

4. Material and Methods

4.1. Estimation and prediction of CSI

To estimate the CSI as a function of the CSI to devices connected to the same AP in real time, we need to build an estimation model. To build the estimation model, we can divide the process into three steps, as we can read in reference (Dong et al., 2018).

- **Offline regression model training:**

We used a well estimated CSI as a dataset. Let H be the CSI array between the AP antennas and users' antennas be the training set matrix based on Least-square (LS) and during N channel realizations $H = [h_1^T, \dots, h_N^T]^T$. Then we divided the list of antennas at the AP into two subsets, A and B . Let $U = \{1, 2, \dots, M\}$ be the set of the antennas in the AP, where $A \cup B = U$ and $A \cap B = \emptyset$ and the $A(i) = U(A(i))$ and $B(i) = U(B(i))$.

After that we divide the H matrix into two submatrices as $H_I = [H]^A$ and $H_O = [H]^B$. We will define two regression model M_i^{Re} , reveals the relationship between the CSI of the antennas in A and the real part of the CSI of the $B(i)$ th antenna and M_i^{Im} , reveals the relationship between the CSI of the antennas in A and the image part of the CSI of the $B(i)$ th antenna:

$[Re\{H_I\}, Jm\{H_I\}]$ as input to M_i^{Re} model and the real part of i th column of H_O . That mean $Re\{H_O(:, i)\}$ as output to M_i^{Re} model.

$[Re\{H_I\}, Jm\{H_I\}]$ as input to M_i^{Im} model and the real part of i th column of H_O . That mean $Jm\{H_O(:, i)\}$ as output to M_i^{Im} model.

Let $\tilde{h}_{n,A} = [Re\{[h_n]^A\}, Jm\{[h_n]^A\}] \in R^{1 \times 2|A|}$ the LR model, where the equation of get predict value of real part of the CSI of the $B(i)$ th antenna is given by: $f(\tilde{h}_{n,A}) = \tilde{h}_{n,A} \alpha_i + \beta_i, \quad i = 1, \dots, |B|$

In a more Tractable way to training the LR. Let $H_I = [Re\{H_I\}, Jm\{H_I\}, 1] \in R^{N \times (2|A|+1)}$ and $K_i^{Re} = [\alpha_{i1}, \dots, \alpha_{(2|A|)}, \beta] \in R^{N \times 1}$. Then the last equation becomes: $f(H_I(n, :)) = H_I(n, :)K_i^{Re}, \quad i = 1, \dots, |B|$

Then the optimal $K_i^{Re,*}$ is given by: $K_i^{Re,*} = (H_I^T H_I)^{-1} H_I^T Re\{H_O(:, i)\}$. The optimal $K_i^{Im,*}$ is given by: $K_i^{Im,*} = (H_I^T H_I)^{-1} H_I^T Jm\{H_O(:, i)\}$

- **Online CSI Estimation:**

Here in this step, the user can get the CSI related to the antennas in the A group by applying the LS model prediction as: $\tilde{h}_A = \gamma X^H (X X^H)^{-1}$. Then the calculated $|A|$ - channel vector, \tilde{h}_A , is send to the AP. Let \hat{h}_A be the channel vector feedback sinding by the user.

• **Online CSI Prediction:**

As we mentioned above, the \hat{h}_A will be selected to guess CSI of transmitters in B as $\hat{h}_B: \hat{h}_B(i) = M_i^{Re}([Re(\hat{h}_A), Im(\hat{h}_A)]) + j M_i^{Im}([Re(\hat{h}_A), Im(\hat{h}_A)])$.

4.2. User Grouping of MU-MIMO:

As we mentioned earlier, unwise selection of beamforming groups can lead to a reduction in overall capacity rather than an increase in it. Here, the large search space presents a challenge. Therefore, to find the best beamforming group, we need more complex algorithms. We will use the SIEVE user selection algorithm that searches for the best beamforming group. The user selection of SIEVE keeps a small set of good candidates at a time, depending on the general branch-and-bound algorithm, and then iteratively refines this candidate set. Figure 5 presents the enumeration tree of the procedure to solve the problem, where each vertex in the i -level of the tree is a subset of users of size i . The subset of users is the number of users in the i -level of the tree. The subset includes the users selected along the branch to the root. Then, only the top K candidates in each branch level are kept and the bad combinations are filtered out (Shen et al., 2015).

4.3. 802.11ax Scheduling Algorithm

As mentioned earlier, the 802.11ax standard has high efficiency compared to the old standards due to the use of OFDMA. The frequency band is separated into several RUs that have a certain size. We will use the recursive scheduling algorithm described in (Wang & Psounis, 2018) by 'kaidongw and kpsounis'. The pseudocode of the algorithm is shown in Figure 6. As mentioned earlier, the 802.11ax standard has high efficiency compared to the legacy standards by using OFDMA. The frequency band is divided into several RUs, which have a certain size. We will use the recursive scheduling algorithm described in (Wang & Psounis, 2018) by 'kaidongw and kpsounis'. The pseudocode of the algorithm is shown in Figure 6.

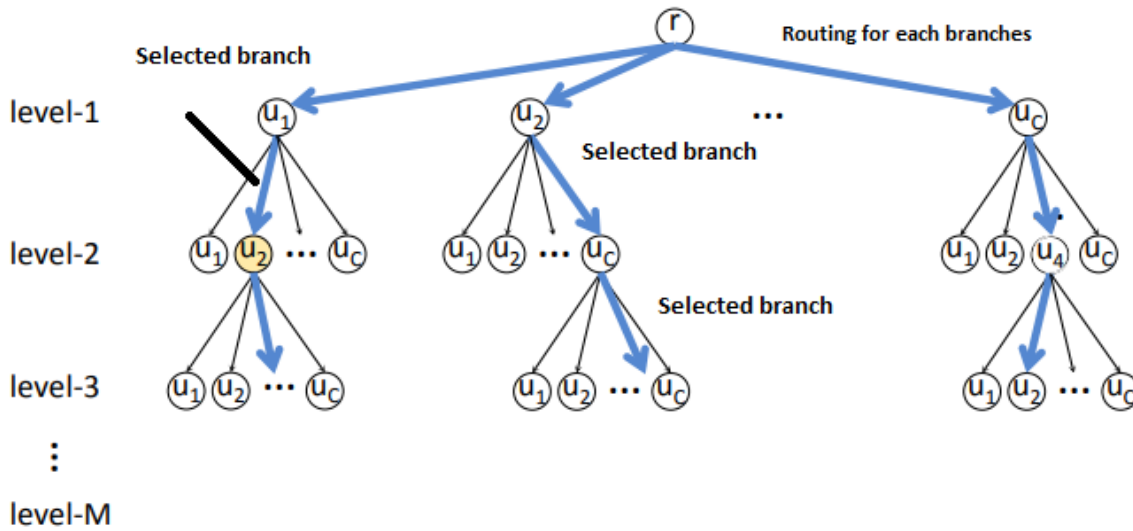


Figure 5. SIEVE search tree (Shen et al., 2015)

4.4. Propose Algorithm

First, we divided the antennas of AP into two subgroups and then estimated the CSI of the first group (calculated in the usual way). Then we used CSI of the first subset as input to the regression model to predict the CSI for the second subset, as shown in Figure 8. In this way, we now have the CSI of all antennas. Then we applied the 802.11ax planning algorithm, as shown in Figure 6, and applied the user selection method for the RUs equal to or greater than 106 subcarriers. The pseudocode is shown in Figure 7.

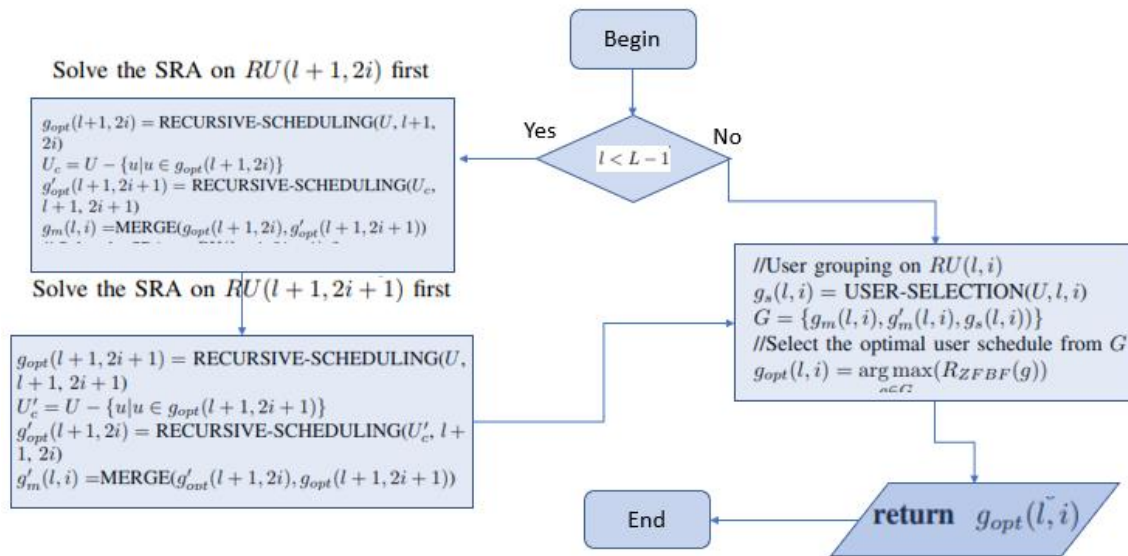


Figure 6. Pseudo code of recursive-scheduling algorithm (Wang & Psounis, 2018)

- 1: //divide the AP antennas into two subsets
- 2: // let M number of antennas in the AP and the subsets are A, B
- 3: // Let H_A be the CSI of the first subset A
- 4: $H_A = [Re \{H_A\}, Im\{H_A\}]$
- 5: // Calculate the H_B by applied the regression model as shown in the online CSI prediction
- 6: $H_B = M_i^{Re}([Re (H_A), Im(H_A)]) + j M_i^{Im}([Re (H_A), Im(H_A)])$
- 7: // CSI of all antennas are ready now to apply as input in the 802.11ax scheduling Algorithm
- 8: Recursive-Scheduling (U, l, i)

Figure 7. The pseudocode of proposed algorithm

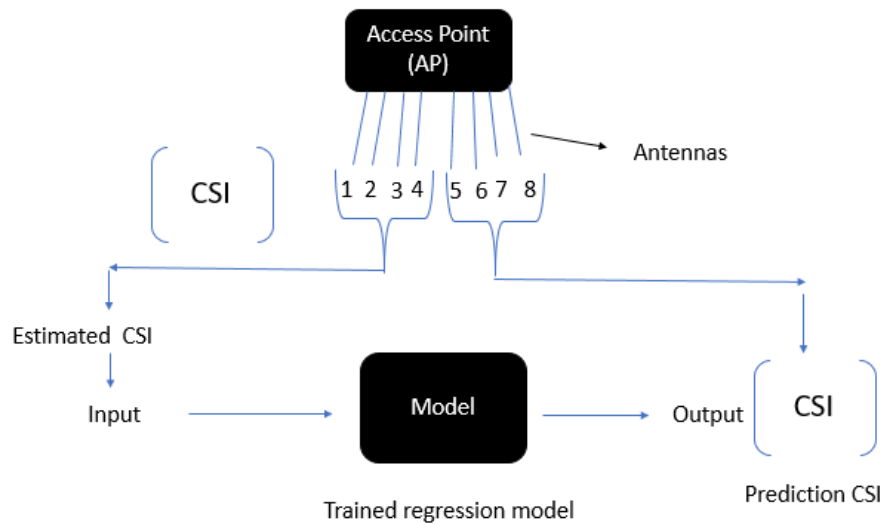


Figure 8. CSI prediction Steps

5. Simulations

The old and new algorithms are evaluated in simulations. The example of 802.11ax RUs split with the “WlanHEMUConfig” object. In Figure 9, the 40 MHz bandwidth is split into 4 RUs, each of which has 106 subcarriers. In Figure 10, the 20 MHz bandwidth is split into 9 RUs that have the same size of 26 subcarriers, and in Figure 11, the 20 MHz bandwidth is split into 3 RUs, where two RUs have 52 subcarriers and the third has 106 subcarriers.

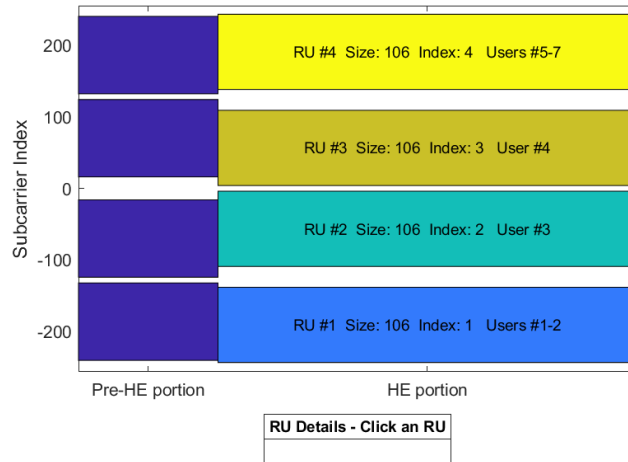


Figure 9. 40MHz, 4 RUs (106)

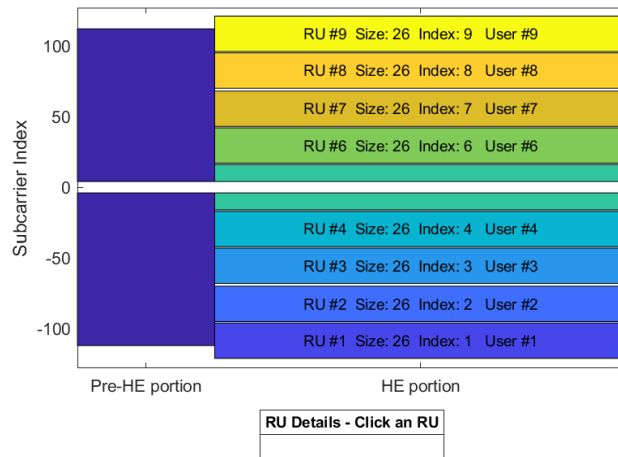


Figure 10. 20MHz, 9 RUs (26)

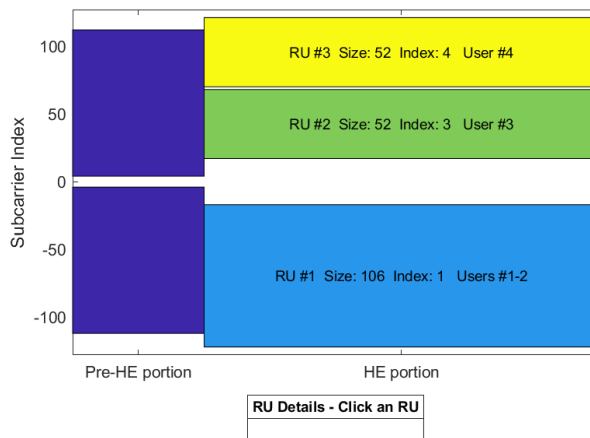


Figure 11. 20MHz, 3 RUs (106, 52, 52)

Let us assume there is downlink MU transmission with a single basic station (BBS) in 50 x 50 office area that has central frequency of 5GHz. The wireless channel can be modeled by WINNER II channel module in MATLAB.

The scenario that was chosen in our simulation scenario is an indoor office (A1) with the parameter "non-line-of-sight (NLOS)". For each simulation scenario, we keep the area of the AP fixed and make a wide range of geographies by arbitrarily distributing the clients. We then report the average value of the sum rate under both the pure OFDMA and the OFDMA with our regression model. We will apply multiple simulation scenarios:

- Scenario 1: The BBS consists of: One AP with 4 antennas ($N_T = 4$), 7 users with 1 antenna ($N_R = 1$), 20MHz bandwidth ($L = 4$). The result showing in the Figure 12.
- Scenario 2: The BBS consists of: One AP with 4 antennas ($N_T = 4$), 30 users with 1 antenna ($N_R = 1$), 40MHz bandwidth ($L = 5$). The result showing in the Figure 13.
- Scenario 3: The BBS consists of: One AP with 4 antennas ($N_T = 4$), N users with 1 antenna ($N_R = 1$), 40MHz bandwidth ($L = 5$). The result showing in the Figure 14.
- Scenario 4: The BBS consists of: One AP with 1 antenna ($N_T = 1$), 30 users with 1 antenna ($N_R = 1$), 40MHz bandwidth ($L = 5$). The result showing in the Figure 15.

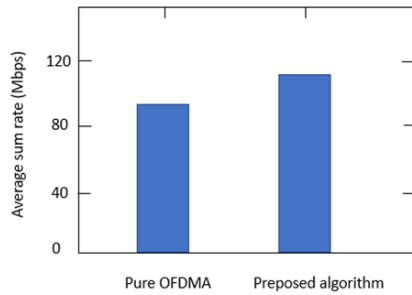


Figure 11. The result of Scenario 1

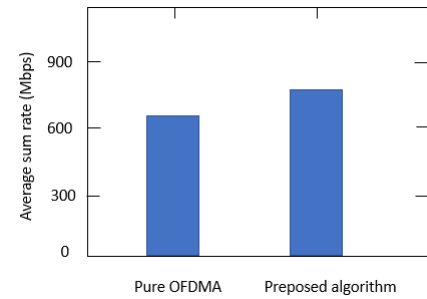


Figure 12. The result of Scenario 2

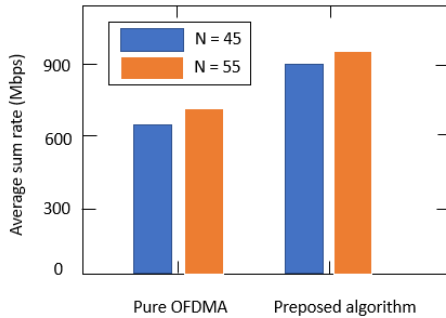


Figure 13. The result of Scenario 3

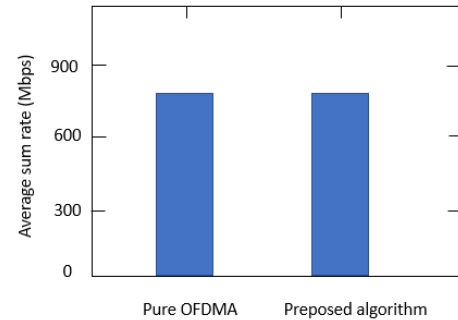


Figure 14. The result of Scenario 4

As can be seen from the figures of all scenarios, the sum rate of our proposed algorithm is higher than pure OFDMA, which is to be expected since it reduces the overhead in the network. In the pure OFDMA scheduling algorithm, we obtain CSI from all users connected to the Ap (all antennas). However, with our proposed algorithm, we obtain the CSI between the users and half of the antennas from AP, and then we predict the rest from CSI from the old algorithm as we described earlier.

Table 2. Simulation result table

Scenarios	Average sum rate of 802.11ax without ML (Mbps)	Average sum rate of 802.11ax with ML (Mbps)
Scenario 1	90.25 Mbps	117.29 Mbps
Scenario 2	620.12 Mbps	820.87 Mbps
Scenario 3 (N = 45, N = 55)	670.15 Mbps, 712.20 Mbps	890.01 Mbps, 928.98 Mbps.
Scenario 4	802.58 Mbps	802.58 Mbps

In scenario 3, we found that the sum rate increased as N increased, so the result of our proposed algorithm also increased. In scenario 4, we have only one antenna on AP, so the average sum rate has the same value in the OFDMA-only scheduling algorithm and our proposed algorithm, because our proposed algorithm uses the number of antennas on the router to reduce network congestion. The average sum rate has increased by 22% to 30% by using our proposed algorithm. This is great to get a faster data score in a Winless network, while there is no standard algorithm for scheduling and resource allocation in 802.11ax (Wi-Fi 6) yet.

6. Conclusion

In this work, we applied a ML method with a previous 802.11ax scheduling algorithm to find a new scheduling algorithm in the 802.11ax standard. First, we divided the antennas of AP into two subsets and then used CSI for one of them as input to the regression model. Using this model, we were able to predict CSI for the second subset. We then applied an algorithm for 802.11ax scheduling and an algorithm for user selection for RUs with more than 106 subcarriers. The goal of the 802.11ax standard is to make Wi-Fi more efficient and faster than the old versions. We were able to increase the average sum performance between 25% and 30% by adding ML to a prioritised algorithm. Detailed simulations comparing the performance of the algorithms show that our practical methods perform very well in all scenarios studied.

References

- Afaqui, M. S., Garcia-Villegas, E., & Lopez-Aguilera, E. (2016). IEEE 802.11ax: Challenges and Requirements for Future High Efficiency WiFi. *IEEE Wireless Communications*, 24(3), 130–137. <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.1600089WC>
- Afaqui, M. S., Garcia-Villegas, E., Lopez-Aguilera, E., Smith, G., & Camps, D. (2015). Evaluation of dynamic sensitivity control algorithm for IEEE 802.11ax. *2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2015*, 1060–1065. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2015.7127616>
- Anand, M., Nightingale, E. B., & Flinn, J. (2005). Self-tuning wireless network power management. *Wireless Networks*, 11(4), 451–469. <https://doi.org/10.1007/s11276-005-1768-x>
- Avdotin, E., Bankov, D., Khorov, E., & Lyakhov, A. (2019). OFDMA resource allocation for real-time applications in IEEE 802.11ax networks. *2019 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking, BlackSeaCom 2019*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/BlackSeaCom.2019.8812774>
- Baghi, S., & Daneshvar Farzanegan, M. (2015). A novel delay based scheduling algorithm for video traffic in LTE. *2015 2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI)*, 514–520. <https://doi.org/10.1109/KBEI.2015.7436098>
- Bankov, D., Didenko, A., Khorov, E., Loginov, V., & Lyakhov, A. (2017). IEEE 802.11ax uplink scheduler to minimize, delay: A classic problem with new constraints. *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2017-Octob, 1–5. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2017.8292382>
- Bankov, D., Didenko, A., Khorov, E., & Lyakhov, A. (2018). OFDMA Uplink Scheduling in IEEE 802.11ax Networks. *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICC.2018.8422767>
- Bazzi, A., Zanella, A., Cecchini, G., & Masini, B. M. (2019). Analytical investigation of two benchmark resource allocation algorithms for LTE-v2v. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(6), 5904–5916. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2909438>
- Bellalta, B., & Kosek-Szott, K. (2019). AP-initiated multi-user transmissions in IEEE 802.11ax WLANs. *Ad Hoc Networks*, 85, 145–159. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.10.021>
- Bhagwat, P., Bhattacharya, P., Krishna, A., & Tripathit, S. K. (1996). Enhancing throughput over wireless LANs using channel state dependent packet scheduling. *Proceedings of IEEE INFOCOM '96. Conference on Computer Communications*, 1133–1140. <https://doi.org/10.1109/INFCOM.1996.493057>
- Bhattacharai, S., Naik, G., & Park, J.-M. J. (2019). Uplink Resource Allocation in IEEE 802.11ax. *ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2019-May(March), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICC.2019.8761594>
- Bi, S., Zhang, R., Ding, Z., & Cui, S. (2015). Wireless Communications in the Era of Big Data. *IEEE Communications Magazine*, 53(10), 190–199. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7295483>

- Bottigliengo, M., Casetti, C., Chiasserini, C. F., & Meo, M. (2004). Short-term fairness for TCP flows in 802.11b WLANs. *Proceedings - IEEE INFOCOM*, 1383–1392. <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2004.1357023>
- Cao, X., Ma, R., Liu, L., Shi, H., Cheng, Y., & Sun, C. (2018). A Machine Learning-Based Algorithm for Joint Scheduling and Power Control in Wireless Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(6), 4308–4318. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2853661>
- Chao, I. F., Chiou, C. S., & Hsu, K. (2015). A group-oriented QoS-enhanced proportional fair scheduling algorithm over downlink OFDMA-based networks. *4th International Symposium on Next-Generation Electronics, IEEE ISNE 2015*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ISNE.2015.7131958>
- CISCO(team). (2018). IEEE 802.11ax: The Sixth Generation of Wi-Fi. <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/white-paper-c11-740788.html>
- Cui, W., Shen, K., & Yu, W. (2019). Spatial Deep Learning for Wireless Scheduling. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 37(6), 1248–1261. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2019.2904352>
- Das, P., Sen, S., & Banerjee, A. (2013). Surveying Best Suitable Scheduling Algorithm for Wimax- Wi-Fi Integrated Heterogeneous Network. *March*, 329–346.
- Dogar, F. R., Steenkiste, P., & Papagiannaki, K. (2010). Catnap: Exploiting high bandwidth wireless interfaces to save energy for mobile devices. *MobiSys'10 - Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, 107–122. <https://doi.org/10.1145/1814433.1814446>
- Dong, P., Zhang, H., & Li, G. Y. (2018). Machine Learning Prediction based CSI Acquisition for FDD Massive MIMO Downlink. In *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2018.8647328>
- Dovelos, K., & Bellalta, B. (2018). Optimal Resource Allocation in IEEE 802.11ax Uplink OFDMA with Scheduled Access. *Networking and Internet Architecture*, 1–17. <http://arxiv.org/abs/1811.00957>
- Enayet, A., Mehajabin, N., Razzaque, M. A., Hong, C. S., & Hassan, M. M. (2016). PowerNap: a power-aware distributed Wi-Fi access point scheduling algorithm. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2016(27), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s13638-016-0522-7>
- Gabale, V., Raman, B., Dutta, P., & Kalyanraman, S. (2013). A classification framework for scheduling algorithms in wireless mesh networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 15(1), 199–222. <https://doi.org/10.1109/SURV.2012.022412.00068>
- Ghanem, W. R., Jamali, V., Sun, Y., & Schober, R. (2019). Resource Allocation for Multi-User Downlink URLLC-OFDMA Systems. *2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICCW.2019.8756746>
- Gopalan, A., Caramanis, C., & Shakkottai, S. (2012). On wireless scheduling with partial channel-state information. *IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY*, 58(1), 403–420. <https://doi.org/10.1109/TIT.2011.2169543>
- Gopalan, A., Caramanis, C., Shakkottai, S., & Member, S. (2012). On Wireless Scheduling With Partial Channel-State Information Aditya. *IEEE Transactions on Information Theory*, 58(1), 403–420. <https://doi.org/10.1109/TIT.2011.2169543>
- Han, M., Chen, W., Pi, W., Li, W., & Zeng, R. (2015). The RAS scheduling algorithm based on 802.11n WIFI router. *International Journal of Security and Its Applications*, 9(11), 113–124. <https://doi.org/10.14257/ijisia.2015.9.11.12>
- Huang, Y., Chen, Y., Hou, Y. T., & Lou, W. (2019). CURT: A Real-Time Scheduling Algorithm for Coexistence of LTE and Wi-Fi in Unlicensed Spectrum. *2018 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN 2018*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/DySPAN.2018.8610476>
- Islam, G. Z., & Kashem, M. A. (2019). An OFDMA-based New MAC mechanism for IEEE 802.11ax. *Proceedings of 2018 5th International Conference on Networking, Systems and Security, NSysS 2018*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/NSysS.2018.8631367>

- Karmakar, R., Chattopadhyay, S., & Chakraborty, S. (2019). Intelligent MU-MIMO User Selection with Dynamic Link Adaptation in IEEE 802.11ax. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(2), 1155–1165. <https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2890219>
- Karthik, R. M., & Palaniswamy, S. (2018). Resource Unit (RU) based OFDMA Scheduling in IEEE 802.11ax system. 2018 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), 1297–1302. <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2018.8554931>
- Kathrine, J. W., & Raj, A. (2012). Packet Scheduling Algorithms in Different Wireless Networks A Survey. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 1(8), 1–6. <https://www.ijert.org/packet-scheduling-algorithms-in-different-wireless-networks-a-survey>
- Khorov, E., Kiryanov, A., Lyakhov, A., & Bianchi, G. (2019). A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 21(1). <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2871099>
- Kwon, D., Kim, S. W., Kim, J., & Mohaisen, A. (2018). Interference-aware adaptive beam alignment for hyper-dense IEEE 802.11ax internet-of-things networks. *Sensors (Switzerland)*, 18(10). <https://doi.org/10.3390/s18103364>
- Lee, K. H. (2019a). Performance analysis of the IEEE 802.11ax MAC protocol for heterogeneous Wi-Fi networks in non-saturated conditions. *Sensors (Switzerland)*, 19(7), 1–20. <https://doi.org/10.3390/s19071540>
- Lee, K. H. (2019b). Using OFDMA for MU-MIMO user selection in 802.11ax-Based Wi-Fi Networks. *IEEE Access*, 7, 186041–186055. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2960555>
- Lee, K., & Kim, C. (2015). User scheduling for MU-MIMO transmission with active CSI feedback. *EURASIP Journal on Wireless Communication and Networking*. <https://doi.org/10.1186/s13638-015-0331-4>
- Li, J., Yang, Q., Yang, J., Qin, M., & Kwak, K. S. (2018). User Perceived QoS Provisioning for Video Streaming in Wireless OFDMA Systems: Admission Control and Resource Allocation. *IEEE Access*, 6, 44747–44762. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2865010>
- Liu, Q., & Chen, C. W. (2015). Smart Downlink Scheduling for Multimedia Streaming Over LTE Networks With Hard Handoff. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 25(11), 1815–1829. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2015.2400751>
- Lodwal, H., Yadav, A., & Panchal, M. (2019). A Quality of Service (QoS) Aware Scheduling Algorithm to Boost QoS of Cell-Edge Users in LTE Networks. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(2), 2589–2594. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B2818.078219>
- Manweiler, J., & Roy Choudhury, R. (2012). Avoiding the rush hours: WiFi energy management via traffic isolation. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 11(5), 739–752. <https://doi.org/10.1109/TMC.2011.269>
- Md Zain, A. S., Abd. Malek, M. F., Elshaikh, M., Omar, N., & Hussain, A.-S. T. (2015). Performance analysis of scheduling policies for VoIP traffic in LTE-Advanced network. 2015 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT), 16–20. <https://doi.org/10.1109/I4CT.2015.7219528>
- Naik, G., Bhattarai, S., & Park, J.-M. (2018). Performance Analysis of Uplink Multi-User OFDMA in IEEE 802.11ax. 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2018-May(March), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICC.2018.8422692>
- Newsroom. (2014). No wifi, no homework: Internet is now ‘more important than food or family.’ *YORKSHIRE POST*. <https://www.yorkshirepost.co.uk/news/uk-news/no-wifi-no-homework-internet-now-more-important-food-or-family-1831219>
- Omar, H. A., Abboud, K., Cheng, N., Member, S., Malekshan, K. R., Member, S., & Gamage, A. T. (2016). A Survey on High Efficiency Wireless Local Area Networks : Next Generation WiFi. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(4), 2315–2344. <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2554098>
- Pantelidou, A., & Ephremides, A. (2009). Scheduling in wireless networks. *Foundations and Trends in Networking*, 4(4), 421–511. <https://doi.org/10.1561/13000000030>

- Pilosof, S., Ramjee, R., Raz, D., Shavitt, Y., & Sinha, P. (2003). Understanding TCP fairness over wireless LAN. IEEE INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No.03CH37428), 863–872. <https://doi.org/10.1109/infcom.2003.1208924>
- Qu, Q., Li, B., Yang, M., Yan, Z., Yang, A., Deng, D. J., & Chen, K. C. (2019). Survey and Performance Evaluation of the Upcoming Next Generation WLANs Standard - IEEE 802.11ax. *Mobile Networks and Applications*, 24(5), 1461–1474. <https://doi.org/10.1007/s11036-019-01277-9>
- Ramji, T., Ramkumar, B., & Manikandan, M. S. (2014). Resource and subcarriers allocation for OFDMA based wireless distributed computing system. *Souvenir of the 2014 IEEE International Advance Computing Conference, IACC 2014*, 338–342. <https://doi.org/10.1109/IAdCC.2014.6779345>
- Rozner, E., Navda, V., Ramjee, R., & Rayanchu, S. (2010). NAPman: Network-assisted power management for WiFi devices. *MobiSys'10 - Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, 91–105. <https://doi.org/10.1145/1814433.1814445>
- Sanchez-Mahecha, J. S., Cespedes, S., & Bustos-Jimenez, J. (2018). QoS Evaluation of the Future High-Efficiency IEEE 802.11ax WLAN Standard. *2018 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ColComCon.2018.8466723>
- Seong, K., Mohseni, M., & Cioffi, J. (2006). Optimal Resource Allocation for OFDMA Downlink Systems. *2006 IEEE International Symposium on Information Theory*, 1394–1398. <https://doi.org/10.1109/ISIT.2006.262075>
- Sharon, O., & Alpert, Y. (2017). Scheduling Strategies and Throughput Optimization for the Uplink for IEEE 802.11ax and IEEE 802.11ac Based Networks. *Wireless Sensor Network*, 09(08), 250–273. <https://doi.org/10.4236/wsn.2017.98014>
- Sharon, O., & Alpert, Y. (2018). Optimizing TCP Goodput and Delay in next generation IEEE 802.11 (ax) devices. *Transactions on Networks and Communications*, 6(4), 14–39. <https://doi.org/10.14738/tnc.64.4925>
- Sharon, O., & Alpert, Y. (2019). Advanced IEEE 802.11ax TCP aware scheduling under unreliable channels. *International Journal of Communication Systems*, 32(14), e4060. <https://doi.org/10.1002/dac.4060>
- Shen, W. L., Lin, K. C. J., Chen, M. S., & Tan, K. (2015). SIEVE: Scalable user grouping for large MU-MIMO systems. *Proceedings - IEEE INFOCOM*, 26, 1975–1983. <https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2015.7218581>
- Shukla, S., & Bhatia, V. (2018). Packet Scheduling Algorithm in LTE/LTE-Advanced-based Cellular Networks. *IETE Technical Review*, 35(6), 551–561. <https://doi.org/10.1080/02564602.2017.1342573>
- Stallings, W., & Beard, C. (2016). *Wireless Communication Networks and systems*. Pearson Higher Education.
- Tabany, M. R., & Guy, C. G. (2015). Design and implement delay-aware QoS scheme for 3GPP LTE/LTE-A networks for mixed traffic flow. *2015 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC)*, 38–44. <https://doi.org/10.1109/ISCC.2015.7405451>
- Thomas, J. (2015). How important is WiFi in daily life? Purple. <https://purple.ai/blogs/how-important-is-wifi-in-daily-life/>
- Tseng, J. H., Chen, Y. F., & Wang, C. L. (2020). User Selection and Resource Allocation Algorithms for Multicarrier NOMA Systems on Downlink Beamforming. *IEEE Access*, 8, 59211–59224. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2982677>
- Urvoy-Keller, G., & Beylot, A. L. (2008). Improving flow level fairness and interactivity in WLANs using size-based scheduling policies. *MSWiM'08: Proceedings of the 11th ACM International Conference on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, 333–340. <https://doi.org/10.1145/1454503.1454559>
- Utami, A. R., & Iskandar. (2019a). Optimization Subcarrier Allocation and Genetic Algorithm for Resource Allocation in MIMO-OFDMA. *ISESD 2018 - International Symposium on Electronics and Smart Devices: Smart Devices for Big Data Analytic and Machine Learning*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ISESD.2018.8605480>

- Utami, A. R., & Iskandar. (2019b). Resource Allocation Analysis with Genetic Algorithm in LTE MIMO-OFDMA Cellular System. TSSA 2019 - 13th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications, Proceedings, 182–185. <https://doi.org/10.1109/TSSA48701.2019.8985502>
- Uyan, O. G., & Gungor, V. C. (2019). QoS-aware LTE-A downlink scheduling algorithm: A case study on edge users. In *International Journal of Communication Systems* (Vol. 32, Issue 15). <https://doi.org/10.1002/dac.4066>
- Walrand, J. (2010). Scheduling and Congestion Control for Wireless and Processing Networks. In *Synthesis Lectures on Communication Networks* (Vol. 6). Morgan & Claypool. <https://doi.org/10.2200/S00270ED1V01Y201008CNT006>
- Wang, K., & Psounis, K. (2018). Scheduling and Resource Allocation in 802 . 11ax. *IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications*, 279–287. <https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2018.8486204>
- Yao, Y., Sheng, B., & Mi, N. (2015). A new packet scheduling algorithm for access points in crowded WLANs. *Ad Hoc Networks*, 36(1), 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2015.06.001>
- Ye, H., Li, G. Y., & Juang, B. H. (2018). Power of Deep Learning for Channel Estimation and Signal Detection in OFDM Systems. *IEEE Wireless Communications Letters*, 7(1), 114–117. <https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2757490>
- Zhang, Z., Bronson, S., Xie, J., & Hu, W. (2013). Employing the One-Sender–Multiple-Receiver Technique in Wireless LANs. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 21(4), 1243–1255. <https://doi.org/10.1109/TNET.2012.2222436>
- Zubairi, J. A., Erdogan, E., & Reich, S. (2015). Experiments in fair scheduling in 4G WiMAX and LTE. *2015 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS)*, 277–282. <https://doi.org/10.1109/HPCSim.2015.7237050>



PLC Kontrollü Glove Box Tasarımı ve Atmosferindeki Oksijen Seviyesinin Kontrolü

PLC-Controlled Glove Box Design and Control of the Oxygen Level in the Glove Box Atmosphere

Mustafa Doğan¹

¹Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürlüğü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 04/10/2021

Kabul / Accepted:30/01/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Glove-box sistemleri yaşadığımız atmosfer ortamından, deney yapılacak ortamın atmosferini yalıtır. Bu tip kapalı sistemler sızdırmazlık sağlayarak deney yapılan içerideki atmosferi dışarıdan tamamen izole eden bir yapıya sahiptir. Ayrıca glove-boxlar şeffaf bir yapıya sahip olduğundan dolayı içeride yapılacak deneylerin ve testlerin dışarıdan izlenmesine de imkân vermektedir. Uzun kollu eldiven kullanılarak eldiven kutusu içinde devam eden deneye müdahale edilebilmesi; kontrollü atmosfer içinde kapsamlı deneyler yapılabilmesini de mümkün kılmaktadır. Batarya üretim hatlarında, mesela lityum benzeri oksijen içeren ortamlarda alev alabilen kimyasallar kullanıldığında ya da OLED (organik ışık yayan diyot) üretim ve testinin sorunsuzca yapılabilmesi için düşük oksijen atmosferine sahip glove-box sistemlerinin kullanılması gereklidir. Bu sistemlerin en basit yapıda olan; atmosfer kontrol sistemi içermeyen ürünlerin fiyatları 20 bin euro seviyesinden başlamaktadır. İçerideki atmosferde bulunan oksijen seviyesi kontrol edilebilen ürünlerin fiyatları ise 100 bin euro üzerindeki fiyat seviyelerine kadar çıkmaktadır. Bu kapalı sistemde iç ortamın oksijen seviyesinin devamlı aşağıya çekilebilmesi için periyodik olarak iç atmosfer havasını vakumla boşaltan ve ardından iç atmosfere inert argon gazı verebilen PLC kontrollü bir sistem tasarlanmıştır. Elektrokimyasal oksijen sensörü ve ölçü aleti (multimetre) kullanılarak glove-box iç atmosferindeki oksijen seviyesi istenildiği zaman kullanıcı tarafından kontrol edilebilmektedir.

Anahtar Kelimeler

“Glove box, Oksijen sensör, PLC kontrol, Elektrokimyasal sensör”

Abstract

Glove-box systems have a special structure which insulates the environment in which the experiments will be conducted from the atmosphere in which we live. In addition, glove-box systems have a transparent structure, which allows you to monitor the experiments and tests to be carried out inside at any time. Glovebox systems give ability to intervene the on going experiment in the glove box manually controlling using long-sleeved gloves. Also it makes possible to conduct extensive difficult experiments in this controlled atmosphere. For example lithium battery production lines, oxygen sensitive flammable chemical related experiments also OLED(organic light emitting diode) test and production levels must be done smoothly for the production of controlled low-oxygen atmosphere with the use of a glove box system is a necessity. In the market the simplest of these systems of devices without an atmosphere control system start at the level of 20 thousand euros and atmospheric controlled ones prices' reach to the levels above 100 thousand euros. In this system, a system that can periodically vacuum and periodically deliver inert argon gas inside is designed so that the oxygen level of the indoor environment can be continuously lowered. Atmospheric oxygen level inside the glove box was tracked, by measuring an electrochemical oxygen sensor' galvanometric current with a multimeter.

Key Words

“Glove Box, Oxygen sensor, PLC control, Electrochemical sensor”

1. Giriş

İlk olarak 1940 yıllarında atmosfer kontrolüne de imkân veren Glove Box (Eldiven Kutusu) sistemleri askeri amaçlı olarak radyoaktif materyalleri incelemek için kullanılmıştır (Vauchy ve ark. 2021). Bu özel kontrollü atmosfere sahip ortam gereksinimlerinden dolayı özellikle ilaç sanayi, farmasotik, patojenler ve virüsleri kontrol altında tutmak için kullanıldığında popülaritesi zamanla daha da artmıştır. Günümüzde yarıiletken teknolojisinden ilaç sanayine kadar birçok sektörde amacına yönelik olarak farklı glove-box sistemlerinin üretimleri yapılmaktadır (Petrova ve ark. 2019, Szolga ve Stan 2021, Kumar ve ark. 2010).

Atmosfer kontrollü sistemde özellikle üzerinde çalışılacak olan elektronik yarıiletken yapılara zarar vermesi sözkonusu olduğunda oksijen ve nem miktarı mutlaka kontrol altında tutulması gereken parametrelerdir (Liu ve ark. 2020). Lityum pillerin paketlenmesinde özellikle lityum elementinin oksijen ile reaksiyona girme ve patlama tehlikesinden dolayı yine glove box sistemleri batarya üretim hatlarında da kullanılmaktadır (Kerlau ve ark. 2007). OLED (Organik Lüminesans Emisyonlu Diyot) üretiminde de oksijen ve nemin ortamda olması bu yapılara üretimde ve sonrasında zarar vermektedir. Üretilen OLED cihazının oksijene maruz kalma süresi ile orantılı olarak çalışma ömrü de kısalmaktadır (Doğan. 2021, Pal ve ark. 2021). OLED yüzeyinin kaplanması ve test edilmesi aşamalarında, ayrıca oksijen sensörünün test aşamalarında; bu tasarlanan glove box sistemi verimli bir şekilde referans verilen ilgili akademik çalışmalarda kullanılmıştır (Doğan. 2021, Doğan ve ark. 2021). Bu kontrollü atmosfer şartlarında çalışılması güvenli bir çalışma ortamı sağlamanın yanında, ürünlerin arıza yapma olasılığını da düşürmektedir. Patlayıcı ve zehirli olan gazların algılama sensörü geliştirilmek istendiğinde yine bu atmosfer kontrollü glove box sisteminin kullanılması bir gerekliliktir (Fedorova ve ark. 2021).

Ultraviyole ışınlar birçok deney cihazının içinde ve yaşlandırma deney düzeneklerinde de sıklıkla kullanılmaktadır (Doğan. 2020, Lee ve ark.2021, Doğan. 2021). Glove-box sisteminin yapıldığı plexiglass şeffaf olarak görünür bölgedeki ışığı geçirebilmektedir. Fakat ultraviyole bölgedeki ışığı geçirmediğinden gözlere zararlı olan bu ışığı bloke ederek dışarı çıkmasını engelleyebilmektedir (Zhou ve ark. 2005, Kucenic ve ark. 2002, Frohn ve ark. 2001). Glove box sisteminin duvarları plexiglass malzemeden üretildiği için, glove-box içinde yapılan ultraviyole ışınlama deneyleri kullanıcının gözlerinin zarar görmesini de engellemektedir (Spyratou ve ark. 2021).

BAP projesi kapsamında alınan destek ile bu cihazın iç atmosfer kontrolü için oksijen sensörü temin edilmiş ve bu sistemin iç atmosferindeki oksijen seviyesinin kontrolü için kullanılmıştır. Tasarlanan glove box sistemi yerli imkânlar ile 20mm kalınlığında tamamen şeffaf olan plexiglass malzemeden yapılmıştır. Sistemin teknik çizimleri Solid Work katı model çizim programı kullanılarak tamamlanmıştır. Plexiglass levhalar hizmet alımı olarak sanayide imal edilmiştir. Plexiglass malzemenin yapıştırılması ve birleştirilmesinde çok verimli olduğu görülen ve birleştirilen ara yüzeylerde akıcı özelliği sahip olan cyanoacrylate yapıştırıcılar kullanılmıştır. Bu şekilde çok sağlam bir sızdırmazlık sağlanmıştır. Havadaki nem ve oksijen yüzde olarak miktarını gösteren dijital laboratuvar tipi nem ve sıcaklık ortam dedektörleri de kullanılmıştır. Ortam atmosferi çalışma öncesi ve sonrası denetlenerek karşılaştırılmıştır. İçerideki havayı vakumlaması için kullanılacak olan vakum pompası senkronize olarak azot gaz girişini sağlayan selenoid vanalar ile dönüşümlü bir şekilde birlikte çalıştırılarak içeride oluşturulan izole atmosferin kısa sürede uygun olan düşük oksijen (< %1) seviyelerine gelmesi sağlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Solidwork yazılım programında üç boyutlu çizimleri yapılarak cihazın dış tasarımı ve dışarıdan görünümü oluşturulmuştur (Şekil 1, Şekil2). Glove box sistemi için 20mm kalınlığında şeffaf plexiglass levhalar Şekil1’de Solidworks de çizimi yapılan şemaya göre hazırlanarak temin edilmiştir. Sisteme ait selenoid açma ve kapama vanaları büyük “A” kısmı üzerine inert gaz girişi ve vakum gaz çıkışı olarak iki adet, ayrıca küçük olan bölme “B” üzerinde de inert gaz girişi ve vakum gaz çıkışı olarak iki adet olmak üzere toplam dört adet selenoid vana takılmıştır. Sistemin tamamlanmış hali Şekil 3’de görülmektedir. Sistemin bütün gaz giriş vanalarının açılma ve kapatılma kontrolleri Siemens LOGO PLC otomasyon modülü kullanılarak yapılmıştır. PLC otomasyonu sinyal girişi(input) olarak 2 adet ayrı açılıp kapanan anahtar ile sağlanmıştır. PLC cihazı ile her iki bölmenin bağımsız olarak atmosfer seviyesinin kontrol edilmesi amaçlanmıştır. Gaz girişi basıncı 1 bar olacak şekilde maksimum 200 bar basınca sahip %99,999 saflıkta argon gazı içeren tüp üzerinden ayarlanmıştır. Vakum pompası olarak düşük maliyetli olan ama çekiş gücü fazla olan, dakikada 2,5 litre hava emiş gücüne sahip HAILEX marka diyaframalı akvaryum pompası (sızdırmaz plastik bir kutu içine konularak) sistemin her iki bölmenin de vakumunu almak amaçlı kullanılmıştır. Bu şekilde vakum pompası alım maliyeti de düşürülmüştür.

Sistem ilk tamamlandığında kaçak kontrolü şu şekilde yapılmıştır. Bölme içine bir miktar çakmak gazı (patlayıcı ve yanıcı gaz) verilerek ve içerde eldivenlere baskı yapılarak mbar seviyesinde pozitif iç basınç oluşturularak ek bağlantı noktalarında kaçak olup olmadığının tam bir kontrolü yapılmıştır. Bu amaçla ppm seviyesinde hassasiyetle içerden sızabilecek patlayıcı ve yanıcı gaz miktarını ölçebilen Sensit HXG3 gaz algılama cihazı kullanılarak kontroller yapılmıştır. Bulunan kaçak olan sızıntı noktaları tekrardan silikon ve cyanoacrylate türü yapıştırıcılar ile kapatılmıştır.

Bütün sistem 220 volt ile çalışan PLC sistemi baz alınarak şebeke gerilimi ile çalışacak şekilde seçilmiştir. Bu şekilde aynı zamanda ayrıca adaptör ve güç kaynakları kullanımına da gerek kalmamıştır. İçeride azaltılması düşünülen oksijen seviyesi PLC kontrollü hava

boşaltma ve doldurma sistemi ile oksijen seviyesi azaltılarak ortamdaki oksijenin yüzde 99'u uzaklaştırılana kadar glove box sistemi çalıştırılmıştır. Sistemin verimli bir şekilde çalışabildiği; oksijen sensöründen alınan veriler ile de kontrol edilerek doğrulanmıştır.

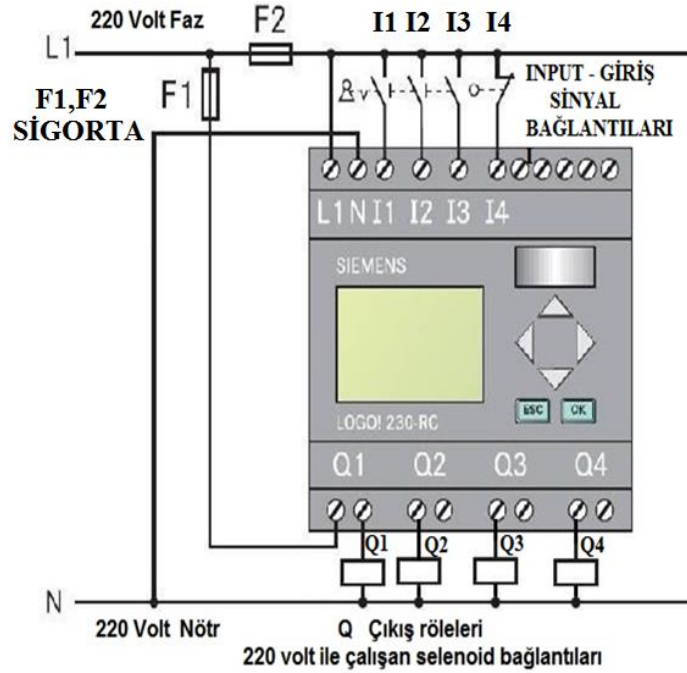
3. Sonuçlar ve Tartışma

PLC otomasyon sistemi Şekil 1'de görüldüğü gibi bir yapıya sahiptir. 8 adet giriş ve 4 adet röle çıkışına sahiptir. Sistem içerisine iki adet farklı zamanlayıcı programlanmıştır. Birinci zamanlayıcı program aktif hale gelmesi için giriş 2 (INPUT2) üzerine bir sviç vasıtası ile 220 volt gerilim gönderilerek yapılır. Argon gaz çıkışı bir debimetre ile ölçülerek 9 litre/dakika akış hızına sahip olduğu görülmüştür. Vakum sisteminin gaz akış seviyesi ölçüldüğünde gaz vakum çıkışının 2,5 litre/dakika akış hızında olduğu görülmüştür. Birinci zamanlayıcı 4 saniye süre ile gaz girişini açmaktadır ve 14 saniye süre ile vakum pompası çıkışını açmaktadır. Toplam vakum yapılan gaz hacmi ile toplam akan inert gaz hacminin miktarının yaklaşık eşit bir rakamda olması sağlanmıştır. 36 litre gaz girişine karşılık yaklaşık 35 litre gaz vakumu yapılmaktadır.

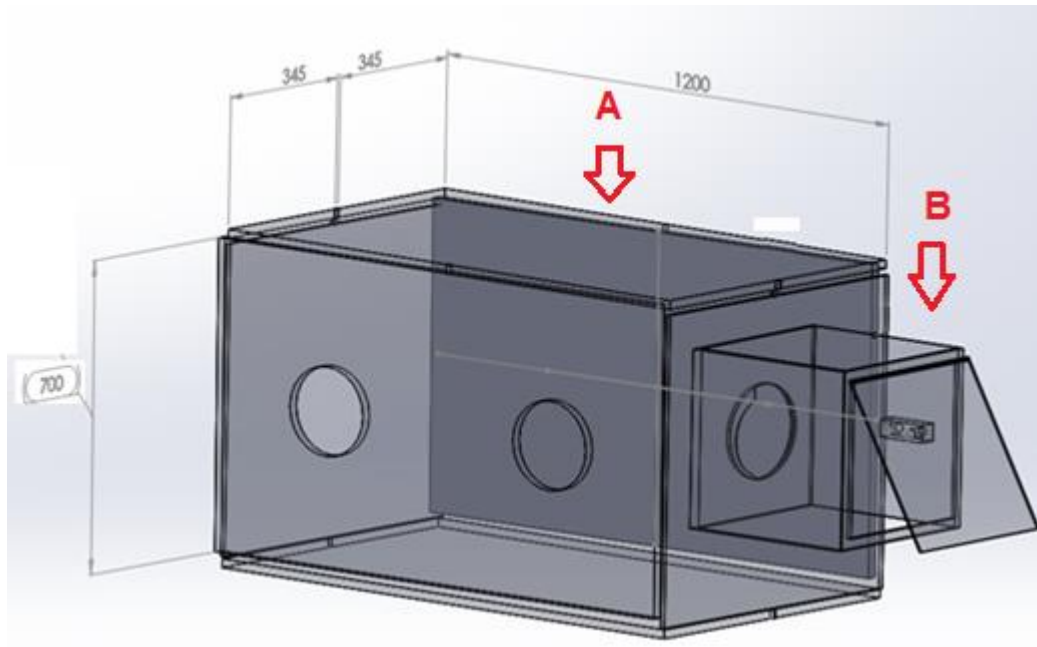
Küçük bölme için vakum sisteminin gaz çekiş gücü ölçüldüğünde gaz vakum girişinin 1,25 litre/dakika akış hızında olduğu görülmüştür. Bunun sebebi büyük olan A prizması içinde ek olarak bir vakum pompası daha iç kısımda kullanılmasıdır. Argon gaz akış hızı küçük bölme içinde aynıdır. Bu A bölmesi içinde 4 saniye süre ile inert gaz girişi açılmaktadır ve 25 saniye süre ile vakum pompası gaz çıkışı açılmaktadır. 37,5 litre vakum gaz çıkışına karşılık küçük bölme için 36 litre argon gaz girişi olmaktadır.

Bu vakum süresi ve gaz giriş süresi zaman parametreleri PLC otomasyonu üzerinden PLC'yi tekrar programlamaya gerek kalmadan üzerindeki tuş takımı ile de değiştirilebilmektedir. Şekil 2'de görülen B sisteminin dışarıya ile olan kapak bağlantısı ve A bölmesi ile olan her iki kapak bağlantısının sıkıca kapanabilmesi için dört köşesine ayrıca 2,5 santimetre çapında ve 0,5cm kalınlığında neodyum mıknatıslar karşılıklı olarak yerleştirilmiştir. Bu şekilde eldiven ile iç atmosferde deney yapılırken A bölmesi içindeki kapağın sıkıca otomatik olarak kapanması da sağlanmaktadır. Araya yerleştirilen o-ring kauçuklar tam olarak iki bölme arasında ortam sızdırmazlığını da sağlamaktadır. Şekil 2 ve Şekil 3 incelendiğinde B ara bölmesi malzeme aktarımında büyük kolaylık sağlamaktadır. B bölmesi oksijen seviyesi kısa sürede aşağıya çekilebilmektedir ve büyük A bölmesinin düşük oksijen seviyesine sahip olan atmosferinin malzeme aktarımı esnasında çok fazla etkilenmemesi de sağlanmıştır.

Elektrokimyasal oksijen sensörü sıvı elektrolit içeren bir yapıya sahiptir (Şekil 4a, 4b). Bu yüzden dolayı bu sensörün ömrü birkaç senedir. Sensörün ömrü; sensör içindeki sıvı kimyasalın ölçülen gaz ile etkileşime girerek işlevini yerine getiremeyeceği bir zamana ulaşana kadar devam eder (Şekil 4). Bu sensör kimyasal havadaki gaz ile etkileşime girerek belli bir seviyede akım değeri oluşturur. Oksijen sensörü galvanometrik prensiple çalıştığından kalibrasyona da gerek duymamaktadır. Galvanometrik bir yapıya sahip olduğu için sensör üzerinden geçen mikroamper seviyesinde olan akım değeri ölçülerek oksijen seviyesine verdiği tepki multimetre üzerinden ölçülebilmektedir (Şekil 4c). Bu akım seviyesinin karşılık geldiği oksijen seviyesinin yüzde kaç oksijene karşılık geldiğini bulmak için endüstriyel Sensit G2 gaz algılama detektörü kullanılarak bir ölçüm tablosu oluşturulmuştur (Şekil 5 ve Tablo 1). Yüzde 21 değerinden yüzde sıfır değerine kadar oksijen seviyesi aynı kapalı kontrollü ortamda düşürülmüştür. Yüzde 21 ve yüzde sıfır oksijen aralığında toplam 111 farklı mikroamper seviyesinde ölçülen akım değerlerine karşılık gelen oksijen yüzde değerleri kaydedilmiştir. Bu çalışma içinde oksijen seviyesinin yüzdesini belirlemede bu elde edilen veriler kullanılmıştır (Şekil 5 ve Tablo 1).



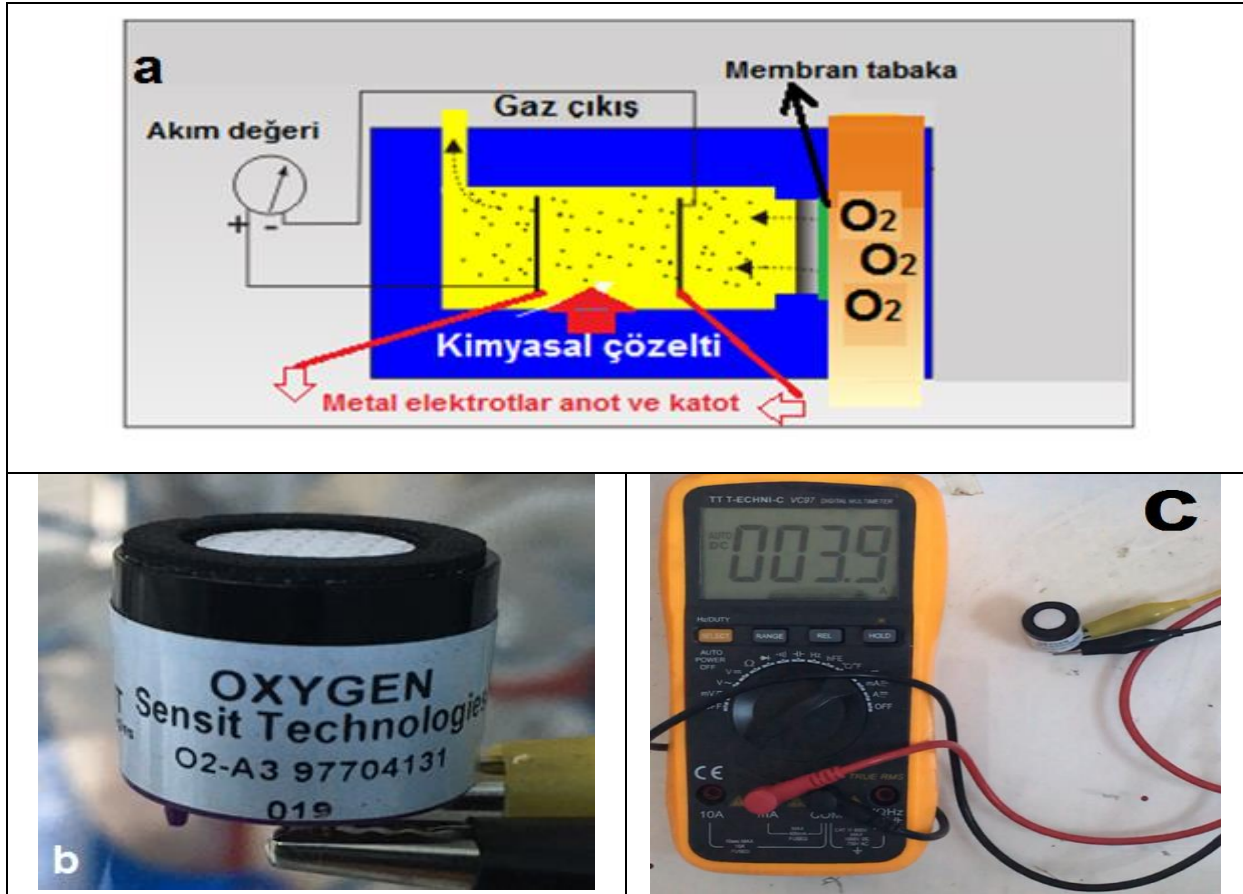
Şekil 1. Siemens logo PLC ile kurulan otomasyon sistemin giriş ve çıkış bağlantıları şu şekildedir. I2(INPUT) giriş üzerine bağlanan sviç büyük dikdörtgen prizma atmosfer zamanlayıcı programını başlatmaktadır. I4 (INPUT) girişi üzerine bağlanan sviç küçük küp prizma atmosfer zamanlayıcı programını başlatmaktadır. I1 (INPUT) ayak pedalı ile çalışır ve B bölümü vakum girişini manuel olarak açar. I3(INPUT) ayak pedalı ile çalışır ve B bölümü gaz girişini manuel olarak açar. Q1 çıkışı B bölümü vakum girişi selenoidini açmaktadır. Q2 çıkışı B bölümü gaz giriş selenoidini açmaktadır. Q3 çıkışı A bölümü vakum girişi selenoidini açmaktadır. Q4 çıkışı A bölümü gaz giriş selenoidini açmaktadır.



Şekil 2. Üretilen glove box sisteminin Solidwork programı ile üretimi öncesi çizilmiş olan genel olarak boyutlarını gösteren şekil



Şekil 3. Üretimi tamamlanan glove box sistemine ait resim görülmektedir.



Şekil 4. (a) Elektrokimyasal sensörün çalışma sistematiğini gösteren çizim (b) kullanılan elektrokimyasal oksijen sensörünün resmi (c) glove box içinde ölçü aleti (multimetre) kullanılarak elektrokimyasal sensörünün akım değerleri ile gaz ölçümü yapılması



Şekil 5. Kapalı bölme içerisinde oksijen seviyesi düşürülerek Sensit G2 gaz dedektörü ve oksijen sensörü aynı anda çalıştırılarak düşen oksijen yüzdelere karşılık gelen akım değerleri oksijen gaz seviyesi ölçümünde kullanmak için kayıt altına alınmıştır.

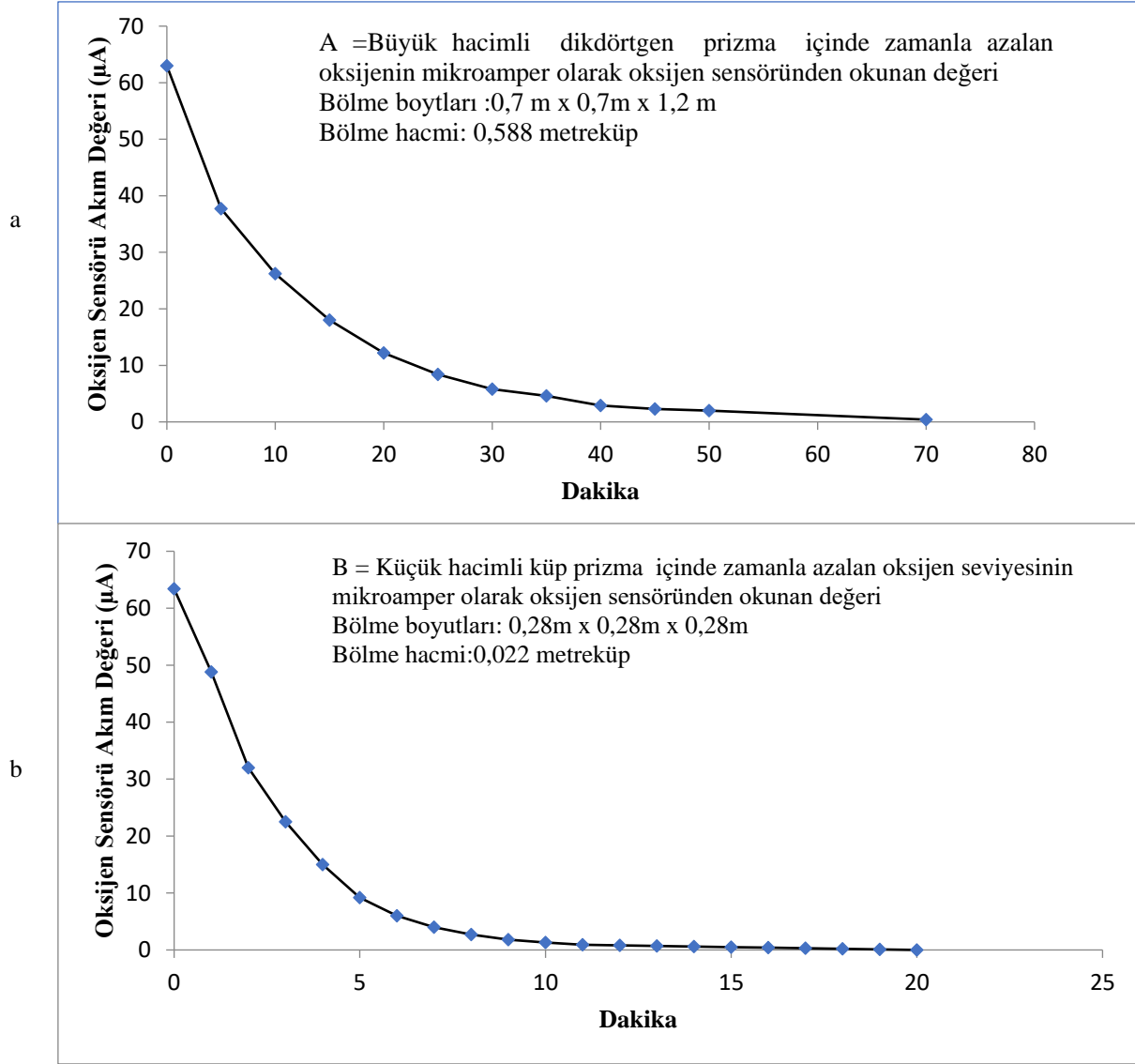
4. Bulgular ve Tartışma

Cihaz içindeki bölmeler içindeki oksijen seviyesi elektrokimyasal sensörden alınan akım değeri olarak zamana bağlı olarak grafiği Şekil 6'da çizilmiştir. 0,588 metreküp hacme sahip olan büyük dikdörtgen A prizması içinde 20 saniyelik periyot içinde 4 saniye gaz girişi (9 litre /dakika) ve 16 saniye vakum gaz çıkışı (2,5 litre/ dakika) uygulanarak 70 dakika sürenin sonunda oksijen seviyesi yüzde 1,3 değerlerine ulaşmıştır. Şekil 6 ve Şekil 7'de bulunan grafikler incelendiğinde oksijen miktarı aşağı seviyelere düştükçe oksijen seviyesinin düşme hızında da azalma olduğu görülmektedir. Bunu şu şekilde açıklayabiliriz. Oksijen seviyesinin yüzde 21 seviyesinden yüzde 10 seviyesine düşme süresi 10 dakika sürmüştür. Yüzde 21 seviyesinden yüzde 2,5 seviyesine düşmesi ise 40 dakika sürmüştür. Eğer oksijen seviyesi aynı sürede yarısı seviyesine düşme gerçekleşmiş olsa; bu değer 30 dakika olması gerekirdi.

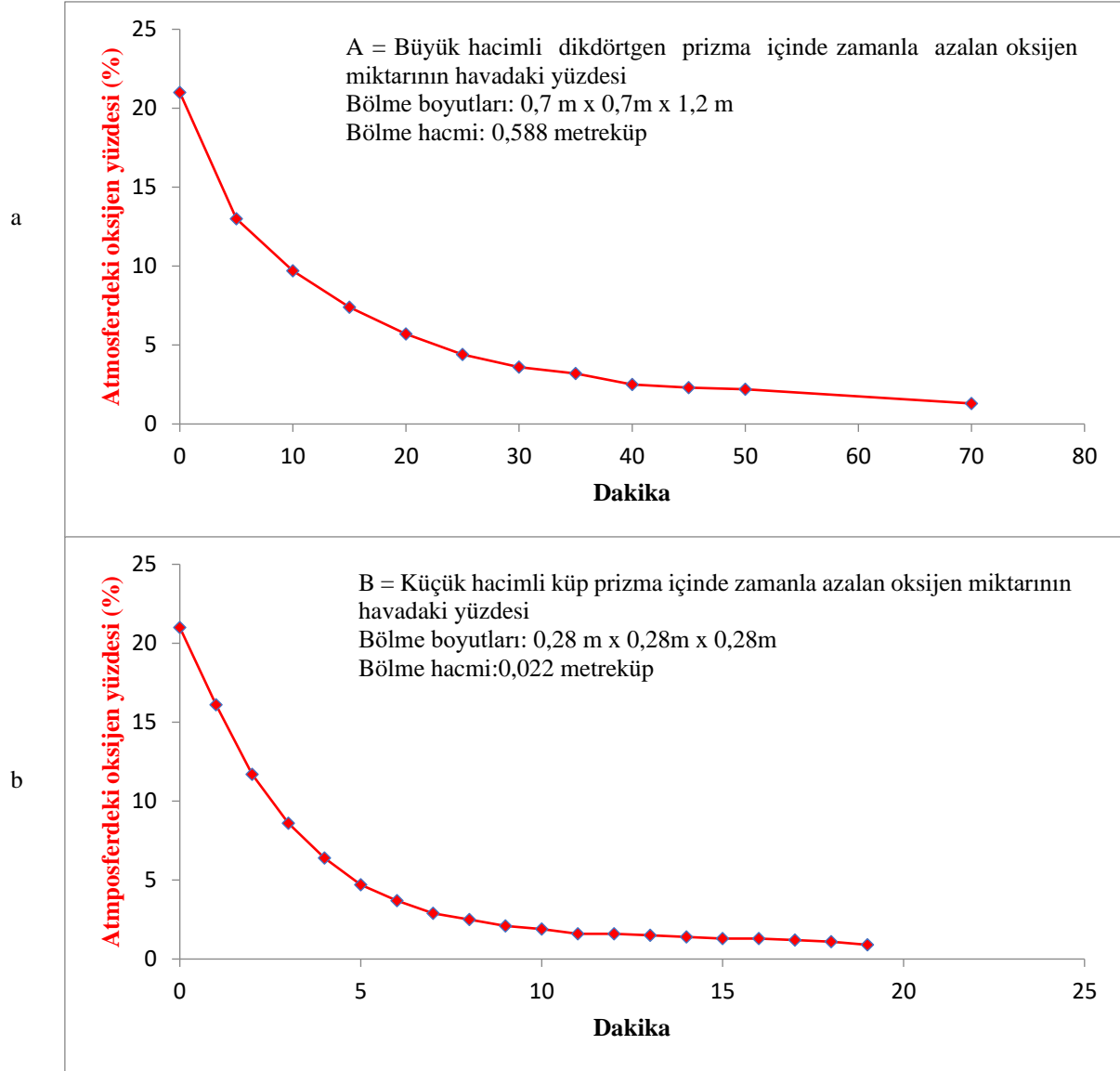
0,022 metreküp hacme sahip olan küçük küp B prizması içinde 29 saniyelik periyot içinde 4 saniye gaz girişi (9 litre /dakika) ve 25 saniye vakum gaz çıkışı (1,25 litre/ dakika) uygulanarak yaklaşık 20 dakika sürenin sonunda oksijen seviyesi yüzde 0,9 değerine ulaşmıştır. Şekil 7a da görüldüğü gibi oksijen seviyesi yüzde bir seviyelerine yaklaştığı halde 50. ve 70. dakika arasında oksijen seviyesi düşme hızı oldukça yavaşlamıştır. Oksijenin seviyesinin daha da aşağı seviyelere gelmesi için çok daha fazla zaman gerekmektedir (Tablo 1). Bunun sonucu olarak oksijen seviyesi ppm seviyelerine düşürülmek istenildiğinde çok daha uzun süre boyunca PLC kontrollü gaz tazeleme sisteminin çalıştırılması gerekmektedir.

Tablo 1. Glove box sisteminin A ve B bölmesi içinden elektrokimyasal oksijen sensörü kullanılarak alınan akım değerleri ve karşılık gelen oksijen yüzdeleri

A bölmesi			B Bölmesi		
Dakika	μA	oksijen yüzdesi	Dakika	μA	oksijen yüzdesi
0	63	21	0	63,4	21
5	37,7	13	1	48,8	16,1
10	26,2	9,7	2	32	11,7
15	18	7,4	3	22,5	8,6
20	12,2	5,7	4	15	6,4
25	8,4	4,4	5	9,2	4,7
30	5,8	3,6	6	6	3,7
35	4,6	3,2	7	4	2,9
40	2,9	2,5	8	2,7	2,5
45	2,3	2,3	9	1,8	2,1
50	2	2,2	10	1,3	1,9
70	0,4	1,3	15	0,5	1,3
			20	0,1	0,9



Şekil 6. (a) Sistem çalıştıktan sonra büyük prizma eldiven kutusu içinde zamanla azalan oksijen miktarını gösteren elektrokimyasal sensör tepkisi (b) Sistem çalıştıktan sonra küçük küp prizma kutusu içinde zamanla azalan oksijen miktarını gösteren elektrokimyasal sensör tepkisi



Şekil 7. a) Sistem çalıştıktan sonra büyük prizma eldiven kutusu içinde zamanla azalan oksijen miktarının yüzdesini gösteren grafik
 b) Sistem çalıştıktan sonra küçük küp prizma kutusu içinde zamanla azalan oksijen miktarının yüzdesini gösteren grafik

5. Sonuç

PLC kontrollü atmosfer kontrol sistemi sağlıklı bir şekilde çalışmıştır. PLC sistemindeki zaman parametreleri istenildiğinde tuş takımı üzerinden değiştirilebilmektedir. Elde edilen veriler incelendiğinde 0,588 metreküp hacmindeki bir dikdörtgen prizmanın oksijen seviyesinin sıfıra seviyesine doğru düşmesi 70 dakika sürmüştür. Küçük olan 0,022 metreküp hacmindeki küp prizmanın oksijen seviyesinin yüzde 0,9 seviyesine düşmesi ise yaklaşık 20 dakika sürede gerçekleşmiştir. Elektrokimyasal sensör ve multimetre yardımı ile oksijen seviyesinin kontrolünün rahatlıkla gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. PLC otomasyonu ve elektrokimyasal oksijen sensörü verileri kullanılarak sistemin maliyeti en az beşte bir seviyelerine kadar çekilmiştir. Buna benzer sistemlerin kolaylıkla tasarlanması için elde edilen veriler ve gaz seviyesi ölçüm yöntemi yol gösterici bir niteliğe sahiptir.

Teşekkür

Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürlüğüne (KÜBTUAM) verdikleri destek ve yardımlar için teşekkür ederim. Ayrıca bu çalışmada cihazın montaj ve birleştirme aşamalarında, benden yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Gör. Ümit ERDEM arkadaşşıma da teşekkür ederim.

Referanslar

- 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.
- Doğan, M. (2021). Polymer-layered oxygen sensor design and testing. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 1-11.
- Doğan, M. (2021). Ultraviolet light accelerates the degradation of polyethylene plastics. *Microscopy Research and Technique*, 84(11), 2774-2783.
- Doğan, M., Erdem, Ü., & Ökten, S. (2021). Production of organic light-emitting diode with fluorescence featured quinoline derivative. *International Journal of Chemistry and Technology*, 5 (2) , 172-177.
- Fedorova, A. A., Anishchenko, D. V., Beletskii, E. V., Kalnin, A. Y., & Levin, O. V. (2021). Modeling of the overcharge behavior of lithium-ion battery cells protected by a voltage-switchable resistive polymer layer. *Journal of Power Sources*, 510, 230392.
- Frohn, A., Dick, H. B., Augustin, A. J., & Grus, F. H. (2001). Late opacification of the foldable hydrophilic acrylic lens SC60B-OUV. *Ophthalmology*, 108(11), 1999-2004.
- Kerlau, M., Marcinek, M., Srinivasan, V., & Kosteckı, R. M. (2007). Reprint of “Studies of local degradation phenomena in composite cathodes for lithium-ion batteries”. *Electrochimica Acta*, 53(3), 1385-1392.
- Kucenic, M. J., Patel, M., Feldman, S. R., Liguori, A., & Fleischer, A. B. (2002). Visual discrimination testing of ultraviolet transmitting and ultraviolet blocking acrylic thermoplastics. *Photodermatology, photoimmunology & photomedicine*, 18(5), 228-231.
- Kumar, V. S., Kumar, R., Sivaraman, N., Ravisankar, G., & Vasudeva Rao, P. R. (2010). Design and adaptation of a novel supercritical extraction facility for operation in a glove box for recovery of radioactive elements. *Review of Scientific Instruments*, 81(9), 094101.
- Lee, S., Kim, S. H., Jo, Y. Y., Ju, W. T., Kim, H. B., & Kweon, H. (2021). Effects of ultraviolet light irradiation on silk fibroin films prepared under different conditions. *Biomolecules*, 11(1), 70.
- Liu, D. , QingXin, Z., YanQing, Y., HongFei, L., LiJia, C., QunLiang, S. (2020). Controllable Multistep Preparation Method for High Efficiency Perovskite Solar Cells with Low Annealing Temperature in Glove Box. *Energy Technology*, 8(7), 2000071.
- Pal, K., SI, A., Stephen, R., & Thomas, S. (2021). Conductive Polymer Nanocomposites for Organic Light-Emitting Diodes (OLEDs). *Handbook of Polymer and Ceramic Nanotechnology*, 281-292.
- Petrova, E. V., Avadhanula, V., Michel, S., Gincoo, K. E., Piedra, P. A., & Anandasabapathy, S. (2019). Remote laboratory management: respiratory virus diagnostics. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, (146), e59188.
- Spyratou, E., Antonakos, I., Kareliotis, G., Bacharis, C., & Efstathopoulos, E. P. (2021). X-ray radiation affects the protection filter of yellow-tinted acrylic hydrophobic intraocular lenses against harmful UV-A and blue light. *Hellenic Journal of Radiology*, 6(3).
- Szolga, L. A., & Stan, C. A. (2021). Plexiglass glove box for organic solar cells. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1032, No. 1, p. 012048). IOP Publishing.
- Vauchy, R., Fouquet-Métivier, P., Martin, P. M., Maillard, C., Solinhac, I., Guéneau, C., & Léorier, C. (2021). New sample stage for characterizing radioactive materials by X-ray powder diffraction: application on five actinide dioxides ThO₂, UO₂, NpO₂, PuO₂ and AmO₂. *Journal of Applied Crystallography*, 54(2), 636-643.
- Zhou, S., Wu, L., Xiong, M., He, Q., & Chen, G. (2005). Dispersion and UV-VIS Properties of Nanoparticles in Coatings. *Journal of dispersion science and technology*, 25(4), 417-433.



Negatif Poisson Oranına Sahip Sandviç Kompozitlerin Statik Davranışının Belirlenmesi

Determination of Static Behavior of Sandwich Composites with Negative Poisson Ratio

Munise Didem Demirbaş¹ , Onur Demir² 

¹Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kayseri, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 04/12/2021

Kabul / Accepted: 21/01/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Bu çalışmada, mühendislik malzemesi olarak pek çok yeni araştırmanın konusu olan negatif poisson oranına sahip yapıların statik davranışı sayısal olarak belirlenmiştir. Al plakalar arasına ABS ve PLA çekirdek malzemelerinin yerleştirilmesiyle oluşturulan sandviç kompozit yapılar, negatif poisson oranına sahip yapıyla modellenmiştir. Ayrıca kompozit malzemelerin kıyaslanması için sandviç malzeme bileşenlerinin de aynı şartlar altında analizleri yapılmıştır. Statik analizler Ansys Workbench programı ile araştırılmıştır. Statik tesir altında tüm kompozisyonlarda çekirdek geometrisine bağlı olarak negatif poisson oranına uygun davranış gözlenmiştir. PLA çekirdek malzemesine sahip sandviç kompozit yapıda en düşük yer değiştirme ve gerilme seviyeleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Kompozit malzemeler, Negatif Poisson oranı, statik analiz”

Abstract

In this study, the static behavior of structures with negative Poisson's ratio, which was the subject of many new researches as engineering materials, was determined numerically. The sandwich composite structures formed by placing ABS and PLA core materials between the Al plates were modeled with a negative Poisson ratio structure. In addition, for the comparison of the composite material, the analysis of the sandwich material components was carried out under the same conditions. Static analyzes were investigated with the Ansys Workbench program. A negative Poisson ratio behavior was observed in all compositions under the static influence, depending on the core geometry. The lowest displacement and stress levels were obtained in the sandwich composite structure with PLA core material.

Key Words

“Composite materials, Negative Poisson's ratio, static analysis”

1. Giriş

Mühendislik alanında üst düzey gelişmeler günümüzde daha mukavemetli, aynı zamanda daha hafif yapı ve malzemelerin oluşmasını sağlamaktadır. Bu yapılara kompozit malzeme yapılarını örnek verebiliriz. Kompozit malzeme iki veya daha fazla bileşenden meydana gelen malzemelerdir. Bu bileşenler makroskobik seviyede bir araya getirilirler ve birbirleri içinde çözünmezler. Takviye elemanı olarak adlandırılan bileşen; fiber, partikül veya ince levha şeklinde olabilir. Diğer bileşen ise matris fazıdır (Ceyhun ve Turan, 2003). Bu malzemeler daha dayanımlı olmasının yanında hafif olmaları mühendislikte büyük öneme sahiptir. Son zamanlarda doğadan esinlenerek, tek eksenli bir yüklemeye hali için yanal ile eksenel şekil değiştirme oranının aynı işaretli olması yani negatif Poisson oranına sahip olması durumu çalışmalara konu olmaktadır. Literatürde, Poisson oranı, tek eksenli bir şekil değiştirme hali için yanal ile eksenel şekil değiştirme oranının negatif işaretli olarak tanımlanır ve daima pozitifdir (Korkut, 2019). Negatif Poisson oranlı malzemelere auxetic malzemeler denilmektedir. Auxetic malzemeler kuvvet etkisi altında basma tesirinde daralan, çekme tesirinde ise genişleyen malzemelerdir. Auxetic malzemelerin geometrik yapılarından dolayı açığa çıkan; yüksek enerji absorbe yeteneği, sürtünme dayanımı, hafiflik, kopma dayanımı vb. avantajlar göz önünde bulundurulduğu zaman mühendislik alanında verimli olabileceği düşünülmektedir.

Araştırmalar göz önünde bulundurulduğunda, negatif Poisson oranına sahip yapıların sandviç kompozit yapılara dahil edilmesi ile kullanım amacına uygun olarak verimli malzeme bileşimi oluşturulabileceği düşünülmektedir.

1.1. Literatür Araştırması

Mühendislik yapılarında meydana gelebilecek hataları önceden tahmin edip bu hatalar doğrultusunda tasarım ve analiz yapmak çok büyük öneme sahiptir. Ani darbe sonucu oluşan kalıcı deformasyonlar geçmişten günümüze önemli sorunlara sebep olmaktadır. Kuvvet veya ani darbe sonucunda malzemelerde oluşabilecek enerji değişimi ve yetersiz sürtünme dayanımı kalıcı deformasyonlara yol açabilmektedir. Bu olumsuz etkileri önlemek açısından bu çalışmada; Al plakalar arasına ABS ve PLA çekirdek yapıların yerleştirilmesiyle oluşturulan sandviç kompozit yapıların, negatif Poisson oranına sahip yapıyla modellenmesi ele alınmıştır. Bu yapılar yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yüksek enerji sönümleme ve yüksek eğilme momenti gibi özelliklere sahiptir. Matris malzemenin ve takviye malzemesinin özellikleri, bu fazların birbirlerine yapışma kabiliyeti ve takviye malzemesinin yapı içindeki dizilişi bu kompozit malzemelerin özelliklerini belirlemektedir. (Potoğlu, 2012).

Sandviç kompozitlerin ortasında çok hafif ama mukavemeti düşük, üst ve alt kısmında ise kabuk olarak adlandırılan daha ince fakat mukavemeti yüksek malzemeler (Al, cam, aramid veya karbon gibi) yer alır. Bu tür kompozit malzemelerde ortada ara malzeme (veya çekirdek) olarak kullanılan malzemeler genellikle çeşitli köpükler (PVC, PET), balsa ağacı ve bal peteği formundaki Al veya termoplastikten yapılmaktadır (Potoğlu, 2012).

Kompozit malzemeler, yüksek elastik modül ve yüksek özgül mukavemet avantajlarından dolayı, havacılık ve gemi sanayisinde tercih sebebidir. Özellikle tekrarlı yüklere maruz kalan malzemelerin yorulma hasarı davranışı doğru tanımlanmalıdır. Kompozit malzemeler hasarı bünyelerinde depolarlar ve hasar her zaman makroskobik bir hasarla meydana gelmez. Fiber hasarı, ayrılma, ters yönlü tabaka çatlağı ve matris çatlağı gibi hasar türleri oluşabilmektedir (Imak vd., 2016).

Malzemenin karakteristik özelliklerinden biri Poisson oranıdır. Poisson oranının tanımı şu şekilde yapılmaktadır: Bir malzemeye uygulanan kuvvetin dik doğrultusunda oluşan birim şekil değiştirme ile kuvvetin uygulandığı doğrultudaki birim şekil değiştirme oranı Poisson oranıdır. En basit tanımlamayla Poisson oranı bir malzemenin basınç altında ne kadar daraldığının ya da genişlediğinin matematiksel değeridir (Işıltan, 2017).

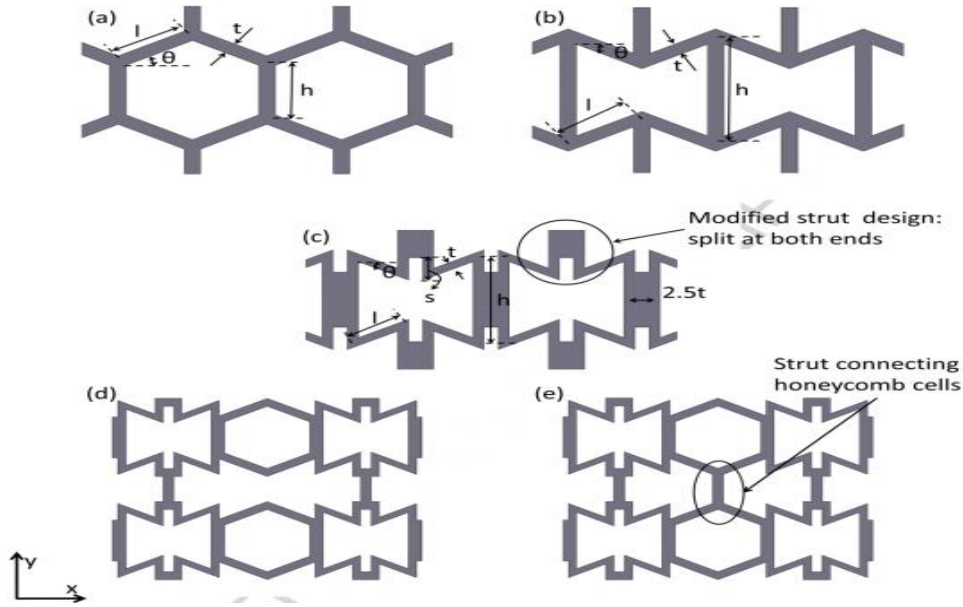
Günümüzde kullanım alanlarında sağladığı farklı mekanik özellikler nedeni ile farklı Poisson oranına sahip malzemeler tasarlanmaktadır. Bu kapsamda gün geçtikçe artan bir çalışma konusu olan ve farklı mekanik özelliklerinden faydalanmak için tasarlanan negatif Poisson orana sahip malzemeler bulunmaktadır. Bu malzemeler mekanik meta malzemeler olarak isimlendirilmektedir (Uzun 2017). Mekanik meta malzemeler, özelliklerini kimyasal yapılarından değil fiziksel yapılarından türeten, doğada ve kendisini oluşturan malzemelerde gözlemlenmeyen özellikler sergileyen malzemelerdir. Bu özellikleri nedeni ile mekanik meta malzemeler, dâhili mikro yapılarının programlanmış bir tasarımı ile ayarlanabilmektedir (Yu vd., 2018). Mikro-yapılı meta malzemelerin geleneksel işleme teknikleri kullanılarak üretilmesi daha önceleri zor olmakta iken, son zamanlarda gelişmiş 3B baskı tekniklerinin ortaya çıkması üretim noktasından yaşanan engelleri ortadan kaldırmıştır (Jiang ve Li, 2018).

Mekanik bir meta malzeme gözlemlenen negatif Poisson oranı, hücre tasarımlarına göre farklılık göstermektedir. Yapılan mekanik meta malzeme tasarımları sayesinde çok geniş bir aralıkta ayarlanabilir olmaktadır (Berwind vd., 2018). Bu alanda yapılan en eski çalışmalarda, Re-entrant olarak adlandırılan yapısal hücre tasarımına sahip mekanik meta malzeme kullanılmış ve -0.7 negatif Poisson oranına sahip bir meta malzeme bildirmiştir (Lakes, 1987).

Negatif Poisson oranı sahip malzemeler pozitif Poisson oranına sahip malzemelerin tersine olağanüstü bir özellik olarak gerildikçe genişlerler ve basıldıkça daralır. Bu özellik geçen yüzyıldan beri bilinmesine rağmen mekanik ve mantık olarak anlaşılması ve malzemelere uygulanması 1980'li yıllarda başlanmıştır. İlk olarak 1987 yılında Rod Lakes tarafında Science dergisinde negatif Poisson oranına sahip "foam" yapılar yayımlanmıştır (Uzun, 2017).

Ayrıca meta malzeme hücresel tasarımına sahip sandviç yapıların, yapısal tepkileri, kırılma mekanizmaları, burkulma davranışı, darbe ve enerji soğurma yetenekleri bir auxetic hücresel çekirdekteki yapıları muadilleriyle karşılaştırıldığında; Re-entrant meta malzemeden üretilmiş çekirdeğe sahip sandviç yapıların, çekirdek topolojisinin ve geometrik parametrelerinin, kırılma mekanizmaları ve enerji soğurma yetenekleri üzerinde önemli rol oynadığı bulunmuştur (Sarvestani vd., 2018). Tasarlanan meta malzemelerden üretilmiş çekirdeğe sahip sandviç yapılar, hem geliştirilmiş enerji soğurma özelliğine hem de önemli derecede hafiflik sağlayacaktır (Yuan vd., 2019).

Re-entrant peteğine temel alınarak geliştirilmiş negatif poisson oranına sahip petek tasarımı yapılan bir başka çalışmada iç çeper birleşim yerleri modifiye edilerek hibrit bir yapı oluşturulmuş ve 3B yazıcı kullanarak alınan numuneler üzerinde testler yapılmıştır. Çalışmada kullanılan hibrit yapıların yüksek enerji emici mekanik özelliklere sahip oldukları görülmüştür (Ingrole vd., 2017). Bal peteği ve Re-entrant yapılar ile yeni elde edilen hibrit yapıların geometrileri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 1.).



Şekil 1. Birim hücre tasarımları (a) bal peteği, (b) re-entrant auxetic, (c) auxetic-struts, (d) auxetic-honeycomb1 (AH-V1) hibrit yapı, ve (e) auxetic-honeycomb2 (AH-V2) hibrit yapı (Ingrole vd., 2017).

Negatif Poisson oranına sahip malzemeler ile ilgili 3B yazıcılarda kullanılabilen malzemeler düşünülerek araştırmalar yapılmaktadır. 3B yazıcılarda aktif olarak kullanılabilen çekirdek malzemeleri ise Akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve Poliaktik Asit (PLA)'dir. ABS plastik darbelere karşı direnci yüksek olan ve dayanıklı gövdelerde kullanılan hafif bir malzemedir. PLA plastik petrol bazlı olmayan sert ve düşük genleşme katsayısına sahip bir bio malzemedir (Dirim, 2021).

3D baskı teknolojisi, havacılık endüstrisinde, birçok tıbbi aletin hafif ve karmaşık yapısal modellenmesinde, üretiminde ve prototiplenmesinde kullanılan bir eriyik birikim modelleme (FDM) yöntemidir. Polilaktik asit (PLA), toksik olmaması, biyolojik olarak parçalanabilirliği, endüstriyel tasarımlar ve tıbbi uygulamalar için kolay üretilebilirliği nedeniyle 3D yazıcılarda hammadde olarak kullanılmaktadır (Boğa vd.,2021).

ABS plastiklerinin avantajları; dayanıklı, kolay işlenebilir ve kimyasal direnci çok iyi olan polimer malzemedir. ABS, Geniş bir sıcaklık aralığında kullanılmasının yanı sıra su buharına karşı mükemmel bir bariyerdir. Bariyer özelliği yoğunluğun artmasıyla birlikte artan kristalite derecesi, dayanıklılık, sertlik ve erime sıcaklığına bağlı olarak artış gösterir (Şen vd., 2020).

Yenilenebilir kaynaklardan üretilen biyolojik olarak çözünebilir bir polyester olan PLA, çeşitli uygulamalar (biyomedikal, ambalaj, tekstil elyafları ve teknik ürünler) için kullanılmaktadır. Özellikleri nedeniyle PLA, biyopolimerler pazarında önemli bir yere sahiptir ve gelecekteki kullanım olanaklarına bakıldığında en umut verici biyopolimer adaylarından biridir. PLA'nın farklı uygulamalar için özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, PLA matrisi içine takviye edici liflerin, mikro ve/veya nano dolgu maddelerinin ve seçilen katkı maddelerinin eklenmesi ile istenen son kullanım özelliklerinde büyük iyileştirmeler elde edilmesi mümkün görünmektedir (Ermeşyan ve Aykanat, 2019).

Ayrıca alüminyum ve alaşımları, takviye malzemeleri ile fiziksel ve kimyasal uyumluluk, hafiflik, düşük yoğunluk, yüksek elektrik, yüksek ısı iletkenliğine sahip olmaları ve geniş uygulama alanları nedeniyle metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak

tercih edilmektedirler (Öztop ve Gürbüz, 2017). Bu nedenle sandviç kompozit yapıda ABS ve PLA çekirdek katmanın alt ve üst kısmında kabuk olarak alüminyum ve alaşımları seçilmesi uygun niteliktedir.

2. Malzeme ve Metot

2.1. Sandviç Kompozit Yapılar

Kompozit malzemeler; üstün avantajlara sahip olan, devamlı gelişim gösteren ve yeni yapıların oluşmasına imkan tanıyan bir olgudur. Bu gelişimlerden doğan yapıların en önemlilerinden biri Sandviç kompozit yapılarıdır. Literatürde yer alan bilgiler göz önünde bulundurulduğunda; bu şekilde bir yapıyla, darbelere karşı enerji absorpsiyonu sağlanarak yüksek dayanım elde etmek mümkün olabilmektedir.

Bu çalışmada; 2 katmanlı 3'er mm kalınlığında Al arasına 4mm kalınlığında ABS ve PLA (3mmAl-4mmABS-3mmAl/3mmAl-4mmPLA-3mmAl) malzemelerinin ayrı ayrı yerleştirilmesi sonucu, kuvvet etkisi altında her bir yapıda oluşan statik davranış incelenmiştir. Model olarak negatif poisson etkisi gösteren geometriye sahip bir modelleme yapılmıştır.

2.2. Auxetic Malzemeler (Negatif Poisson Oranlı Malzemeler)

Poisson oranını kısaca ve basitçe ifade etmek gerekirse; bir malzemeye kuvvet uygulanması sonucunda, malzemenin yanal şekil değiştirmenin, boyuna şekil değiştirmeye oranı olarak tanımlayabiliriz. Eş.(1), Poisson oranı formülünü göstermekte olup sırasıyla ϵ_{yanal} , $\epsilon_{eksenel}$ yanal ve eksenel şekil değişimlerini göstermektedir.

$$\nu = -\frac{\epsilon_{yanal}}{\epsilon_{eksenel}} \quad (1)$$

Auxetic malzemeler ise, poisson oranının aksine basma etkisinde daralma ve çekme etkisinde genişleme sağlayarak negatif poisson oranlı bir davranış sergilemektedir. Bu davranış neticesinde, üstün sürtünme dayanımı ve kopma dayanımı göstermektedir.

2.3. Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Tablo 1, bu çalışmada kullanılan; Al, ABS, PLA malzemelerinin mekanik özelliklerini göstermektedir.

Tablo 1. Malzemelerin Mekanik Özellikleri

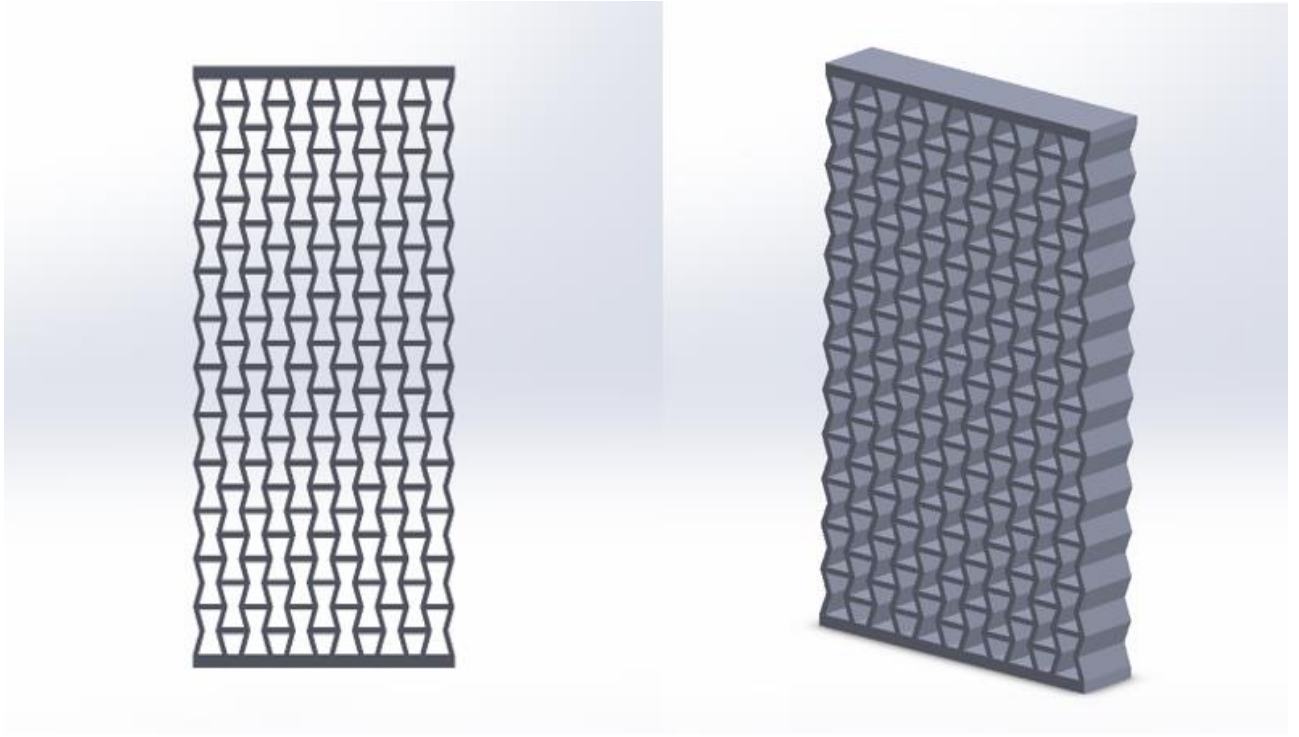
Özellikler	Malzemeler		
	Al	ABS	PLA
Yoğunluk (kg/m^3)	2770	1040	1250
Young Modülü (Pa)	$7,1^{10}$	$2,39^{09}$	$3,45^{09}$
Poisson Oranı (Pa)	0,33	0,399	0,39
Bulk Modülü (Pa)	$6,9608^{10}$	$3,9439^{09}$	$5,2273^{09}$
Kayma Modülü (Pa)	$2,6692^{10}$	$8,5418^{08}$	$1,241^{09}$
Akma Mukavemeti (Pa)	$2,8^{08}$	$4,14^{07}$	$5,41^{07}$
Maksimum Çekme Mukavemeti (Pa)	$3,1^{08}$	$4,43^{07}$	$5,92^{07}$

3. Modelleme ve Analiz

Negatif poisson orana sahip yapı, bilgisayar destekli tasarım programlarından SolidWorks ile gerçekleştirilmektedir. SolidWorks ile auxetic katı modellemesi yapılan parça daha sonra sonlu elemanlar yöntemi programlarından Ansys Workbench'e aktarılarak yukarıda belirtilen sandviç kompozit yapı oluşturulmuştur. Daha sonra kuvvet etkisi altındaki statik sonuçlar incelenecektir.

3.1. Katı Modelleme

şekil 2. Re-entrant hexagon geometrik yapıya sahip negatif poisson oranlı davranış gösteren katı modellemeyi göstermektedir. Modelleme bilgisayar destekli tasarım programlarından SolidWorks ile gerçekleştirilmektedir. 90x48.35x10 mm ölçekli model hem ekstrüzyon hem de düzlemsel yüzey olarak katı ve yüzey oluşturma yöntemiyle gerçekleştirilmektedir.

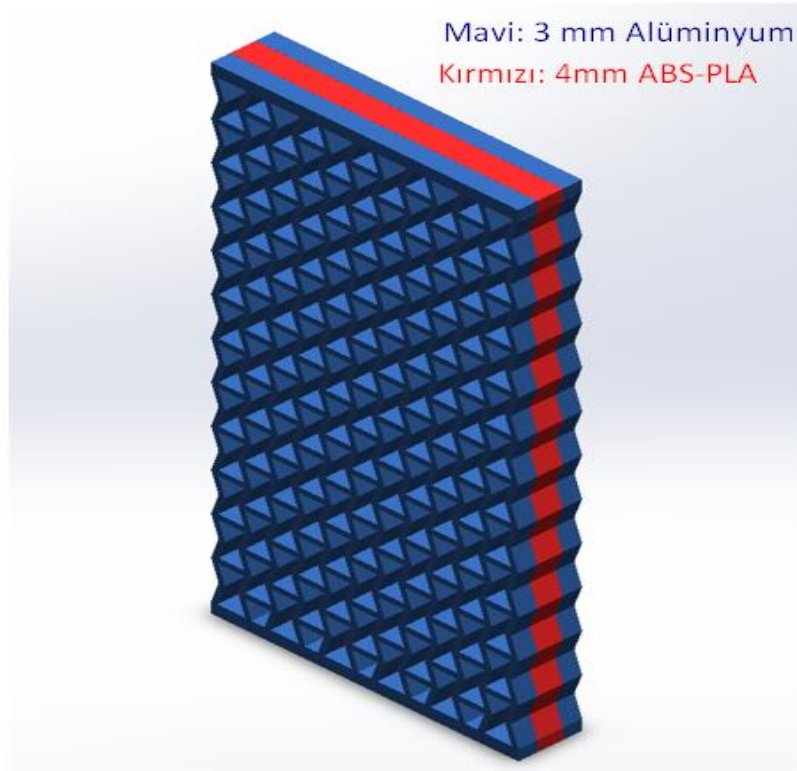


şekil 2. Re-entrant hexagon geometri yapı katı model (90x48,35x10 mm)

3.1.1. Kompozit modelleme

şekil 3'de, Re-entrant hexagon geometrik yapıya entegre edilen sandviç kompozit yapı modeline yer verilmektedir. Bu model, üç katmandan oluşmakta olup şekil 3'de gösterilen 2 adet 3mm kalınlığında Al katman arasına, 1 adet 4mm kalınlığında ABS veya PLA katmanı yerleştirilerek oluşturulmaktadır.

şekil 3'de görülen modelleme ile beş farklı problem incelenecektir. Al-Al-Al, ABS-ABS-ABS, PLA-PLA-PLA, 3mm Al-4mm ABS-3mm Al ve 3mm Al-4mm PLA-3mm Al şeklinde oluşturulan katmanlar ayrı ayrı analiz edilecektir.



Şekil 3. Re-entrant hexagon model de sandviç kompozit katmanları (Mavi: 3mm Al / Kırmızı: 4mm ABS-PLA)

3.2. Analiz

Şekil 2’de, katı modellemesi gösterilen Re-entrant hexagon geometrik yapının statik analizleri sonlu elemanlar yöntemi (FEM) programlarından Ansys Workbench ile gerçekleştirilmiştir. SolidWorks’de parasolid uzantılı kaydedilen model Ansys Workbench’e aktarılmıştır. Sandviç kompozit yapı oluşturmak için ACP (PRE) kullanılmıştır. ACP içerisinde tasarımı yapılan modelin kompozit katmanları oluşturulmuştur.

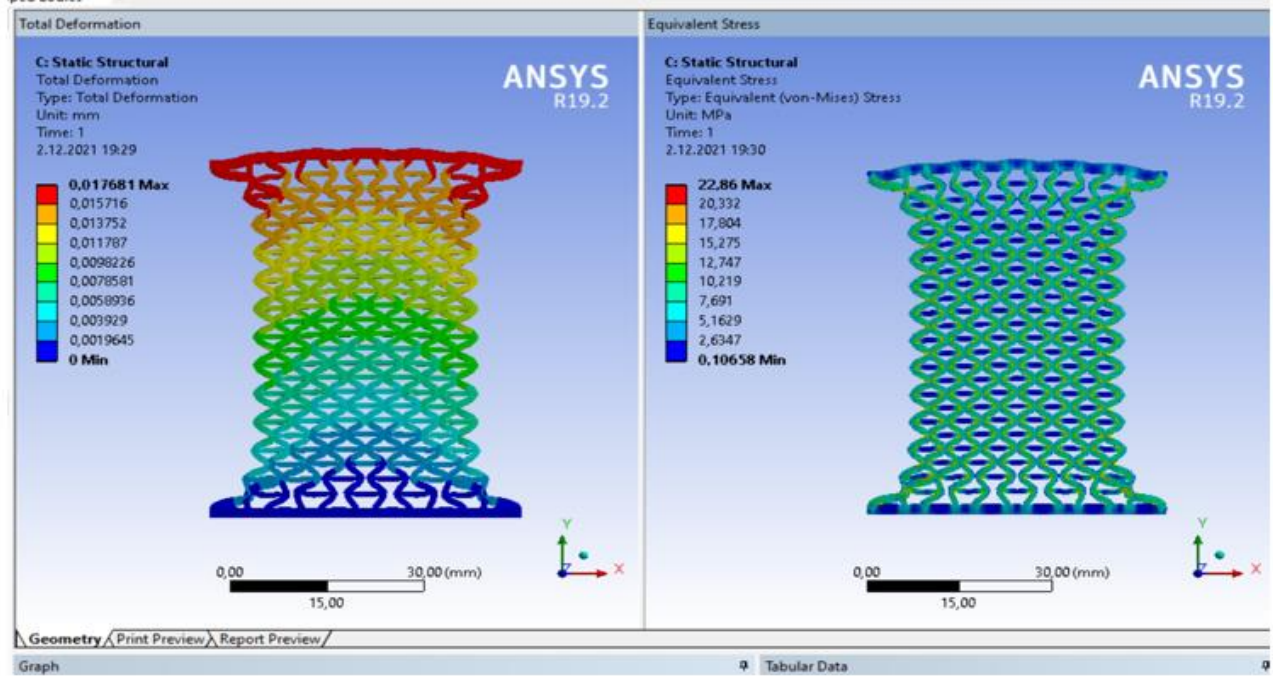
Bu çalışmada, beş farklı malzeme dağılımı konfigürasyonu ele alınmıştır. İlk konfigürasyonda %100 Al’dan oluşan model, ikincide, % 100 ABS’den oluşan model, üçüncüde, % 100 PLA’dan oluşan model, dördüncüde ise, 3 katmanlı; 3mm Al-4mm ABS-3mm Al sandviç kompozit yapı, son olarak da 3 katmanlı; 3mm Al-4mm PLA-3mm Al sandviç kompozit yapı konfigürasyonları için y ekseninden 1000 N’luk kuvvet uygulanmış ve statik davranışı araştırılmıştır. Yapıların yer değiştirme (mm) ve eşdeğer gerilme (MPa) dağılımları incelenmiş ve farklı malzeme dağılımları için elde edilecek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Negatif poisson oranı tesirindeki davranışın net bir şekilde görülmesi açısından analizler beş kat büyütülerek gösterilmektedir. Böylece basma kuvveti etkisi altında iç içe geçen geometrik yapı ve çekme kuvveti etkisi altında genişleyen geometrik yapı daha anlaşılır şekilde simüle edilmektedir.

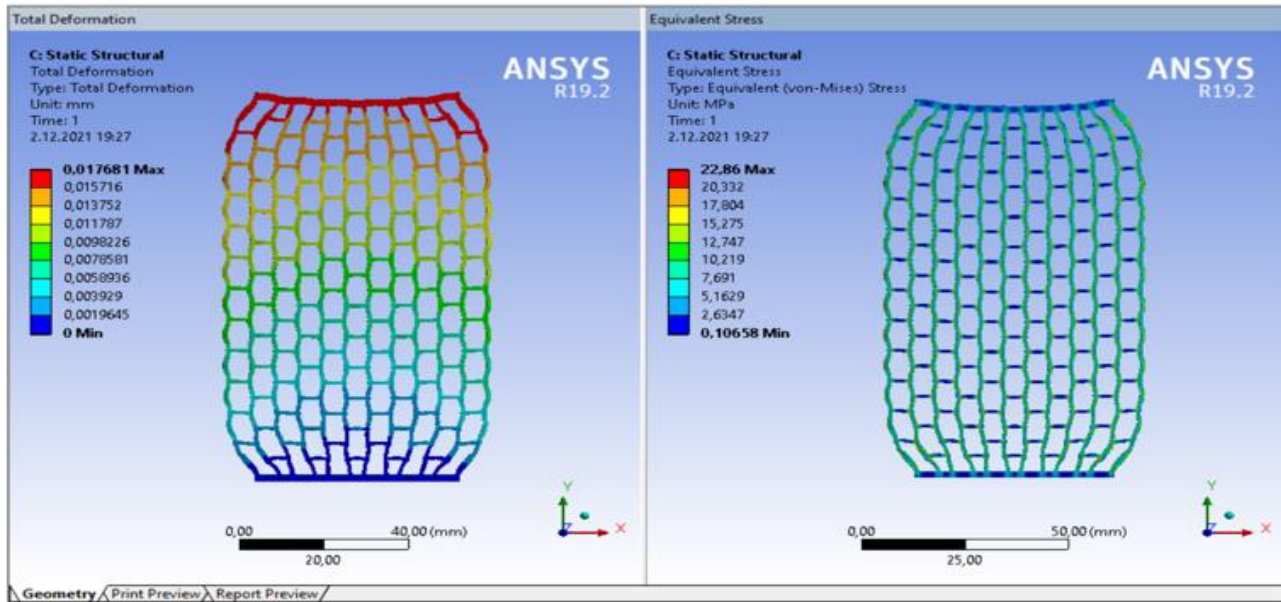
3.2.1. %100 Al

Şekil 4’de, %100 Al ile oluşturulan a) -y ve b) +y yönünde uygulanan 1000 N’luk kuvvet tesirindeki yapının statik analiz sonuçları görülmektedir. Burada lineer geometrik diziliş ve Re-entrant hexagon yapı itibariyle modelde basma kuvveti etkisi altında daralma görülmektedir. Yer değiştirme tesirinde yapı auxetic davranış sergilemektedir. En küçük gerilmeler ise, hücrelerin orta kısımlarındaki birleşim bölgelerinde oluşmaktadır. Şekil 4’de alt kısımda yer alan yer değiştirme ve gerilme dağılımlarında, çekme kuvveti etkisiyle yanal genişleme meydana gelmektedir. Böylece yapı çekme tesirinde auxetic davranışa uygun sonuçları vermektedir.

a)



b)

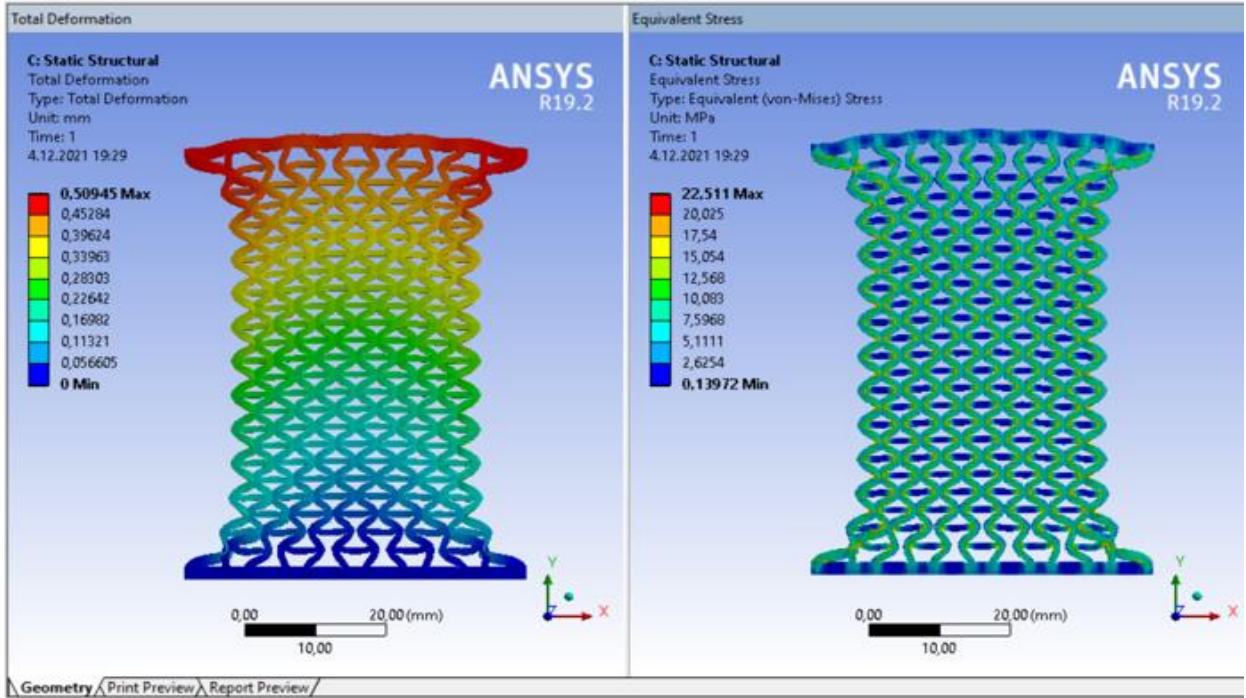


Şekil 4. Eksenel 1000 N kuvvet etkisindeki sırasıyla a) basma ve b) çekme tesirindeki %100 Al olan model için analiz sonuçları

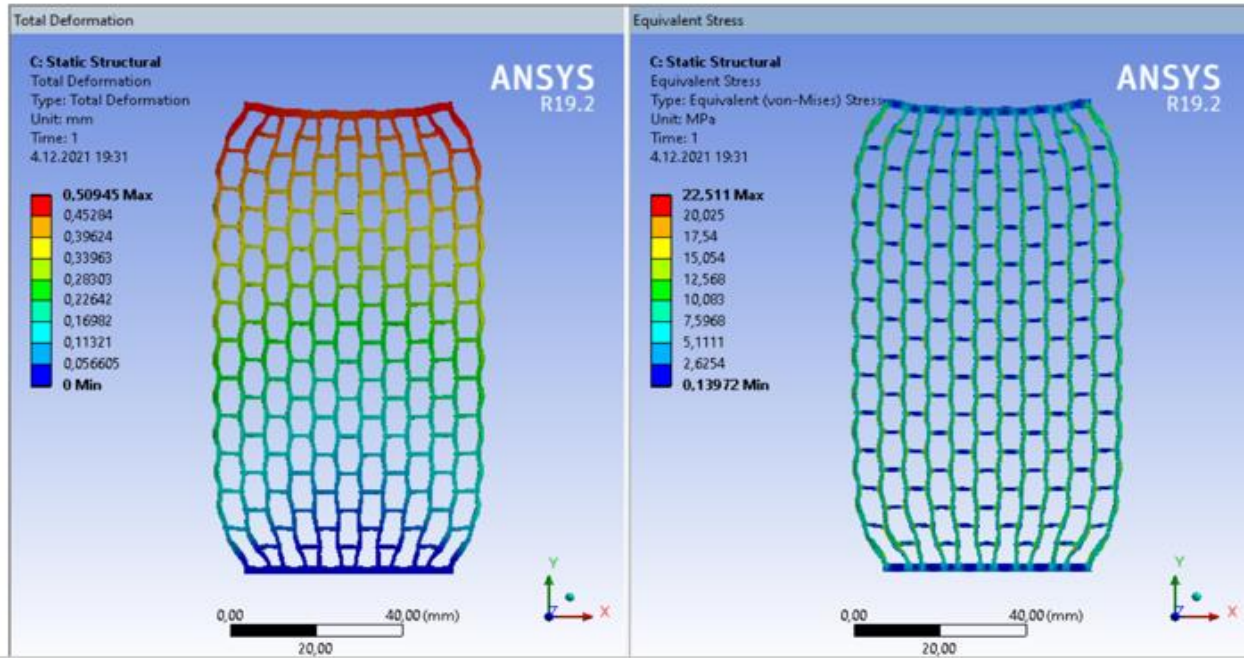
3.2.2. %100 ABS

Şekil 5’de, %100 ABS ile oluşturulan a) -y ve b) +y yönünde uygulanan 1000 N’luk kuvvet tesirindeki yapının statik analiz sonuçları görülmektedir. Burada lineer geometrik diziliş ve Re-entrant hexagon yapı itibarıyla modelde basma kuvveti etkisi altında daralma görülmektedir. Yer değiştirme tesirinde yapı auxetic davranış sergilemektedir. En küçük gerilmeler ise, hücrelerin orta kısımlarındaki birleşim bölgelerinde oluşmaktadır. Şekil 5’de alt kısımda yer alan yer değiştirme ve gerilme dağılımlarında, çekme kuvveti etkisiyle yanal genişleme meydana gelmektedir. Böylece yapı çekme tesirinde auxetic davranışa uygun sonuçları vermektedir.

a)



b)

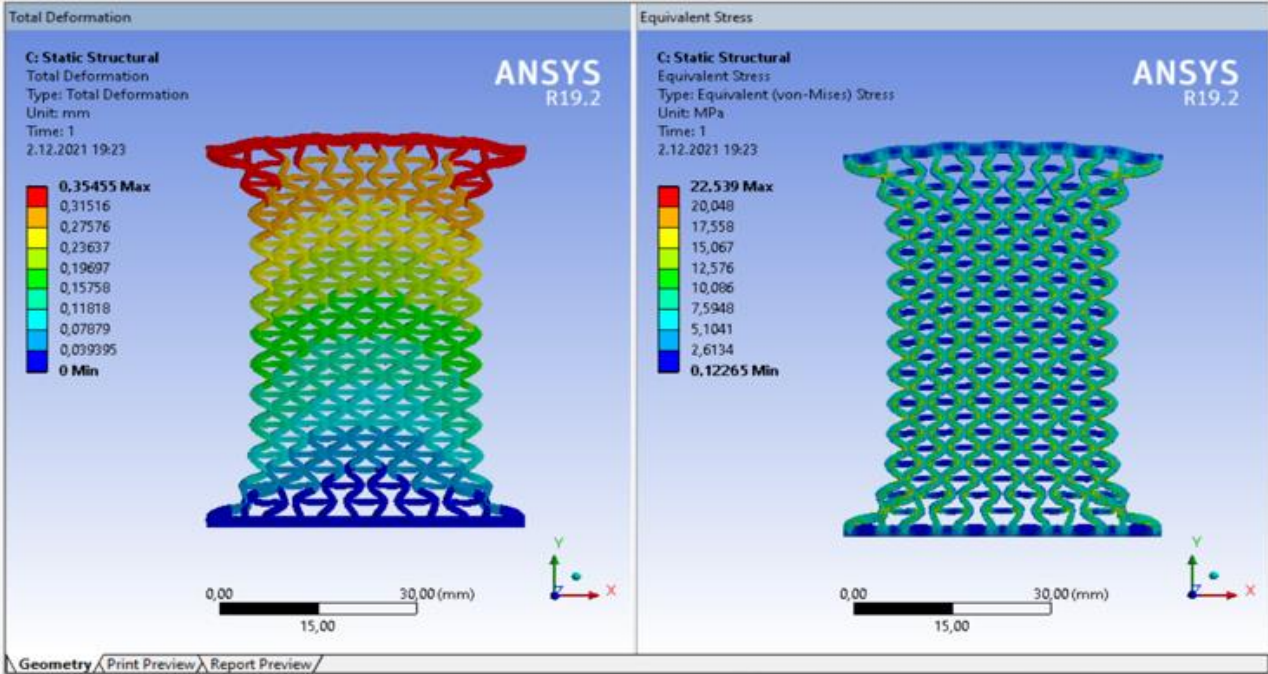


Şekil 5. Eksenel 1000 N kuvvet etkisindeki sırasıyla a) basma ve b) çekme tesirindeki %100 ABS olan model için analiz sonuçları

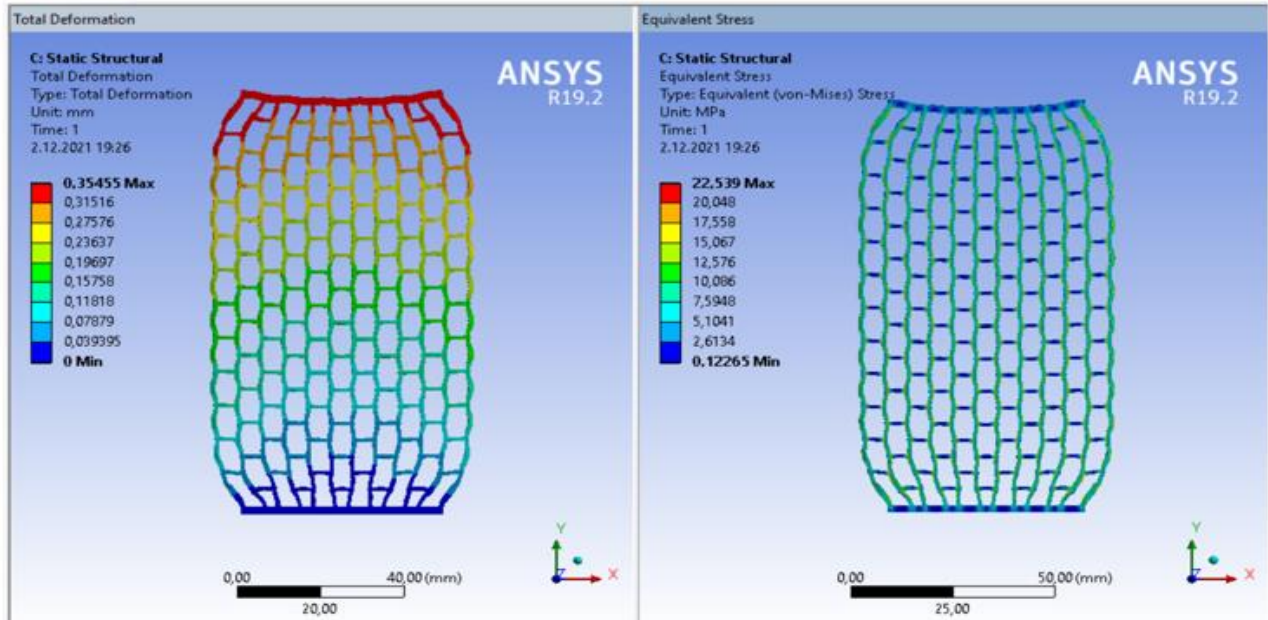
3.2.3. %100 PLA

Şekil 6'da, %100 PLA ile oluşturulan a) -y ve b) +y yönünde uygulanan 1000 N'luk kuvvet tesirindeki yapının statik analiz sonuçları görülmektedir. Burada lineer geometrik diziliş ve Re-entrant hexagon yapı itibariyle modelde basma kuvveti etkisi altında daralma görülmektedir. Yer değiştirme tesirinde yapı auxetic davranış sergilemektedir. En küçük gerilmeler ise, hücrelerin orta kısımlarındaki birleşim bölgelerinde oluşmaktadır. Şekil 6'da alt kısımda yer alan yer değiştirme ve gerilme dağılımlarında, çekme kuvveti etkisiyle yanal genişleme meydana gelmektedir. Böylece yapı çekme tesirinde auxetic davranışa uygun sonuçları vermektedir.

a)



b)

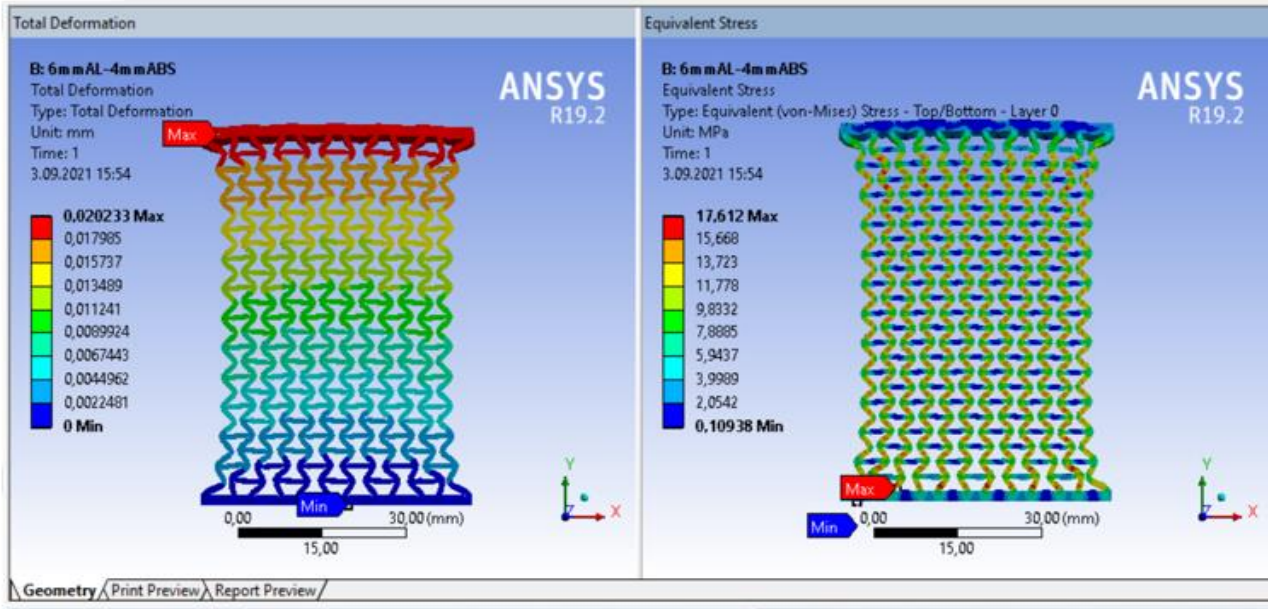


Şekil 6. Eksenel 1000 N kuvvet etkisindeki sırasıyla a) basma ve b) çekme tesirindeki %100 PLA olan model için analiz sonuçları

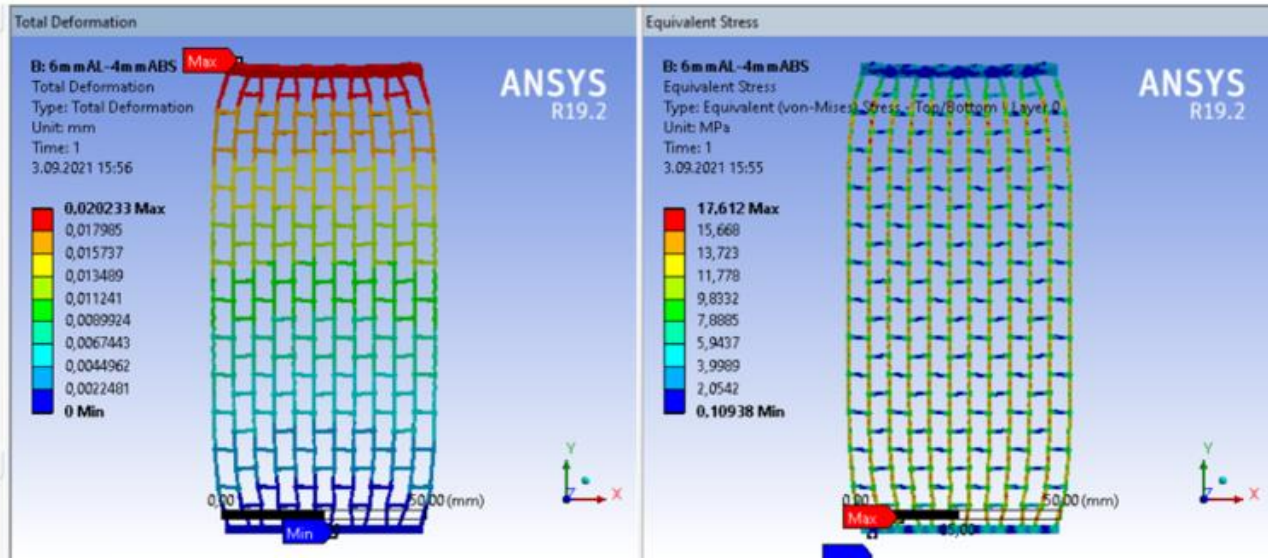
3.2.4. 3 mm Al-4 mm ABS-3 mm Al model

Şekil 7’de, 3 mm Al-4 mm ABS-3 mm Al sandviç kompozit yapının a) -y ve b) +y yönünde uygulanan 1000 N’luk kuvvet tesirindeki statik analiz sonuçları görülmektedir. Burada lineer geometrik diziliş ve Re-entrant hexagon yapı itibarıyla modelde basma kuvveti etkisi altında daralma görülmektedir. Yer değiştirme tesirinde yapı auxetic davranış sergilemektedir. En küçük gerilmeler ise, hücrelerin orta kısımlarındaki birleşim bölgelerinde oluşmaktadır. Şekil 7’de alt kısımda yer alan yer değiştirme ve gerilme dağılımlarında, çekme kuvveti etkisiyle yanıl genişleme meydana gelmektedir. Böylece yapı çekme tesirinde auxetic davranışa uygun sonuçları vermektedir. Sandviç kompozit yapıda %100 Al/ABS/PLA modellere kıyasla daha düşük yer değiştirme ve gerilme sonuçları oluşmaktadır.

a)



b)

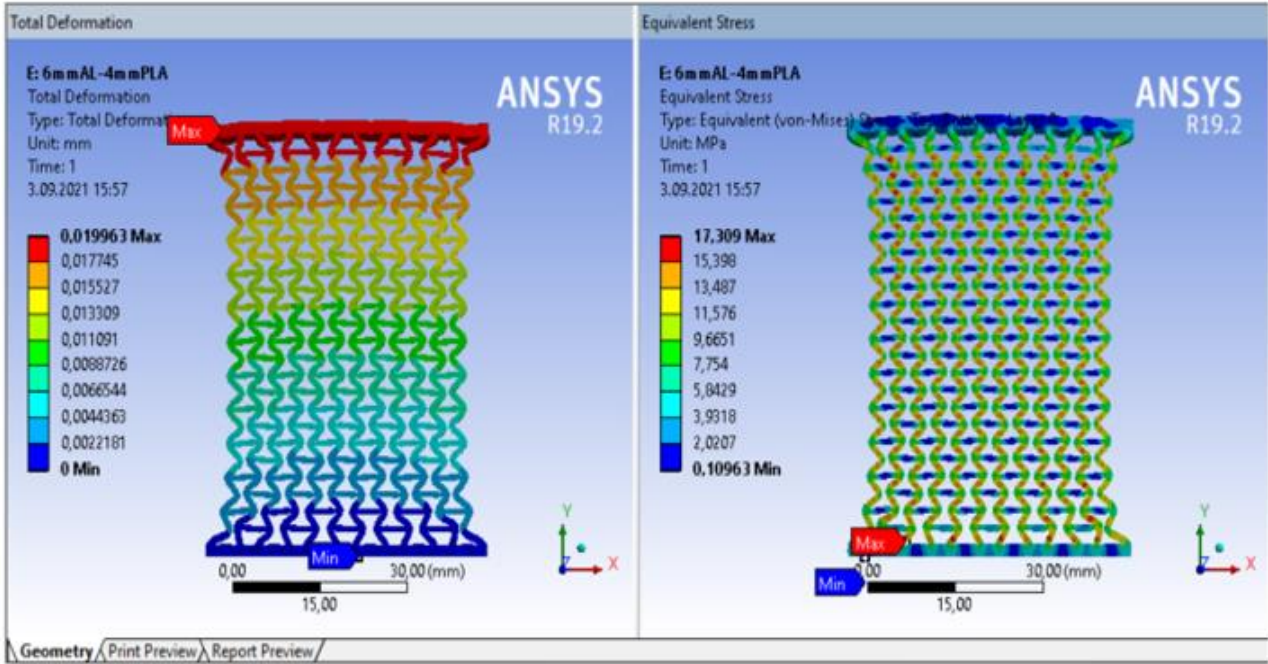


Şekil 7. Eksenel 1000 N kuvvet etkisindeki sırasıyla a) basma ve b) çekme tesirindeki 3 mm Al -4 mm ABS -3 mm Al olan model için analiz sonuçları

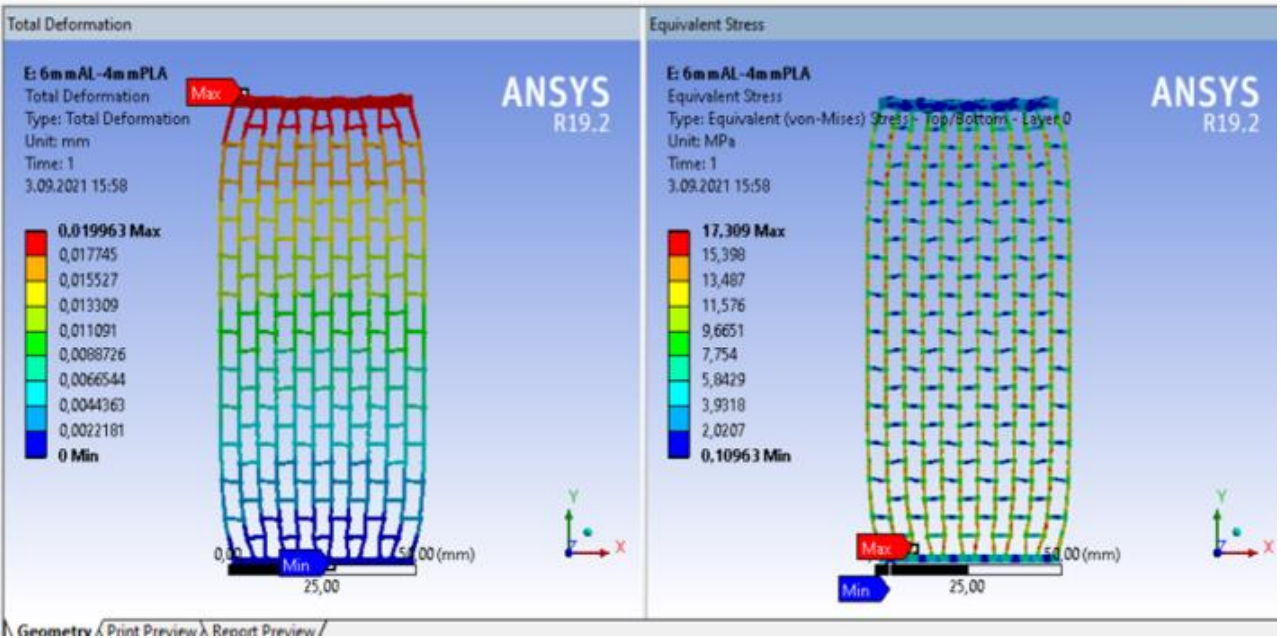
3.2.5. 3 mm Al -4 mm PLA -3 mm Al model

Şekil 8'de, 3 mm Al-4 mm PLA-3 mm Al sandviç kompozit yapının a) -y ve b) +y yönünde uygulanan 1000 N'luk kuvvet tesirindeki statik analiz sonuçları görülmektedir. Burada lineer geometrik diziliş ve Re-entrant hexagon yapı itibarıyla modelde basma kuvveti etkisi altında daralma görülmektedir. Yer değiştirme tesirinde yapı auxetic davranış sergilemektedir. En küçük gerilmeler ise, hücrelerin orta kısımlarındaki birleşim bölgelerinde oluşmaktadır. Şekil 8'de alt kısımda yer alan yer değiştirme ve gerilme dağılımlarında, çekme kuvveti etkisiyle yanıl genişleme meydana gelmektedir. Böylece yapı çekme tesirinde auxetic davranışa uygun sonuçları vermektedir. Sandviç kompozit yapıda %100 Al/ABS/PLA modellere kıyasla daha düşük yer değiştirme ve gerilme sonuçları oluşmaktadır.

a)



b)



Şekil 8. Eksenel 1000 N kuvvet etkisindeki sırasıyla a) basma ve b) çekme tesirindeki 3 mm Al - 4 mm PLA - 3 mm Al olan model için analiz sonuçları

3.3. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Tablo 2.'de sandviç kompozit yapıların ve %100 Al, %100 ABS, %100 PLA malzeme ataması yapılan modellerin analiz sonuçları gösterilmektedir. Kuvvet +y (çekme) ve -y (basma) yönünde 1000 N olarak uygulanmaktadır. Sonuçlarda yer değiştirme (mm) ve eşdeğer gerilme (MPa) değerleri ele alınmaktadır. Tablo 2.'de gösterilen 5 problemin analiz sonuçları neticesinde karşılaştırmalar yapılarak analiz sonuçlarına göre en uygun yapı belirlenecektir.

Tablo 2. Yapısal Elemanların Analiz Sonuçları

		1000 N Kuvvet			
		-y yönünde Yer Değiştirme (mm)	+y yönünde Yer Değiştirme (mm)	-y yönünde Eşdeğer Gerilme (MPa)	+y yönünde Eşdeğer Gerilme (MPa)
	Malzeme				
1. Problem	%100 Al	0,017681	0,017681	22,86	22,86
2. Problem	%100 ABS	0,50945	0,50945	22,511	22,511
3. Problem	%100 PLA	0,35455	0,35455	22,539	22,539
4. Problem	Sandviç Kompozit Yapı (3 mm Al-4mm ABS- 3mm Al)	0,020233	0,020233	17,612	17,612
5. Problem	Sandviç Kompozit Yapı (3 mm Al-4mm PLA-3 mm Al)	0,019963	0,019963	17,309	17,309

1. Problem, %100 Al'dan oluşan modelin statik analiz sonuçlarını göstermektedir. 1000 N'lık basma ve çekme kuvvet tesirlerinde yer değiştirmenin 0,017681 mm ve eşdeğer gerilmenin 22,86 MPa olduğu görülmektedir. 5 problem arasında, en düşük yer değiştirmenin ve en yüksek eşdeğer gerilmenin %100 Al modelde oluştuğu söylenebilmektedir.

2. Problem, %100 ABS'den oluşan modelin statik analiz sonuçlarını göstermektedir. 1000 N'lık basma ve çekme kuvvet tesirlerinde yer değiştirmenin 0,50945 mm ve eşdeğer gerilmenin 22,511 MPa olduğu görülmektedir. En yüksek yer değiştirme %100 ABS modellemede oluşmaktadır.

3. Problem, %100 PLA'den oluşan modelin statik analiz sonuçlarını göstermektedir. 1000 N'lık basma ve çekme kuvvet tesirlerinde yer değiştirmenin 0,35455 mm ve eşdeğer gerilmenin 22,539 MPa olduğu görülmektedir. Eşdeğer gerilme sonuçlarına bakıldığında, ABS ile çok yakın sonuçlar çıkmasına rağmen, yer değiştirmede ABS'ye göre daha düşük sonuçlar elde edilmektedir.

4. Problem, 3mm Al-4mm ABS-3mm Al sandviç kompozit yapılı modelin statik analiz sonuçlarını göstermektedir. 1000 N'lık basma ve çekme kuvvet tesirlerinde yer değiştirmenin 0.020233 mm ve eşdeğer gerilmenin 17,612 MPa olduğu görülmektedir.

5. Problem, 3mm Al-4mm PLA-3mm Al sandviç kompozit yapılı modelin statik analiz sonuçlarını göstermektedir. 1000 N'lık basma ve çekme kuvvet tesirlerinde yer değiştirmenin 0,019963 mm ve eşdeğer gerilmenin 17,309 MPa olduğu görülmektedir. Tüm problemler arasında en düşük sonuçlar 5. Problemede gerçekteşmektedir.

Sonuçlar karşılaştırıldığında; 1. Problem, 2. Problem ve 3. Probleme kıyasla sandviç kompozit yapılarda daha düşük sonuçlar oluştuğu söylenebilmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, negatif poisson oranlı davranış gösteren Re-entrant hexagon yapılı modellemenin çekme ve basma kuvvet tesirlerindeki statik davranışları incelenmiştir. Ayrıca bu geometrik yapıya 2 adet sandviç kompozit yapı entegre edilerek farklı kompozit malzeme yapılarındaki mekanik davranış sonuçları karşılaştırılmıştır. Negatif poisson oranlı oluşum sayesinde açığa çıkan; yüksek enerji absorbe yeteneği, sürtünme dayanımı, hafiflik, kopma dayanımı vb. avantajlar ile sandviç kompozit yapıdaki benzer avantajlar göz önünde bulundurularak bu iki yapının birbirine entegre edilmesi ile olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 2'de yer alan değerler karşılaştırıldığında; sandviç kompozit yapıların %100 ABS, %100 PLA, %100Al modellerine kıyasla eşdeğer gerilmesinde ortalama %24-25 oranında azalmanın gerçekteştiği söylenebilmektedir. En düşük sonuçlar ise, 5. Problemede yer alan 3mm Al-4mm PLA-3mm Al sandviç kompozit yapıda oluşmuştur.

Yüksek mukavemet, hafiflik, maliyetin düşük olması ve üretim kolaylığı gibi büyük avantajlar ile elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda negatif poisson oranlı sandviç kompozit yapıların kullanılmasıyla, düşük sıcaklık etkisinde yüksek kuvvetlere karşı dayanım isteyen endüstriyel üretim alanlarına katma değer oluşturmak şüphesizdir.

Referanslar

- Berwind, M. F., Kamas, A., Eberl, C. (2018). A Hierarchical Programmable Mechanical Metamaterial Unit Cell Showing Metastable Shape Memory, *Advanced Engineering Materials*, 1800771, 1-6.
- Boğa, C., Seyedzavvar, M., Zehir, B. (2021). Experimental Investigation on the Effects of Internal Architecture on the Mechanical Properties of 3D Printed PLA Components, *European Journal of Science and Technology Special Issue 24*; 119-124.
- Ceyhun, V., Turan, M., (2003). Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı. Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, Cilt: 44, sayfa aralığı: 35 – 41.
- Dirim, A., (2021). ABS ve PLA Karşılaştırması-Farkları. (<https://www.tasarimdanimalata.com/abs-ve-pla-karsilastirmasi-farklari/>)
- Ermeydan, M.A. ve Aykanat, O., (2019). Pla/Boynuz Biyokompozitlerin Termal Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Engineering Sciences(NWSAENS)*, 1A0444, 2019; 14(4):226-231. doi: <http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2019.14.4.1A0444>
- Imak, A., Solmaz, M.Y., Topkaya, T., (2016). Tabakalı Hibrit Kompozit Malzemelerin Yorulma Davranışlarının Analizi, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi* 2016 3(3); 448-458.
- Ingrole, A., Hao, A., Liang. R. (2017). Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement, *Materials and Design*, 117, 72-83.
- Işiltan, A., (2017). Negatif Poisson Oranın Sahip Bir Mikro-Kafes Yapının Tasarımı-Analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, sayfa sayısı: 93.
- Jiang, y., Li, Y. (2018). 3D Printed Auxetic Mechanical Metamaterial with Chiral Cells and Re-entrant Cores, *Scientific Reports*, 8:2397, 1-11.
- Korkut, S., (2019). Poisson Oranı. (<https://www.serdarkorkut.com/2017/05/26/poisson-orani-nedir/>)
- Lakes, R. J. (1987). “Foam Structures with a Negative Poisson’s Ratio”, *Science*, 235, 1038-1040.
- Öztop, B., Gürbüz, M.,(2017). Investigation of Properties of Composites Produced by Reinforcement Graphene Matrix Obtained from Waste Aluminium. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 2017, 1(1): 4 – 8.
- Potoğlu, U., (2012). Sandviç Kompozit Plakaların Darbe Davranışları. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, sayfa sayısı: 83.
- Sarvestani H. Y., Akbarzadeh, A., Mirbolghasemi, A., Hermenean, K. (2018). “3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability”, *Materials & Design*, 160, 179-93.
- şen, N., şengül, Ö., Uygur İ.,(2020). Geri Dönüşümü Yapılmış PP ve ABS Prototip Malzemelerin Bazı Mekanik ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8 (2020) 246-257. doi: 10.29130/dubited.655553
- Uzun, M. (2017). Negatif Poisson Oranına Sahip (Auxetic) Malzemeler Ve Uygulama Alanları, TMMOB Tekstil Mühendisleri Odası – Tekstil ve Mühendis, 17, 13-18.
- Yu, X., Zhou, J., Liang, H., Jiang, Z., Wu, L. (2018). Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review, *Progress in Materials Science*, 94, 114–173.
- Yuan, S., Chua, C. K., Zhou, K. (2019). 3D-Printed Mechanical Metamaterials with High Energy Absorption, *Advanced Materials Technologies*, 4(3), 1800419.



Yaşanan İş Kazalarının Kaza Saatlerine ve Cinsiyete Göre İstatistiki Olarak Değerlendirilmesi ve Yorumlanması

Statistical Evaluation And Interpretation of Occupational Accidents According to The Hours of The Accident and Gender

Uğur Çavdar¹ , Murat Manyaslı¹ , Erim Akkaya² , Demiralı Sevener¹ , Ziya Tüfekçi¹ 

¹İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 35140, İzmir, TÜRKİYE

²Pamukkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 20160, Denizli, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 14/02/2021

Kabul / Accepted: 04/08/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Dünyada her yıl milyonlarca çalışan iş kazası sebebiyle yaralanmakta, meslek hastalığına yakalanmakta veya hayatını kaybetmektedir. İş kazaları nedeniyle ortaya çıkan maliyetlerin azaltılması, güvenli çalışma koşullarının yaratılması iş sağlığı ve güvenliği tedbirlerinin alınması ile mümkündür. Bu nedenle İş Sağlığı ve Güvenliğinin önemi Türkiye dahil pek çok ülkede her geçen gün daha fazla artmaktadır. Bu çalışmada Türkiye'deki iş kazası geçiren çalışanların cinsiyetine ve kazayı geçirdikleri saate göre dağılımları incelenmiştir. Araştırmada Sosyal Güvenlik Kurumu'nun 2009-2019 yılları arasında hazırladığı iş kazası geçirenlerin iş kazasının meydana geldiği saatlere ve cinsiyete göre dağılımına ilişkin istatistiklerin yer aldığı tablolar kullanılmış, bu tablolar grafik haline getirilerek sunulmuş ve veriler yorumlanmıştır. Belirlenen saatlerde meydana gelen iş kazaları nedenleri ve iş sağlığı ve güvenliği yönünden yapılacak iş ve işlemlere ilişkin öneriler tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“İş Kazası, Kaza Saati, Kaza Sıklığı, Sosyal Güvenlik Kurumu”

Abstract

Every year, millions of employees around the world are injured due to occupational accidents, suffer from occupational diseases, or lose their lives. Reducing the costs caused by occupational diseases and creating safe working conditions are possible by taking Occupational Health and Safety measures. Therefore, the importance of Occupational Health and Safety is increasing every passing day in many countries, including Turkey. In this study, the distribution of employees that had an occupational accident is examined according to their genders and the time period in which accidents took place. The tables prepared by the Social Security Institution between 2009-2019, which give place to statistics regarding the distribution of employees that had an occupational accident according to their genders and the time period in which accidents took place, are used; also, these tables are presented in graphics and the data are interpreted. The causes of the occupational accidents that take place in specific hours and the suggestions regarding the transactions in terms of Occupational Health and Safety.

Key Words

“Occupational Accident, Hour of The Accident, Accident Frequency, Social Security Institution”

1. Giriş

Ülkemizde inşaat, maden, metal ve kimya sektörleri başta olmak üzere birçok sektörde faaliyetini sürdürmekte olan işyerleri ve bu işyerlerinde istihdam edilen farklı meslek gruplarındaki erkek ve kadın çalışanlar bulunmaktadır. Tüm iş kollarında yaralanma ve uzuv kayıpları sonucu çalışanların vücut bütünlüğünün bozulmasına ve ileri boyutta can kayıplarının oluşmasına neden olan iş kazaları çalışanlar ile birlikte üretime ve dolayısı ile ülke ekonomisine büyük zararlar vermektedir. İşyerlerinde çalışanların cinsiyet ve yaş dağılımları, öğrenim durumu, çalışılan işin mahiyeti ve tehlike sınıfı, vardiyalı çalışma sistemi ve çalışma saatleri iş kazalarına ilişkin istatistiklerin yorumlanmasında önem arz etmektedir (Karadağ & Kepekli, 2018; Müngen, 1993).

Madencilik sektörü (Ergüzer & Lüy, 2017), elektrik sektörü (Ceylan, 2012), kimya laboratuvarları (Usanmaz & Köse, 2020), inşaat sektörü (Ceylan, 2014) ve tekstil sektörü (Aksüt vd., 2021) gibi birçok farklı alanda iş sağlığı güvenliği ile ilgili birçok farklı çalışma yapılmıştır. Bizim çalışmamızda bunlardan farklı olarak iş kazalarının son on yıldaki meydana gelme saatlerinin incelenmesi ve değerlendirilmesi hakkındadır.

İş sağlığı meslek ayırt etmeksizin ruhsal ve bedensel durumlarını en üst seviyeye taşıma, çalışanlara ruhsal durumlarına en uygun çalışma ortamını sağlama ve çalışanları çalışma ortamı ve çalışma şartları nedeniyle sağlıklarının bozulmasını önlemeyi, bedensel ve ruhsal sağlıklarını korumayı amaçlayan bilim dalıdır. Bununla beraber iş sağlığı kavramı çalışanların işe ve işin de çalışanlara uyumlarını sağlamayı amaçlar (Arıtan & Ataman, 2017; Ceylan, 2011).

İş güvenliği iş ortamında meydana gelebilecek tehlike ve kazalardan korunmak, elverişsiz koşulları ortadan kaldırmak sağlıklı ve güvenli çalışma hayatı ve ortamını sağlamayı amaçlayan çalışmalar bütünüdür. Güvenlik sağlanmadığı takdirde, olası bir kaza durumunda sadece çalışan değil işletme ve üretim de zarar görmektedir (Arıtan & Ataman, 2017; Bayraktaroğlu vd., 2018).

İş kazası ile ilgili yasal mevzuatta farklı tanımlar bulunmaktadır. İş kazası 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'nun 3. Maddesine göre "İş yerinde veya işin yürütümü nedeniyle meydana gelen ölüme sebebiyet veren veya vücut bütünlüğünü ruhen ya da bedenen engelli hale getiren olay." olarak tanımlanmıştır. Türkiye'de 5510 sayılı Sosyal Sigortalar ve Genel Sağlık Sigortası Kanun'a göre sigortalının iş yerinde bulunduğu sırada, iş veren tarafından yürütülmekte olan iş dolayısı ile, sigortalının iş veren tarafından başka bir yere gönderilmesi nedeniyle asıl işini yapmaksızın geçen zamanlarda, sigortalının iş veren tarafından sağlanan bir taşıt ile iş yerine toplu olarak getirilip götürülmesi sırasında, emzikli sigortalı kadının çocuğuna süt vermesi için ayrılan sürede gerçekleşen kazalar iş kazası olarak nitelendirilmektedir. Kaza sebepleri insan, makine, ortam-çevre ve yönetim olmak üzere 4 ana başlık altında incelenmektedir. Makineler çalışma hayatında üretimin vazgeçilmez unsuru olarak karşımıza çıkmaktadır. Makinelere kaynaklı kazalardan en sık karşımıza çıkan kaza türleri talaşlı imalat sektöründe kullanılan makinelerin hareketli döner aksamlara çalışanların uzuvlarını kaptırmaları, vinçler, presler vb. çalışırken dikkat yoğunluğunu gerektiren makinelerden sorumlu operatörlerin yetersiz ara dinlenme vb. nedenlerle elektrik, yük altında ezilme ve mekanik temasla kaza içeren tehlikeli alanlara müdahaleleri ile uğradıkları can kayıpları ile sonuçlanan iş kazalarıdır. Bu ana başlıklar kendi içlerinde insan kaynaklı kaza sebepleri: psikolojik nedenler, fiziksel nedenler, iş yeri nedenleri, ortam çevre kaynaklı kaza sebepleri: yetersiz çalışma bilgisi, uygun olmayan çalışma metodu, uygun olmayan çalışma yeri ve ortamı, yönetim kaynaklı kaza sebepleri: yetersiz yönetim organizasyonu, tamamlanmamış kurallar ve talimatlar, yetersiz güvenlik yönetimi planı olarak alt başlıklara ayrılmakta ve incelenmektedir (Erginel & Toptancı, 2017; Güner, 2006; Yardım vd., 2007; Camkurt, 2007).

4-A, 4-B ve 4-C kapsamında sigortalı sayılanlar 16/6/2006 tarih ve 26200 sayılı Resmî Gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren 5510 Sayılı Sosyal Sigortalar ve Genel Sağlık Sigortası Kanunu'nun 4. maddesine göre aşağıda belirtildiği gibi tanımlanmıştır:

4-A kapsamında sigortalılar: Hizmet akdi ile bir veya birden fazla işveren tarafından çalıştırılanları ifade etmektedir (ÇSGB, 2006; Bayraktar vd., 2018).

4-B kapsamında sigortalılar: Köy ve mahalle muhtarları ile hizmet akdine bağlı olmaksızın kendi adına ve hesabına bağımsız çalışanlardan;

- 1) Ticarî kazanç veya serbest meslek kazancı nedeniyle gerçek veya basit usulde gelir vergisi mükellefi olanları,
- 2) Gelir vergisinden muaf olup, esnaf ve sanatkâr siciline kayıtlı olanları,
- 3) Anonim şirketlerin yönetim kurulu üyesi olan ortakları, sermayesi paylara bölünmüş komandit şirketlerin komandite ortakları, diğer şirket ve donatma iştiraklerinin ise tüm ortakları,
- 4) Tarımsal faaliyette bulunanları ifade etmektedir (ÇSGB, 2006; Bayraktar vd., 2018).

4-C kapsamında sigortalılar:

1) Bu maddenin birinci fıkrasının (a) bendine tabi olmayanlardan, kadro ve pozisyonlarda sürekli olarak çalışıp ilgili kanunlarında (a) bendi kapsamına girenler gibi sigortalı olması öngörülmemiş olanlar,

2) Bu maddenin birinci fıkrasının (a) ve (b) bentlerine tabi olmayanlardan, sözleşmeli olarak çalışıp ilgili kanunlarında (a) bendi kapsamına girenler gibi sigortalı olması öngörülmemiş olanlar ile 657 sayılı Devlet Memurları Kanunu'nun 86. maddesi uyarınca açıktan vekil atananlar, sigortalı sayılanları ifade etmektedir (ÇSGB, 2006; Bayraktar vd., 2018).

Bu çalışmada Türkiye'deki (4A) kapsamındaki sigortalıların 2009-2019 yılında geçirmiş olduğu iş kazalarının cinsiyetine göre ve iş kazalarının yaşandığı çalışma saatlerine göre Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) istatistik tabloları incelenmiştir. Yapılan inceleme doğrultusunda bir istatistik tablosu ve grafiği oluşturulmuş, bunun sonucunda tablodaki yüzdelik verilerine göre analiz yapıp, yorumlarda bulunulmuştur.

2. Gereç ve Yöntem

2.1 Araştırmanın Amacı

Bu araştırma Türkiye'deki son 11 yılda meydana gelen iş kazalarının hangi saat aralıklarında gerçekleştiğini ve kaza geçiren çalışanların cinsiyetlerini inceleyerek sebepleri tespit etmek ve çözüm yolu üretmek amacıyla yapılmıştır.

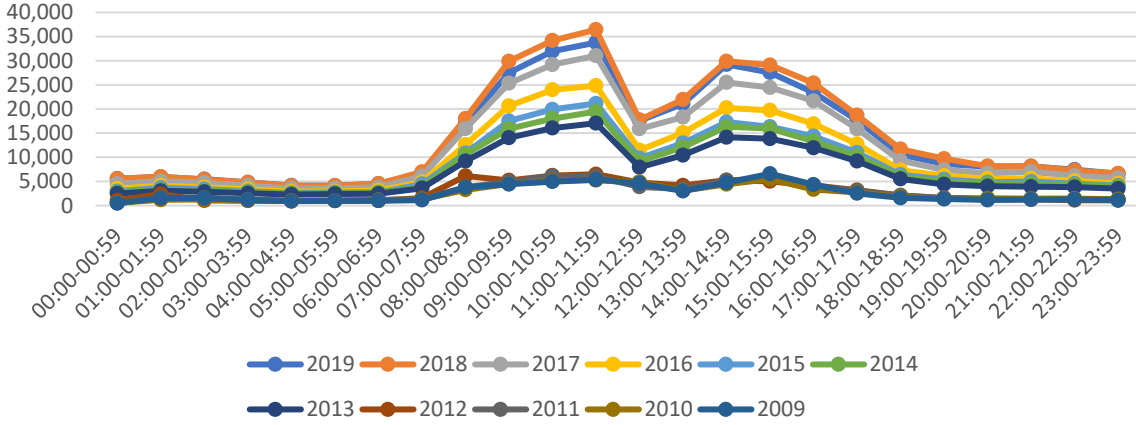
2.2 Araştırmanın Evreni, Veri Toplama ve İstatistiksel Açından Değerlendirme

Sosyal Güvenlik Kurumunun son 11 yıl için yayınlamış olduğu istatistiki veriler değerlendirilerek, iş kazalarında kazanın yaşandığı saatler ve kaza geçiren çalışanların cinsiyetlerine ilişkin aşağıda istatistiklerin yer aldığı tablolar alınmış ve çizgi grafiği olarak hazırlanıp sunulmuştur. Kaza geçiren erkek çalışanların iş kazası geçirdiği saatler Şekil 1.'de, kaza geçiren kadın çalışanların iş kazası geçirdiği saatler grafiği Şekil 2.'de, cinsiyet fark etmeksizin bütün çalışanların iş kazası geçirdiği saatler grafiği Şekil 3.'de belirtilmiştir (Bayraktar vd., 2018; SGK, 2007-2019).

3. Bulgular

Bu çalışmaya benzer bir çalışma daha önce yapılmamıştır fakat Bayraktar vd. (2018), 2002-2015 yılları arası SGK iş kazası verilerini istatistiksel olarak incelemiş ve madencilik sektörü ile diğer sektörlerin kaza oranlarını karşılaştırıp önerilerde bulunmuşlardır. Erginel vd. (2017) çalışmalarında, Türk inşaat sektöründe meydana gelen kazaları istatistiksel verilere dayanarak incelemiş ve iş kazalarının önlenmesi, azaltılması için uygulanabilecek tedbirleri değerlendirmişlerdir. Baradan vd. (2016), veri olarak SGK kayıtları yerine müfettiş raporlarını kullanarak 2009-2010 yıllarında Ege Bölgesinde inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarını analiz edip sonuçların iyileştirilmesi yönünde önerilerde bulunmuşlardır. Eser (2015), çalışmasında 2010-2014 SGK iş kazası verilerini kullanarak farklı sektörlerdeki kaza-zaman yoğunluğunu tespit etmiş ve iş kazaların zamanlama modelini oluşturmuştur. Bekar vd. (2017), çalışmalarında 2005-2014 yılları arası Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş kazası ve meslek hastalıkları verilerini incelemiş ve bu kazaların ülke ekonomisine ekonomik yükünü hesaplamıştır. Türen vd. (2014), Türkiye'de yaşanan, sonucu ölümle biten iş kazalarında yaş faktörünün sonucu nasıl etkilediği üzerine çalışmıştır. Oral vd. (2020), çalışmalarında SGK verilerini kullanarak 2016-2018 yılları arasında meydana gelen tur operatörleri ve seyahat acenteleri çalışanlarına ait kazaların kaza sıklık oranları belirlenmiş ve İş sağlığı ve güvenliği kapsamında önerilerde bulunmuşlardır. SGK istatistiklerinin yer aldığı tablolardan alınan veriler yüzdelik olarak hesaplanmış karşılaştırmalı çizgi grafiği haline getirilmiş, bunlar Şekil 1-4'te verilmiş ve kaza sebepleri yorumlanmıştır.

KAZA GEÇİREN ERKEK ÇALIŞANLARIN KAZAYI GEÇİRDİKLERİ SAAT DAĞILIMI(4A)



Şekil 1. Kaza Geçiren Erkek Çalışanların Kazayı Geçirdikleri Saat Dağılımı Grafiği (SGK, 2009-2019)

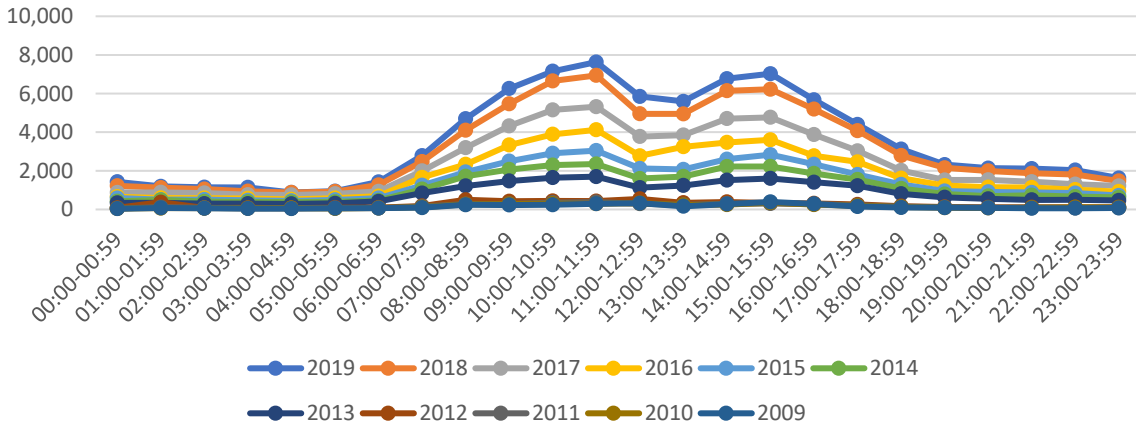
Erkek çalışanların 2018 çizgisine bakıldığı zaman genel olarak 2019 çizgi verilerinin üstünde kaldığı Şekil 1’de görülmektedir. Bunun sebebi 2018 yılına kıyasla çalışanlara verilen iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinde ve otomasyon sürecine geçişlerde artış olarak açıklanabilmektedir.

Şekil 1’e ait çizgi grafiğine baktığımızda 2012 yılından sonra hızlı bir artış olduğunu görülmektedir. 2012 yılında 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu’nun yürürlüğe girmesinden sonra işyerlerinde yaşanan iş kazalarını bildirme yükümlülüğünün zorunlu hale gelmesi ile birlikte kayda giren ve istatistiklerde yer verilen kaza sayılarında artış olmuştur. Bunun sebebi her geçen gün artan nüfus sayısı ve istihdama bağlanabilir.

Ayrıca bu çizgi grafiğinde saat 11:00-11:59 arasında iş kazası yaşanma oranı en yüksek seviyeye çıkarken 12:00-12:59 saatleri arasında gelince çok hızlı bir düşüş yaşanmaktadır. Bunun sebebi, bu saatler arasının genel olarak öğle yemeği molası olması ve bu süre içerisinde çalışılmamasından dolayı bu denli ani bir düşüş yaşanmış olabilir.

Erkek çalışanlar için oluşturduğumuz grafikte saat 12:00-12:59 arasından sonra 14:00-14:59 zaman dilimine doğru yaşanan iş kazası sayısında hızlı bir artış gözlenmektedir. Bu artışın yaşanması ile ilgili olarak vardiyalı sistemde istihdam edilen çalışanlar için mesai bitimine yakın bir zaman dilimi olması, çalışanların bu zaman aralığında bedensel ve zihinsel anlamda yaşadıkları yorgunluk düzeylerinin yapılan iş ve işten kaynaklı risklere karşı tepkisel hassasiyetlerinin azalması olarak açıklanabilmektedir.

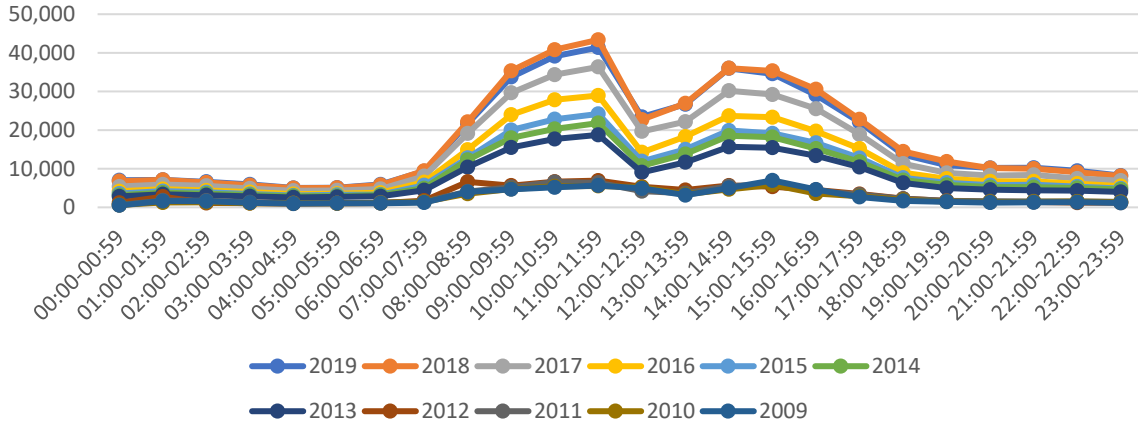
KAZA GEÇİREN KADIN ÇALIŞANLARIN KAZAYI GEÇİRDİKLERİ SAAT DAĞILIMI (4A)



Şekil 2. Kaza Geçiren Kadın Çalışanların Kazayı Geçirdikleri Saat Dağılımı Grafiği (SGK, 2009-2019)

Kadın çalışanlardaki iş kazası sayısının en az yoğunluk gösterdiği saat dilimleri 19:00-19:59 ile 06:00-06:59 çalışma saatleri arasında olduğunu Şekil 2'den görebilmekteyiz. Bu durum vardiya sistemi ile çalışan işyeri sayısının genelde tek çalışma periyodu ile çalışan işyeri sayısından az olması, vardiya çalışma düzeninde kadın çalışanların genellikle gündüz vardiyasını tercih etmeleri özellikle eşleri ile aynı fabrikada çalışan ve bakmakla yükümlü oldukları çocuklarının bulunması durumunda kadın çalışanların çalışma saatlerinin gündüz vardiyasına denk gelecek şekilde düzenlenerek istihdam edilmeleri ile açıklanabilmektedir.

KAZA GEÇİREN ÇALIŞANLARIN TOPLAMININ KAZA GEÇİRDİKLERİ SAAT DAĞILIMI (4A)



Şekil 3. Kaza Geçiren Çalışanların Toplamının Kaza Geçirdikleri Saat Dağılımı Grafiği (SGK, 2009-2019)

Şekil 3'te kaza geçiren çalışanların toplamının kaza geçirdikleri saat dağılımı grafiği son on yıla göre her sene için ayrı ayrı olarak verilmiştir. Saat 11:00 ile 11:59 arası iş kazaları gözlemlendiği üzere en yüksek seviyesinde görülmüştür. Bunu sebebi birçok nedene bağlı olmakla birlikte insanların öğle arası rahavetine kapılmaları söz konusu olabilmekte olup bu saatlerde yaşanan iş kazaları diğer saatlere oranla çok yüksektir. Bunun yanı sıra bu husus yemek saati öncesinde özellikle tehlikeli ve çok tehlikeli sınıfta ve efor sarf edici işlerde çalışan kişilerin yemek saatine yakın kan şekerinin düşmesi ve beraberinde dikkatin azalması ile de açıklanabilir.

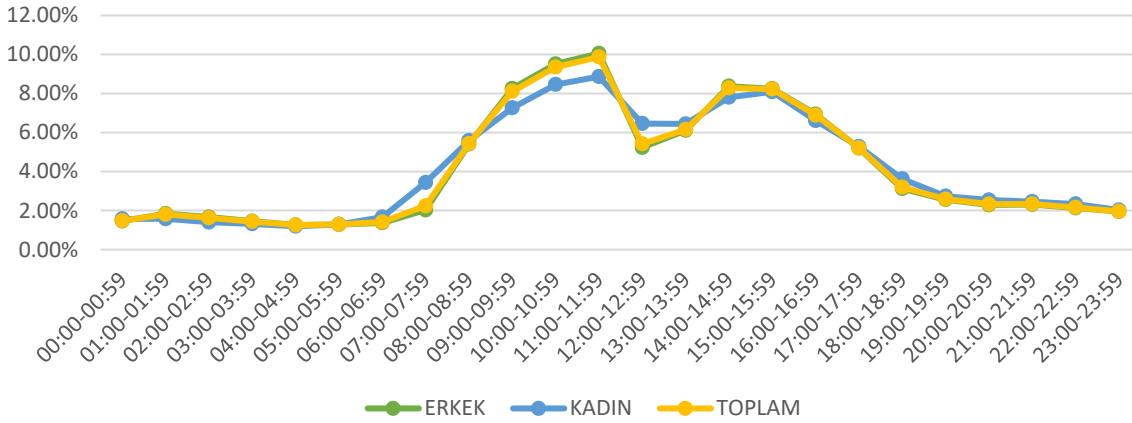
Genel olarak bakıldığında iş kazalarının en az yoğunlukta görüldüğü saatler 18:00 ile 07:00 saatleri arasındadır. Bu durum gece vardiyasının üretimin türüne, istihdam edilen çalışan sayısına ve ekonomik koşullara bağlı olarak her sektörde ve her işyerinde uygulanmayışı, genelde tek vardiya düzeninde çalışan işyerlerindeki çalışma saatlerinin 08:00 ile 18:00 zaman dilimi arasında gerçekleşmesi ve arada 1saat öğle molası uygulanması ile açıklanabilir.

17:00 ile 17:59 arası yaşanan iş kazaları sayısının azalmaya başladığı görülmüştür. Bu durum vardiyalı çalışma sistemi ile açıklanabilir. İşyerlerinde uygulanan sekiz saatlik vardiyalı çalışma sisteminde çalışanın vardiya saatlerinin başı olması ve dikkat seviyesinin yüksek oluşu ile birlikte iş kazası yaşanma olasılığı da düşmektedir. (İşe daha yeni başlangıç yapılan zaman dilimi olması nedeni ile örnek vermek gerekirse 04:00-00:00 vardiyasında istihdam edilen bir çalışan için ilk 1-2 saatlik zaman dilimi gibi)

Genel olarak baktığımızda erkek ve kadın çalışanların çalışma saatlerine bağlı olarak yaşadıkları iş kazalarını gösteren grafiklerini karşılaştırsak 11:00-11:59 zaman diliminden hemen sonra kadın çalışanlarda yaşanan iş kazası sayısının erkek çalışanlara kıyasla çok daha az miktarda düşüş yaşandığı anlaşılmaktadır. Bunun sebebi ise gerek yasal mevzuatın getirmiş olduğu sınırlamalar, gerekse yapılan işin niteliği ve tehlike sınıfına bağlı olarak iş kollarında istihdam edilen kadın çalışan sayısının erkek çalışan sayısı oranına göre daha düşük olması ile açıklanabilmektedir.

Erkek ve kadın çalışanlar için son 10 yılda çalışma saatlerine yaşanan iş kazası yüzde oranlarının yer aldığı karşılaştırmalı çizgi grafiğimize baktığımız zaman erkek çalışanlar ve toplam çalışanlara ait çizgi verilerinin aynı seyirde devam ettiği görülmektedir. Bunun sebebi erkek işçi yoğunluğunun kadın işçilere göre fazla olması ile açıklanabilmektedir.

SGK SON 10 YIL VERİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ÇİZGİ GRAFİĞİ (4A)



Şekil 4. SGK Son 10 Yıl Verilerinin Karşılaştırmalı Çizgi Grafığı (SGK, 2009-2019)

Şekil 4'te ise 10 senelik verilerin değerlerinin toplamı alınarak erkek, kadın ve her ikisinin ortalaması olarak incelenmiştir. Karşılaştırmalı grafikte grafiğin büyük çoğunluğunu erkek çalışanlar oluşturmaktadır. Bu sebeple erkek çalışanların en yüksek kaza geçirme saatleri 11:00-11:59 arasında erkeklerin toplam saatlerine oranla %10,05 bir kaza geçirme oranı görülmüştür. Kadın çizgi grafığı tarafına bakıldığı zaman saatler 11:00-11:59 arasında %8,86'lık oranla en yüksek değerini görülmekte. Toplam orana bakıldığı zamanda aynı saatlerde %9,87 oranında en yüksek kaza oranı görülmüştür.

Ayrıca Şekil 4'te erkek çizgi grafığında %1.26'lık oranla 04:00-04:59 arasında en düşük değerini görülmekte. Kadın tarafına bakıldığı zaman ise %1.19 oranla 04:00-04:59 arasında da en düşük değerini görülmekte. Toplam tarafına baktığımız zaman %1.25'lik oranla aynı saatlerde en düşük kaza oranı görülmüştür.

4. Sonuç ve Öneriler

İşyerlerinde yaşanan iş kazalarının yaşanmalarında temel unsurlar üretim koşullarına bağlı olarak kullanılan maddeler, çalışma ortamında mevcut iş ekipmanlarındaki güvenliği tehdit eden unsurlar, iş sağlığı ve güvenliği ile mesleki yeterlilik gerektiren ve çalışanlar üzerinde oluşması hedeflenen bilincin oturmasında vazgeçilmez bir unsur olan eğitim yetersizliği olması ile birlikte işyerinde güvenli çalışma şartlarını sağlayacak çalışma düzenlerinin de oluşturulamamasıdır. Çalışanın işyerinde sağlık ve güvenliği yönünden vücut bütünlüğünü, ruhsal ve bedensel yapısını korumak için yapılan iş organizasyonunda üretimdeki verimlilik ve kaliteyi artırma çabası kadar işi yapacak olan çalışanın çalışma saatlerine bağlı olarak yaşayabileceği bedensel ve zihinsel yorgunluğuna bağlı göstereceği tepki (tehlikeli davranış) ile birlikte iş kazası yaşanma olasılığı arasındaki ilişkinin kesinlikle göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Gündüz ve gece çalışma saatlerindeki farklı zaman dilimlerinde yapılan işten kaynaklı tehlikelere karşı çalışan tarafından gösterilen dikkat seviyesi ve tepkisel yaklaşım düzeyi aynı olamamaktadır. Yapılan işin niteliği, vardiya düzeninde çalışma, ara dinlenme süresi ve yapılan işe uygun zaman planlaması önem arz etmektedir. Bu durum beraberinde dinlenme sürelerinde ve sıklıklarında sağlık ve güvenliği sağlamak üzere değişiklikler yapmayı gerektirebilmektedir. Sürekli ayakta çalışmayı gerektiren ve algısal fonksiyonlarının mesai süresince dikkatli olmasını gerektiren iş kollarında, üretim hatları sabit ya da hareketli tesis veya makine operatörlüklerinde yoğun çalışılan tehlikeli ve çok tehlikeli sınıfta yer alan işyerlerindeki görevli çalışanlarda ara dinlenme sürelerinin arttırılması, çalışanlardan bu yönde görüş ve bilgi alış veriş yapılarak dinlenme süreleri içerisinde işyerinde sosyal aktivitelere yer verilmesi ile motivasyonun arttırılması ve çalışanlara psikolojik desteğin sağlanması, özellikle çalışma düzenlerinin ayarlanmasında iş yükü ve temposu, fazla çalışma, çalışanların kendilerini atıl hissetmeleri vb. birçok psikososyal risklerin çalışanların üzerindeki etkileri göz önüne alınırca yalnızca bedensel değil zihinsel yorgunlukların da önüne geçilebilmesine olanak sağlayacaktır. Pres operatörleri yeterli dikkat ve özeni göstererek sürekli çalışır durumdaki makinede parça işlenirken koruyucu donanımları ve kumanda butonlarını daha dikkatli kullanması, vinç operatörleri ise aynı şekilde yorgunluk, yetersiz dinlenme vb. olumsuz koşullar olmadan yükün güvenli kaldırılması, yük kaldırılırken tehlikeli alanda kimsenin olmaması gibi önemli hususları yerine getirerek daha güvenli çalışma koşulları sağlanabilmektedir.

İşyerlerinde çalışan sağlığı göz önüne alınarak çalışanlar için temin edilen yemeklerin seçiminde karbonhidrat yerine protein ağırlıklı yemeklerin seçilmesi ile birlikte yemek sonrasında oluşacak ağırlık hissine karşı da tedbir alınmış olacaktır.

İşyerlerinde üretim yoğunluğuna bağlı olarak çalışma saatlerinin belirlenmesinde fazla çalışma yoluna gidilmesi beraberinde çalışan için yorucu bir iş temposunu getirmektedir. Çalışanların dinlenme sürelerinin azlığı beraberinde işin yıpratıcı etkisine daha çok maruz kalmalarına ve iş kazalarının yaşanmasına neden olan önemli unsurlardan biridir. İş kazasına neden olan tehlikeli davranışların azaltılabilmesi için çalışanların dikkat yoğunluğunu üst düzeyde tutmak çok önemlidir. Ara dinlenmelerin sayısının artırılması ile özellikle talaşlı imalatta çalışan işçilerin kullanılan makinelerin hareketli döner aksamalarına teması, vinç ve pres operatörlerinin dikkat yoğunluğundaki azalmasından kaynaklı yük altında ezilme, uzuv kayıpları ve ölümlü sonuçlanan iş kazalarının önüne geçilebilecektir.

Çalışma saatleri düzenlemesi yapılırken çalışma ortamından kaynaklanan fiziksel risk etmenlerine de dikkat çekmek yerinde olacaktır. Yapılan işin niteliği ya da işin yapılması için kullanılan makine ve ekipmanlar nedeni ile çalışanlar gürültü, titreşim vb. fiziksel risk etmenleri ile karşı karşıya kalabilmektedir. Örnek vermek gerekirse gürültü eşik sınır düzeyin üzerinde bir makinede yahut ortamda çalışanlar için öncelikli olarak teknik önlemlerle gürültü maruziyetinin azaltılması bu mümkün değilse kişisel koruyucu donanımların temini ve kullanılması ile mümkün olmakla birlikte böyle bir çalışma ortamında istihdam edilen çalışanların günlük çalışma saatleri içerisinde var olan gürültüden kaynaklı oluşabilecek fiziksel ve zihinsel yorgunlukları dikkate alınarak çalışma saatlerinin sağlık ve güvenliği odak noktasında tutarak planlanması gerekmektedir.

Çalışma saatleri değerlendirildiğinde açıkça görülmekte olan 11:00-11:59 arasında iş kazası yaşanma oranı en yüksek seviyelerde olmasının sebebinin yemek molası vermek için rehavete kapılanması olduğu düşünülmektedir. 12:00-12:59 saatleri arasında gelince çok hızlı bir düşüş yaşanmasının sebebi ise, bu saatler arasında genel olarak öğle yemeği molası olması ve bu süre içerisinde çalışılmamasından dolayı bu denli ani bir düşüş yaşanmış olabileceği görüşündeyiz. 13:00-13:59 saatleri arasında meydana gelen artışların da yemek sonrasında çalışanları şeker seviyelerinin artmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. 14:00-14:59 zaman dilimine doğru yaşanan iş kazası sayısında hızlı artışın ise vardiyalı sistemde istihdam edilen çalışanlar için mesai bitimine olmasından ötürü bedensel ve zihinsel yorgunluk düzeylerinin artması ve dikkatlerinin dağılmasından kaynaklanabileceği ile açıklanabilmektedir. Bu kapsamda, çalışanların yemek öncesi ve sonrası ve ayrıca vardiya değişimlerinden hemen önce ve sonra gerçekleşen iş kazaları çalışanlara aktarılmalı ve bu saatlerde daha dikkatli olmaları tavsiye edilmelidir.

Referanslar

- Aksüt, G., Eren, T., Tüfekçi, M., (2021). Tekstil Sektör Çalışanlarının Maruz Kaldığı Ergonomik Risklerin Analitik Ağ Süreci ile Değerlendirilmesi, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 13(1), 231-241. doi: 10.29137/umagd.798215
- Aritan, A., & Ataman, M., (2017). Kaza Oranları Hesaplamalarıyla İş Kazası Analizi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 17(1), 239-246. doi: 10.5578/fmbd.51762.
- Baradan, S., Akboğa Ö., Çetinkaya, U., Usmen, M., (2016). Ege Bölgesinde İnşaat İş Kazalarının Sıklık ve Çapraz Tablolama Analizleri, İMO Teknik Dergi, 27(1), 7345-7370.
- Bayraktar, B., Uyguçgil, H., Konuk, A., (2018). Türkiye’de Madencilik Sektöründe İş Kazalarının İstatistiksel Analizi, Bilimsel Madencilik Dergisi, 57(5), 85-90. doi: 10.30797/madencilik.493212
- Bayraktaroğlu, S., Aras, M., Atay, E., (2018). Çalışanlarda İş Güvenliği ve İş kazası Algısı: Mavi Yakalılar Üzerine Bir Araştırma, Uluslararası Yönetim ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 8(9), 1-15.
- Bekar, İ., Oruç D., Bekar, E., (2017). İş Kazası Meslek Hastalıklarının Maliyeti (2005-2014), Uluslararası Ekonomik Araştırma Dergisi, 3(3), 479-489.
- Camkurt, M., (2007). İşyeri Çalışma Sistemi ve İşyeri Fiziksel Faktörlerinin İş Kazaları Üzerindeki Etkisi, TÜHİS İş Hukuku ve İktisat Dergisi, 20(6), 80-106.
- Ceylan, H., (2011). Türkiye’de İş Kazalarının Genel Görünümü ve Gelişmiş Ülkelerle Kıyaslanması, Uluslararası Mühendislik, Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 3(2), 18-24.
- Ceylan, H., (2012). Türkiye’deki Elektrik Üretim, İletim ve Dağıtım Tesislerinde Meydana Gelen İş Kazalarının Analizi, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 4(2), 30-42.
- Ceylan, H., (2014). Türkiye’de İnşaat Sektöründe Meydana Gelen İş Kazalarının Analizi, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 6(1), 1-6. doi: 10.29137/umagd.346068
- Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı (2006). Sosyal Sigortalar ve Genel Sağlık Sigortası Kanunu, Resmî Gazete, 5510, Ankara.

- Erginel, N., & Toptancı, Ş., (2017). İş Kazası Verilerinin Olasılık Dağılımları ile Modellenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 5(0), 201-212, doi:10.21923/jesd.10116.
- Ergüzer, A., & Lüy, H., (2017). Maden Ocaklarını Gerçek Zamanlı İzleme ve Görüntüleme Yazılım Uygulaması, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 9(2), 50-58.
- Eser, A., (2015). Güncel İş Kazası Verilerinin İstatistiksel Analizi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(2), 227-241. doi: 10.21605/cukurovaummfd.242750
- Gürer, E., (2006). Temel İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Eğitim Araştırma Merkezi, [PowerPoint slides], Ankara.
- Karadağ, T., & Kepekli, T., (2018). İnşaat Sektöründe Yaşanan İş Kazaları ve Kaza Nedenleri, Karabük Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 8(2), 314-322.
- Müngen, U., (1993). Türkiye’de İnşaat İş Kazalarının Analizi ve İş Güvenliği Sorunu. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Oral, T., & Ünal, A., (2020). 2016-2018 Yılları Arasında Seyahat Sektörüne Ait İş Kazası Verilerinin Değerlendirilmesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Akademi Dergisi, 3(2), 61-71. doi: 10.38213/ohsacademy.72487
- Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK), İstatistik Yıllığı Sigortalı ve İş Yeri İstatistikleri 2009-2019.
- Türen, U., & Gökmen, Y., (2014). Türkiye’de Meydana Gelen İş Kazaları Sonucu Ölümler ile Çalışanların Yaş Faktörü Arasındaki İlişki, Sosyal Güvenlik Dergisi, 4(1), 101-109.
- Usanmaz, D., & Köse, E., (2020). Kimyasal Araştırma Laboratuvarı Risk Değerlendirmesi İçin İki Farklı Metodun İstatistiksel Analizi, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 12(2), 337-348. doi: 10.29137/umagd.606402
- Yardım, N., Çipli, Z., Vardar, C., Mollahaliloğlu, S., (2007). Türkiye İş Kazaları ve Meslek Hastalıkları: 2000-2005 Yılları Ölüm Hızları, Dicle Tıp Dergisi, 34(4), 264-271.