Kırıkkale University International Journal of Engineering Research and Development

International Peer Reviewed Journal
e-ISSN: 1308-5514



Volume: 15
Issue: 2
JULY 2023

Kırıkkale Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi

Uluslararası Hakemli Dergi
Cilt: 15 Sayı:2 Temmuz 2023

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ / KIRIKKALE UNIVERSITY

MÜHENDİSLİK VE MİMARLIK FAKÜLTESİ
FACULTY OF ENGINEERING & ARCHITECTURE

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

Editör Yardımcıları / Associate Editors

Murat LÜY
Özer SEVİM
Hüseyin AYDİLEK

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

ISSN- Online: 1308-5514

Temmuz 2023 / July 2023

Alan Editörleri / Area Editors

Atilla ERGÜZEN- Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering
Enes AYAN- Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering
Fahrettin HORASAN- Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering

Beste ÇAĞDAŞ TUNALI- Biyomühendislik / Bioengineering
Murat İNAL- Biyomühendislik / Bioengineering

Gülesin Sena DAŞ- Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering
Hacı Mehmet ALAĞAŞ- Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering

Mustafa Yasin ERTEN- Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering
Özge Pınar AKKAŞ- Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering
Tolga EREN- Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering

Ersin KORKMAZ- İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering
Saruhan KARTAL- İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

Emrah KANTAROĞLU- Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering
Hakan ARSLAN- Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering
Osman BİCAN- Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering
Tolga DEMİRCAN- Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering

Aziz Barış BAŞYİĞİT – Metalurji ve Malzeme Mühendisliği / Metallurgical and Materials Engineering
Tuna AYDIN – Metalurji ve Malzeme Mühendisliği / Metallurgical and Materials Engineering

Yayın ve Mizanpaj Editörleri / Publication and Layout Editors

Buğra HATİPOĞLU
Kadriye Nur ERMAN
Mustafa YURDAKUL
Selen ÖZTÜRK AKBIYIK
Zeynep ÇABUK

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 başvurulan çalışmayı en az iki hakem tarafından kör hakem değerlendirmesi usullerine uygun olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır. Yazar ve hakemlerin kimlik bilgileri ve çalışmanın gizli kalacağı UMAGD'nin garantisi altındadır.

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 müsade 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 orjinal, 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 deklerasyon, kılavuz vb. uygun gerçekleştirilidiği 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 olmamalıdırlar. 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 sağlamalıdırlar. 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 kopyasınında 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 tahirbatı 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 kopyasınında 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

1	**Deprem Etkisindeki Betonarme Binalarda Dolgu Duvarların Davranışa Etkilerinin İncelenmesi** ***Investigation of the Effects of Infill Walls on Behavior in Reinforced Concrete Buildings under the Influence of Earthquake*** *Zehra Şule Garip, Şeyda Dibekoğlu* **DOI: 10.29137/umagd.1178219**	**344-360**
2	**Post-İnsan, Ergonomi ve Tasarım: Yok-Yerde Tasarımın İmkânı Üzerine Bir Değerlendirme** ***Post-Human, Ergonomics And Design: An Evaluation on The Opportunity Of Design in Non-Place*** *Damla Altuncu* **DOI: 10.29137/umagd.1201413**	**361-370**
3	**Kompozit Roket Yakıtının Yanma Hızı Üzerine Ortam Basıncının ve Başlangıç Sıcaklığının Etkileri** ***Effects of Ambient Pressure and Initial Temperature on the Burning Rate of Composite Rocket Propellant*** *Salih Uğur Bayça, Murat Demir* **DOI: 10.29137/umagd.1213570**	**371-377**
4	**Dönüşüm Kaynaklı Plastisite (TRIP) ve Üçüncü Nesil İleri Yüksek Mukavemetli Çelikler Üzerine Bir İnceleme** ***A Review on Transformation Induced Plasticity (TRIP) and Third Generation Advanced High Strength Steels*** *Onur Okur, Mehmet Erdoğan* **DOI: 10.29137/umagd.1246245**	**378-403**
5	**Atmosferik Plazma Sprey (APS) Yöntemi ile Üretilmiş MCrAlY ve ZrO2+Y2O3 içerikli Termal Bariyer Kaplama (TBC) Sisteminin 750°C Sıcaklıktaki Oksidasyon ve Sıcak Korozyon Davranışlarının İncelenmesi** ***Investigation of the Oxidation and Hot Corrosion Behavior of a MCrAlY and ZrO2+Y2O3 containing Thermal Barrier Coating (TBC) System Produced by the Atmospheric Plasma Spray (APS) Method at 750°C*** *Derviş Özkan, Garip Erdogan, Gülfem Binal, Yasin Ozgurluk, Abdullah Cahit Karaoglanlı* **DOI: 10.29137/umagd.1232816**	**404-415**
6	**TBDY 2018 ile Tasarlanan Kompozit Binaların Ana ve Artçı Depremlerde Davranışı** ***Behaviour of Composite Buildings Designed with TBDY 2018 in Main and Aftershocks*** *Serkan Etli, Melek Akgül* **DOI: 10.29137/umagd.1241090**	**416-428**
7	**İnşaat Mühendisliği Deneysel ve Analitik Tasarımlarında Taguchi Yönteminin Kullanılabilirliğinin Araştırılması** ***Investigation of Usability of Taguchi Method in Civil Engineering Experimental and Analytical Designs*** *Kemal Uray, Mustafa Koçer, Esra Uray, Hicran Açıkel* **DOI: 10.29137/umagd.1201368**	**429-445**
8	**Plant Species Selection for Vertical Garden Systems with Multi-Criteria Decision Making Techniques** *Necmettin Gür, Özgür Kahraman* **DOI: 10.29137/umagd.1146322**	**446-462**

9	**A Parallel Architecture for Improving the Performance of the Kriging Algorithm** *Özgür Tamer, Ahmet Esat Genç* **DOI: 10.29137/umagd.1165147**	**463-471**
10	**Kristalize Geçirimsizlik Katkılarının Betonun Taşıma Özellikleri Üzerindeki Etkisi** ***Effect of Crystalline Waterproofing Admixture on the Transport Properties of Concrete*** *Oguzhan Şahin* **DOI: 10.29137/umagd.1234584**	**472-483**
11	**Mevcut Yığma Bir Yapının Sahaya Özgü Deprem Yer Hareketlerine Dayalı Dinamik Analizi** ***Dynamic Analysis of an Existing Masonry Structure Based on Site Specific Earthquake Ground Motions*** *Özden Saygılı* **DOI: 10.29137/umagd.1159523**	**484-496**
12	**Sağlık Çalışanlarının İş Sağlığı ve Güvenliği Algılarının Araştırılması: Çankırı İli Örneği** ***Investigation of Occupational Health and Safety Perceptions of Health Workers: The Case of Çankırı Province*** *Ercüment Neşet Dizdar, Hakan Önder* **DOI: 10.29137/umagd.1221976**	**497-516**
13	**Al-9Si-0.1Sr-0.6Mg Alaşımının Tornalanmasında İşlenebilirlik Karakteristiklerinin Araştırılması** ***Investigation of Machinability Characteristics of Al-9Si-0.1Sr-0.6Mg Alloy in Turning*** *Ali Paşa Hekimoğlu, Şenol Bayraktar* **DOI: 10.29137/umagd.1198942**	**517-525**
14	**Graphene Oxide-Reinforced Cementitious Concrete Composites That Incorporates Silica Fume And Fly Ash** *İsmail Raci Bayer* **DOI: 10.29137/umagd.1258578**	**526-534**
15	**Zaman Gecikmeli Sıvı Seviye Sistemi için Kaskad Oransal-İntegral Denetleyicilerin Deneysel Uygulaması** ***Experimental Application of Cascade Proportional-Integral Controllers for Time Delayed Liquid Level System*** *Emre Tuşik, Ahmet Dumlu, Sadrettin Gölcügezli* **DOI: 10.29137/umagd.1180860**	**535-546**
16	**Radyal Akılı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlarda Vuruntu Momentinin Azaltılması** ***Reduction of Cogging Torque in Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Motors*** *Kadir Yılmaz, Taner Dindar* **DOI: 10.29137/umagd.1235442**	**547-557**
17	**Adaptive Threshold Selection of Anisotropic Diffusion Filters Using Dissimilarity Transform** *Mahmut Kılıçaslan* **DOI: 10.29137/umagd.1268609**	**558-573**
18	**An Enterprise Data Privacy Governance Model: Security-Centric Multi-Model Data Anonymization** *Yağmur Şahin, İbrahim Doğru* **DOI: 10.29137/umagd.1272085**	**574-583**

19	**Investigation of Temperature and Stress Distributions in a Dental Implant Prosthesis** *İkram Taşdemir, Cemalettin Aygün* **DOI: 10.29137/umagd.1276612**	**584-597**
20	**Al6061 Matrisli SiC Al2O3 ve Kömür Cürufu Tozu Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Sertlik ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi** ***Investigation of Hardness and Wear Behavior of Al6061 Matrix SiC Al2O3 and Coal Slag Powder Reinforced Hybrid Composites*** *Rahmi Kocaman, Serkan Ateş* **DOI: 10.29137/umagd.1287314**	**598-609**
21	**Correlation of fluid pressure and microdroplet size in a 3D-printed microfluidic chip** *Mustafa Tahsin Güler* **DOI: 10.29137/umagd.1286392**	**610-614**
22	**Eğrisel Alt Başlıklı Çelik Kirişlerin Ön Germeli Davranışının İncelenmesi** ***Theoretical and Experimental Investigation of Compression Capabilities of AA7075 Chips in Different Mold Geometries*** *Erkan Polat, Barlas Özden Çağlayan* **DOI: 10.29137/umagd.1217636**	**615-625**
23	**Kümeleme Yaklaşımı ile Maske Üretim Faktörlerinin Analiz Edilmesi Üzerine Bir Uygulama** ***An Application on Analysis of Mask Production Factors with Clustering Approach*** *Semra Tebrizcik, Süleyman Ersöz, Adnan Aktepe* **DOI: 10.29137/umagd.1178275**	**626-635**
24	**Kitlesel Çevrimiçi Ders Platformlarında Kurslara Yapılan Yorumların Metin Madenciliği Kullanılarak Duygu Analizi** ***Sentiment Analysis of Comments on Courses on Massive Online Course Platforms using Text Mining*** *Ramazan Daşgın, Kemal Adem* **DOI: 10.29137/umagd.1266187**	**636-646**
25	**Seramik Atık İlaveli Hafifletilmiş Köpük Betonlar** ***Investigation of Using Ceramic Wastes in Foam Concrete*** *Nazım Kunduracı* **DOI: 10.29137/umagd.1120064**	**647-653**
26	**Farklı Akseleratör Grupları için EPDM Karışımlarının Reolojik, Mekanik ve Isıl Yaşlandırma Değerlerinin İncelenmesi** ***Investigating Rheological, Mechanical and Heat Aging Effects of Different Accelerator Systems at EPDM Compounds*** *Ezgi Erbek Cömez, Selda Öztürk* **DOI: 10.29137/umagd.1157329**	**654-664**
27	**İçme Suyu Arıtma Çamuru Atığının Seramik Duvar Karosu Üretiminde Kullanım Potansiyeli** ***Use Potential of Drinking Water Treatment Sludge Waste in Ceramic Wall Tile Production*** *Suna Çetin* **DOI: 10.29137/umagd.1289051**	**665-670**
28	**Zemin Kat Yüksekliği ve Kat Adedi Farklı Olan Betonarme Binalarda Sismik İzolatör Kullanımının Bina Davranışına Etkisinin İncelenmesi** ***Investigation of the Effect of Seismic Isolator Use on Building Behaviour in Reinforced Concrete Buildings with Different Ground Storey Height and Number of Storey*** *Ali Mert Özkan, Şenol Gürsoy, Zehra Şule Garip* **DOI: 10.29137/umagd.1253099**	**671-688**

29	**Ultra Hafif Betonda Güncel Gelişmeler** ***Current Developments in Ultra-Light Weight Concrete*** *İlker Bekir Topçu, İsmail Hocaoğlu, İlkay Kara* **DOI: 10.29137/umagd.1196912**	**689-703**
30	**Forecasting Solar Radiation Based on Meteorological Data Using Machine Learning Techniques: A Case Study of Isparta** *Buğra Güzel, Onur Sevli, Ersan Okatan* **DOI: 10.29137/umagd.1268055**	**704-713**
31	**Ferrorezonans Modellemesi ile Kaotik Durum Davranışının Analizi ve Gerilim İyileştirmesi** ***Chaotic State Analysis and Voltage Correction with Ferroresonance Modeling*** *Mehmet Taciddin Akçay, Aysel Ersoy* **DOI: 10.29137/umagd.1255685**	**714-721**
32	**Eşme/Uşak Alkali Kaynağının Elektroporselen Bünyede Kullanılmasının Araştırılması** ***Investigation of the Use of Eşme/Uşak Alkali Source in Electroporcelain Body*** *Aliosman Tiryaki, Ceyda Ayça Avcı, Ceren Karakaya, Aysun Yıldız, Baran Tarhan* **DOI: 10.29137/umagd.1294990**	**722-730**
33	**Kombucha Ekstraktının Agarıcus bisporus ve Pleurotus ostreatus Misel Gelişimlerine Etkileri** ***Effects of Kombucha Extract on Mycelial Growth of Agaricus bisporus and Pleurotus ostreatus*** *Fatih Kutluer* **DOI: 10.29137/umagd.1279737**	**731-735**
34	**Gabion Duvarların Çeşitli Patlama Enerjilerine Göre Koruma Duvarı Olarak Kullanılması** ***Use of Gabion Walls as Protection Walls According to Various Explosion Energies*** *İrem Ersalman, Baran Toprak* **DOI: 10.29137/umagd.1297344**	**736-748**
35	**Two DO-CCII Based Lossless Floating Capacitance Multipliers** *Tolga Yucehan* **DOI: 10.29137/umagd.1305068**	**749-762**
36	**An Experimental Study to Investigate Shear Performance of Anchor Bolt to Strengthen an RC Frame Against Lateral Load** *Fulya Kale, Orhan Doğan* **DOI: 10.29137/umagd.1281639**	**763-775**
37	**Ultrasonic Therapy Device Using Fuzzy-Logic for Clinical Use** *Fikret Yalçınkaya, Ata Sevinç, Hüseyin Aydilek, Ali Erbaş* **DOI: 10.29137/umagd.1310831**	**776-785**
38	**Farklı Açılarda Alümina Seramiğe Çarpan Mermi Hasarının İncelenmesi** ***Investigation of Bullet Damage to Alumina Ceramic at Different Angles*** *Alemdar Ongun, Ömer Resuloğlu* **DOI: 10.29137/umagd.1286016**	**786-793**
39	**RF Enerji Hasatlama Uygulamaları için Üç Bantlı Anten ve Doğrultucu Tasarımı** ***Tri-Band Antenna and Rectifier Design for RF Energy Harvesting Applications*** *Muhammet Emin İnce, Çetin Kurnaz, Ertuğrul Çam* **DOI: 10.29137/umagd.1314713**	**794-803**

Fractional Order PID Controller Design Using Reference Model on Inverted Pendulum System
40 *Mehmet Serhat Can, Emrah Sürücü* **804-819**
DOI: 10.29137/umagd.1298311

5G Yukarı Link Haberleşmesinde Makine Öğrenmesi ile Dalga Şekli Karar Yöntemi
41 ***Waveform Decision Method with Machine Learning for 5G Uplink Communications*** **820-827**
Ayça Hançer, Ahmet Yazar
DOI: 10.29137/umagd.1298404

Keçiören/Ankara Özelinde Konut Rayiç Değerlerinin Tahmininde Çoklu Regresyon Analizi ve Yapay Sinir Ağları Yöntemlerinin Karşılaştırılması
42 ***Comparison of Multiple Regression Analysis and Artificial Neural Networks Methods in Estimation of Housing Fair Values in Kecioren/Ankara*** **828-839**
Serkan Narin, Orhan Doğan, Nassirou Bande, Yunus Genç
DOI: 10.29137/umagd.1297672

Biyouyumlu Numunelerin Üretimi İçin 4D Eklemeli İmalat Cihazı Tasarımı ve
43 Üretimi **840-847**
Design and Manufacturing of 4D Additive Manufacturing Device For The Production of Biocompatible Materials
Yunus Kartal, Deniz Doğan, M. Taylan Daş, Ayşegül Ülkü Metin
DOI: 10.29137/umagd.1288835

Dokuma Tezgahında Üretilen Denim Kumaşlarının Online Analizleri İçin Önerilen Yeni Bir Üretim Kayıt Modülü
44 ***A New Production Recording Module Recommended for Online Analysıs of Denim Fabrics Produced with Weaving Looms*** **848-859**
Muhammed Fatih Talu, Mahdi Hatami Varjovi
DOI: 10.29137/umagd.982240

Yumuşak Doku Onarımı için Poli(l-laktid-ko-kaprolakton) Biyobozunur Cerrahi
45 Yamaların 3B Baskısı ve Jelatin Kaplanması **860-871**
3D Printing and Gelatin Coating of Poly(l-lactide-co-caprolactone) Biodegradable Surgical Meshes for Soft Tissue Repair
Bengi Yılmaz
DOI: 10.29137/umagd.1285188

Seramik Sağlık Gereci Fabrikası Filtre-pres Kek Atığının Porselen Karo Bünyesinde
46 Kullanılması **872-880**
The Usage of Ceramic Sanitarware Filter-press Cake Wastes in Porcelain Tile Body
Yusuf Karaca, Zahide Bayer Öztürk, Elif Ubay
DOI: 10.29137/umagd.1300861

Effects Of The Boriding Time at 800°C on Ti6Al4V Alloy
47 *Fazıl Hüsem* **881-890**
DOI: 10.29137/umagd.1306808

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

UMAGD, (2023) 15(2), 344-360.

10.29137/umagd. 1178219

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Deprem Etkisindeki Betonarme Binalarda Dolgu Duvarların Davranışa Etkilerinin İncelenmesi

Investigation Of The Effects Of Infill Walls On Behavior In Reinforced Concrete Buildings Under The Influence Of Earthquake

Zehra Şule Garip*[1], Şeyda Dibekoğlu[1]

[1]*Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karabük, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 21/09/2022* ***Kabul / Accepted**: 19/10/2022* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 15/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 15/06/2023*

Öz

Betonarme binalarda dolgu duvarlar, yatay dayanıma katkıları göz ardı edilerek çizgisel yük olarak hesaplara dahil edilmektedir. Bu nedenle tasarım aşamasında öngörülen yapı davranışı gerçeği yansıtmamakta ve deprem tehlikesinin yüksek olduğu Ülkemizde dolgu duvarlar yıkıcı etkilere neden olabilmektedir. Bu çalışmada betonarme binalarda dolgu duvar etkilerinin incelenmesi için farklı özelliklere sahip 6 adet bina modeli tasarlanmıştır. Dolgu duvar etkileri ile meydana gelebilecek olası yumuşak kat düzensizliğini ortaya koyabilmek için iki faklı zemin kat yüksekliği dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında boş çerçeve, çizgisel yüklü çerçeve ve çizgisel yük + eşdeğer basınç çubuklu çerçeve olmak üzere üç farklı betonarme bina modeli tasarlanmıştır. Betonarme bina modellerinin doğrusal ve zaman tanım alanında doğrusal olamayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Çizgisel yük + eşdeğer basınç çubuklu sitemlerin boş ve çizgisel yüklü sistemlerle kıyaslanması durumunda periyot değerlerinde, tepe noktası yerdeğiştirmelerinde ve etkin göreli kat ötelenme değerlerinde azalma, spektral ivme değerlerinde ve taban kesme kuvvetlerinde artma ve yumuşak kat düzensizliği oluşumu belirlenmiştir. Dolayısıyla, betonarme bina modellerinde dolgu duvarların eşdeğer basınç çubuklu olarak modellenmesinin yapı davranışı açısından daha doğru sonuçlar vereceği kanaatine varılmıştır.

Anahtar Kelimeler

"Dolgu duvar, Eşdeğer basınç çubuğu, Betonarme"

Abstract

Infill walls are included in the calculations as linear load in reinforced concrete buildings, ignoring their contribution to horizontal strength. For this reason, the structural behaviour foreseen at the design stage does not reflect reality. The filling walls can cause destructive effects in our country, where the severe earthquake danger is. In this study, 6 building models with different features were designed to examine the infill wall effects in reinforced concrete buildings. Two different ground-storey heights are considered to reveal the possible soft-storey irregularity that may occur due to the infill wall effects. Within the scope of the study, three different reinforced concrete building models are designed to empty frame, linear loaded frame and linear load + equivalent pressure bar frame. Although the linear load + equivalent pressure bar systems are compared with empty and linear loaded systems, a decrease in period values, peak point displacements and effective relative storey displacement values, an increase in spectral acceleration values and base shear forces, and the formation of soft storey irregularity are determined. Therefore, it has been concluded that modelling the infill walls with equivalent pressure bars in reinforced concrete building models will give more accurate results in terms of building behaviour.

Key Words

"Infill wall, Equivalent pressure bar, RC"

***Sorumlu Yazar: zsulegarip@karabuk.edu.tr**

1. Giriş

Ülkemiz coğrafyasında birçok diri fay hattının varlığı nedeniyle bina tasarımı ve analizlerinde deprem etkileri önemli bir parametredir. Kolon, perde duvar ve kirişler tarafından oluşturulan taşıyıcı sistemlerde yaşam alanları dolgu duvarlar ile bölümlere ayrılmakta ve bu şekilde kompozit çerçeveler meydana gelmektedir. Betonarme binaların tasarım ve analizlerinde genellikle dolgu duvarlar, yapıya olumlu etkileri dikkate alınarak sadece düşey yük olarak hesaplamalara dahil edilmektedir. Dolgu duvarların bu yaklaşımla hesaplarda dikkate alınması durumunda yapının mukavemetine katkıları ihmal edilirken dolgu ağırlığı çerçeveye taşıtılarak ekonomik kayıplara neden olmaktadır (Ersoy 1971). Dolgu duvarlar, kat planındaki konumlarına bağlı olarak kütle ve rijitlik merkezlerini değiştirerek ilave dışmerkezlik neden olmakta ve yapıda ek burulma etkileri oluşturabilmektedir (Doğan, Bakırcı ER 2011). DBYBHY2007 kullanılarak dolgu duvarların, eşdeğer basınç çubuğu yaklaşımı ile modellenmesi ve sisteme düşey yük olarak etki ettirilmesi durumunda yapı performansı ile burulma ve yumuşak kat gibi düzensizliklerde artış meydana geldiği belirlenmiştir (Bayrak, Bikçe 2019). Zemin kat hariç tüm kat planlarında dolgu duvar yer alan betonarme bina modellerinde, dolgu duvarların hesaplara dahil edilmemesi durumunda oluşabilecek düzensizliklerin dikkate alınamayacağı bir gerçektir. Zemin katta dolgu duvar bulunmaması yatay ötelenmenin bu katta yoğunlaşmasına sebep olmaktadır. (Seyit Ali Kaplan 2008). Dolgu duvarların dayanımları oranında yapıya olumlu ve olumsuz birtakım etkileri söz konusudur. Bu konuda birçok deneysel ve analitik çalışma gerçekleştirilmiş ve dolgu duvarların taşıyıcı sistemde modellenmesi ile yapının rijitliği, periyodu, yatay yük taşıma kapasitesi, sönüm oranı gibi dinamik özelliklerinin önemli derecede etkilendiği görülmüştür.

Tam ölçekli 4 katlı betonarme bir binada gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda göreli kat ötelenme değerleri dolgu duvarsız çerçeve modelde %2 iken, zemin katı dolgu duvarsız çerçeve modelde %3.55 olarak belirlenmiştir. Ayrıca en büyük göreli kat ötelenme değerleri dolgu duvarsız çerçeve modelinde ikinci katta meydana gelirken zemin katı dolgu duvarsız çerçeve modelinde alt katta meydana gelmiştir (P Neogro and G Verzeletti 1996). Ayrıca farklı geometriye sahip 10 katlı, 5 farklı dolgu duvarlı betonarme binalarda gerçekleştirilen eşdeğer deprem yükü analizlerinde binalarda sırasıyla her katta dolgu duvarlar kaldırılarak yumuşak kat ve zayıf kat etkileri incelenmiştir. N katlı bina modellerinde 2. ve N-1. katta dolgu duvarların kaldırılması durumlarında yumuşak kat düzensizliklerinin ortaya çıkabileceği ifade edilmiştir (Ertürkmen ve Çağatay 2016). Bu nedenle dolgu duvarların yapıda meydana gelen göreli kat ötelenmeleri ve yumuşak kat düzensizlikleri üzerinde ciddi bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir. Dolgu duvarlar, yapıların birçoğunda çerçeve elemanlar ile arasında esnek derzler olmadan inşa edilmekte ancak hesaplamalarda bu detay dikkate alınmamaktadır. Bu durum yapının deprem etkisi altında gösterdiği davranışı etkilemektedir. Güncel yönetmeliğimiz TBDY2019 ile dolgu duvarların çerçeve elemanları ile arasında esnek derz olması veya olmaması durumu ayrıca dikkate alınarak göreli kat ötelenmeleri için kısıtlamalar getirilmiştir.

Farklı yüksekliklere, yapısal sistemlere ve dolgu duvar dizilimlerine sahip betonarme bina modellerinin farklı açılarda etkiyen deprem kayıtları kullanılarak gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri sonucunda, dolgu duvarlı binalarda dolgu duvarsız binalara kıyasla ardışık deprem olgusunun yapısal hasar üzerindeki etkisinin daha büyük olduğu ortaya konmuştur (Morfidis ve Kostinakis 2017). Dolgu duvarsız, boşluklu dolgu duvarlı ve boşluksuz dolgu duvarlı 4 katlı betonarme binalarda iki farklı sismik tehlike bölgesi için gerçekleştirilen pushover analizi ve doğrusal olmayan spektrum yaklaşımı ile dolgu duvarların yapı boyunca hasarın dağılımını tamamen değiştirebileceği belirlenmiştir. Dolgu duvarların hasar alması ile yapının dayanımda azalma meydana gelmesi ve yer hareketi düzeyindeki bir miktar artış ile yapıda ciddi hasarların oluşabileceği belirtilmiştir. (Dolsek ve Fajfar 2008)

DBYBHY2007'e göre 2. Derece deprem bölgesinde Z2 zemin sınıfında yer alan 4 katlı betonarme bir binada dolgu duvarsız, dolgu duvarlı ve yarı dolgu duvarlı modeller oluşturulmuş ve dolgu duvarların sönümleme etkisi irdelenmiştir. Dolgu duvarların kolon kesme taleplerinde önemli farklılıklar meydana getirdiği ve dolgu duvar malzemesinin basınç dayanımı ile depremden gelen kesme kuvvetlerinin doğru orantılı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca dolgu duvarların deprem enerjisini önemli oranda sönümlediği de belirtilmektedir (Çelebi ve Beyen, 2018). Kahramanmaraş'taki 3 adet mevcut betonarme bina modeli üzerinden gerçekleştirilen doğrusal modal analizlerden dolgu duvarlı binaların doğal periyotlarında azalmalar meydana geldiği ancak mod şekillerinde farklılık oluşmadığı belirlenmiştir (Köse ve Karslıoğlu, 2007).

DBYBHY2007'e göre artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi ile analizleri gerçekleştirilen farklı açıklık ve farklı kat sayısına sahip betonarme binalarda eşdeğer basınç çubuğu olarak modellenen dolgu duvarların yerleşiminin davranışa etkisi araştırılmıştır. Dolgu duvarların yatay yük taşıma kapasitesini arttırdığı ayrıca dolgu duvarlar yerleşiminde simetrinin bina kapasitesi eğrisini önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir (Akyürek vd. 2018). DBYBHY 2007'e göre zaman tanım alanında analizleri gerçekleştirilen, temel çerçeve, dolgulu çerçeve, yumuşak katlı çerçeve olmak üzere 3 tipte tasarlanan binalarda eşdeğer basınç çubuğu olarak modellenen dolgu duvarların farklı yerleşimlerinin yapı davranışına etkileri incelenmiştir. Dolgu duvarların yerleşiminin düzenli olmasının yapı davranışına olumlu etkilerinin olduğu ve dolgu duvarların yapıda rijitlik artışı sağladığı belirtilmiştir (Sivri vd. 2006).

DBYBHY2007'e göre modal analizleri gerçekleştirilen farklı açıklık ve kat sayılarına sahip 16 betonarme binada dolgu duvarlar eşdeğer basınç çubuğu ve sonlu elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Dolgu duvarların çerçeve ile etkileşiminde eksenel basınca çalışan boşluk elemanlar tasarlanmıştır. Boşluk eleman ve eşdeğer basınç çubuğunun rijitliklerine eşit alındığında, sonlu elemanlar ve eşdeğer basınç çubuğu modellerinin benzer sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Öztürkoğlu vd. 2015).

TBDY2019'a göre eşdeğer deprem yükü yöntemi ile doğrusal ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilen betonarme binalarda 5 farklı dolgu duvar oranı dikkate alınarak sismik davranışa etkileri araştırılmıştır. Her iki ucu mafsallı eşdeğer basınç çubuğu olarak modellenen dolgu duvarların ortalarına eksenel yük mafsalı yerleştirilmiştir. Dolgu duvar oranının artması ile yapı rijitliğinin artış gösterdiği ve göreli kat ötelenme değerlerinde azalmalar olduğu belirlenmiştir. Ayrıca taşıyıcı sistem elemanlarında oluşan plastik dönme değerlerinin ve yapıda meydana gelebilecek hasarların önemli oranda azaldığı vurgulanmıştır (Çavdar vd. 2020).

Zemin kat planında dolgu duvarların yer almaması ve diğer tüm katlarda dolgu duvarların bulunması durumunda binalarda birçok olumsuzluğun meydana gelebileceği önceden yapılan birçok çalışma ve gözlemler ile ortaya konulmuştur. Bu çalışmada betonarme bina modellerinde zemin kat hariç tüm katlarda dolgu duvarlar yer almaktadır. Düzensizlikler hakkında bilgi sahibi olabilmek adına iki farklı zemin kat yüksekliği tercih edilmiştir. Genel olarak betonarme binalarda dolgu duvarlar, taşıyıcı sisteme sadece düşey yük olarak etki ettirilmekte ancak dayanıma katkıları dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle dayanıma etkilerinin belirlenebilmesi için dolgu duvarlar eşdeğer basınç çubukları olarak taşıyıcı sisteme dahil edilmiştir. Betonarme bina modelleri dolgu duvar açısından üç farklı tipte tasarlanmıştır. Birinci bina tipinde çerçeve sistemde dolgu duvar olmaması durumu, ikinci bina tipinde çerçeve sistemde zemin kat hariç tüm katlarda dolgu duvarların çizgisel düşey yük olarak etki ettirilmesi durumu, üçüncü bina tipinde ise çerçeve sistemde zemin kat hariç tüm katlarda dolgu duvarların çizgisel düşey yük olarak etki ettirilmesi ve eşdeğer basınç çubukları ile modellenmesi durumu dikkate alınmıştır. Betonarme bina modellerinin analizleri iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada betonarme bina modellerinin TBDY2019 kriterleri dikkate alınarak dayanıma göre tasarımı (DGT), ikinci aşamada ise zaman tanım alanında doğrusal olamayan analizleri (ŞGDT) yapılmıştır. Analizler sonucunda betonarme bina modellerinde meydana gelen yumuşak kat etkileri, etkin göreli kat ötelenme değerleri, tepe noktası maksimum yerdeğiştirme değerleri, taban kesme kuvvetleri ve bina modellerinde oluşan plastik mafsal sayıları değerlendirilmiştir.

2. Yöntem

Betonarme binalarda dolgu duvar etkilerinin incelenmesi için farklı özelliklere sahip 6 adet bina modeli tasarlanmıştır. Bu modellerde dolgu duvar etkileri ile meydana gelebilecek olası yumuşak kat düzensizliğini ortaya koyabilmek için iki faklı zemin kat yüksekliği dikkate alınmıştır. Betonarme binaların taşıyıcı sistemleri doğrusal analizler sonucunda yumuşak kat yüksekliği oluşturmayacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca hiçbir bina modelinde zemin katta dolgu duvar modellemesi yapılmamıştır.

2.1. Betonarme Bina Bilgileri

Betonarme bina modelleri, zemin kat hariç tüm kat yükseklikleri eşit ve 3m olacak şekilde 8 katlı olarak tasarlanmış ve tek tip kat planı kullanılmıştır (Dibekoğlu 2022). Bina modellerine ait kat planı, 3 boyutlu görünüşler ve taşıyıcı sisteme ait kesitler sırasıyla Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3 de verilmiştir. Kat alanı $900m^2$ olan bina modellerinde taşıyıcı sistem aks aralıkları 5m olup toplam 6×6 açıklıktan oluşturulmuştur.

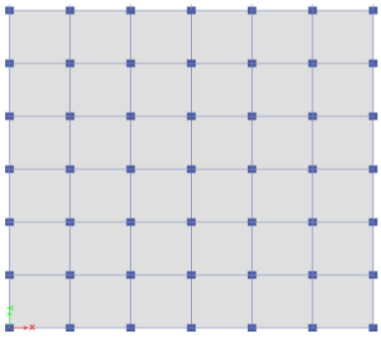
Betonarme bina modelleri dolgu duvar açısından 3 farklı tipte tasarlanmış ve bu tasarımlara ait isimlendirmeler Tablo 1 de sunulmuştur. Çalışmada, dolgu duvar etkilerinin dikkate alınmadığı boş çerçeveler B harfi ile, dolgu duvarların sadece çizgisel yük olarak tüm kirişlere etki ettirildiği modeller Ç harfi ile ve dolgu duvarların kirişlerdeki çizgisel yükleri sabit tutularak zemin kat hariç diğer katlarda kütlesiz eşdeğer basınç çubukları kullanılarak tasarlandığı modellerde E harfi ile ifade edilmiştir. Ayrıca betonarme binalarda dikkate alınan genel tasarım parametreleri Tablo 2 de sunulmuştur.

Tablo 1. Betonarme Bina Modellerine Ait İsimlendirme

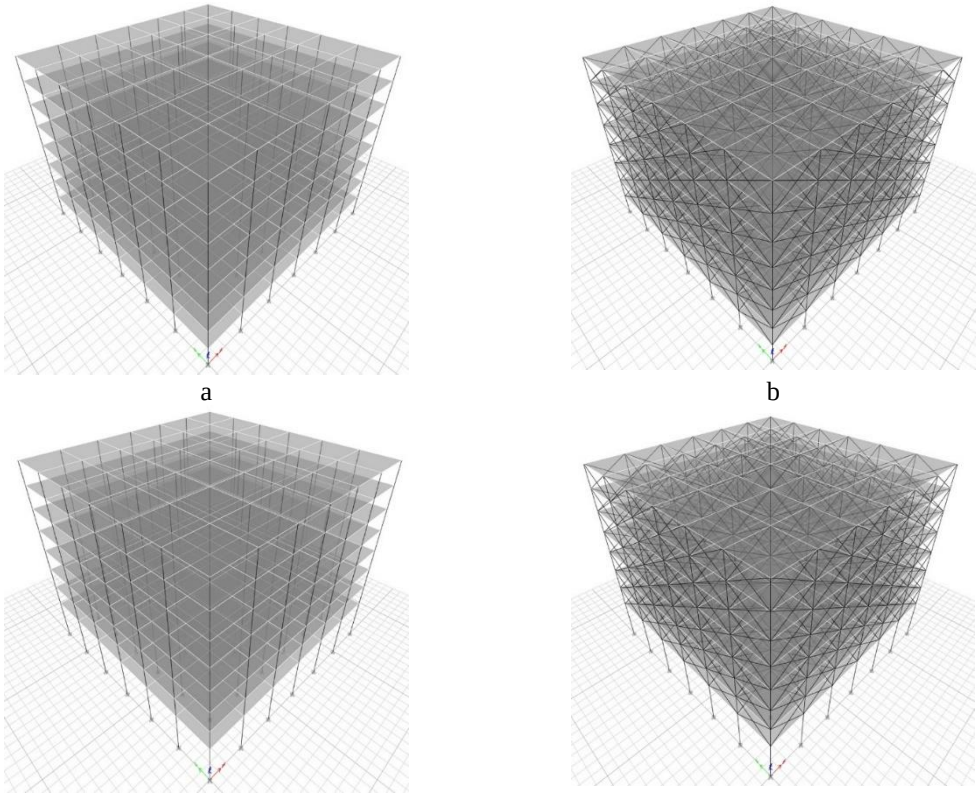
Zemin Kat Yüksekliği	Boş Çerçeve (Duvar yükü yok)	Çizgisel Duvar Yüklü Çerçeve	Çizgisel Duvar Yükü + Eşdeğer Basınç Çubuklu Çerçeve
$h_z = 3\,m$	B-Z3	Ç-Z3	Ç+E-Z3
$h_z = 6\,m$	B-Z6	Ç-Z6	Ç+E-Z6

Tablo 2. Betonarme Binaların Genel Tasarım Parametreleri

Deprem Tasarım Sınıfı (DTS)	2
Bina Yükseklik Sınıfı (BYS)	5
Bina Kullanım Sınıfı (BKS)	3
Bina Önem Katsayısı (I)	1 (Konut)
Bina Taşıyıcı Sistemi	A11-Deprem etkilerinin tamamının moment aktaran süneklik düzeyi yüksek betonarme çerçevelerle karşılandığı binalar
Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı (R)	8
Dayanım Fazlalığı Katsayısı (D)	3
Zemin Sınıfı	ZC (Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar)
Beton Sınıfı	C35/45 $(E = 33000\ N/mm^2)$
Donatı Sınıfı	B420C $(E = 200000\ N/mm^2)$

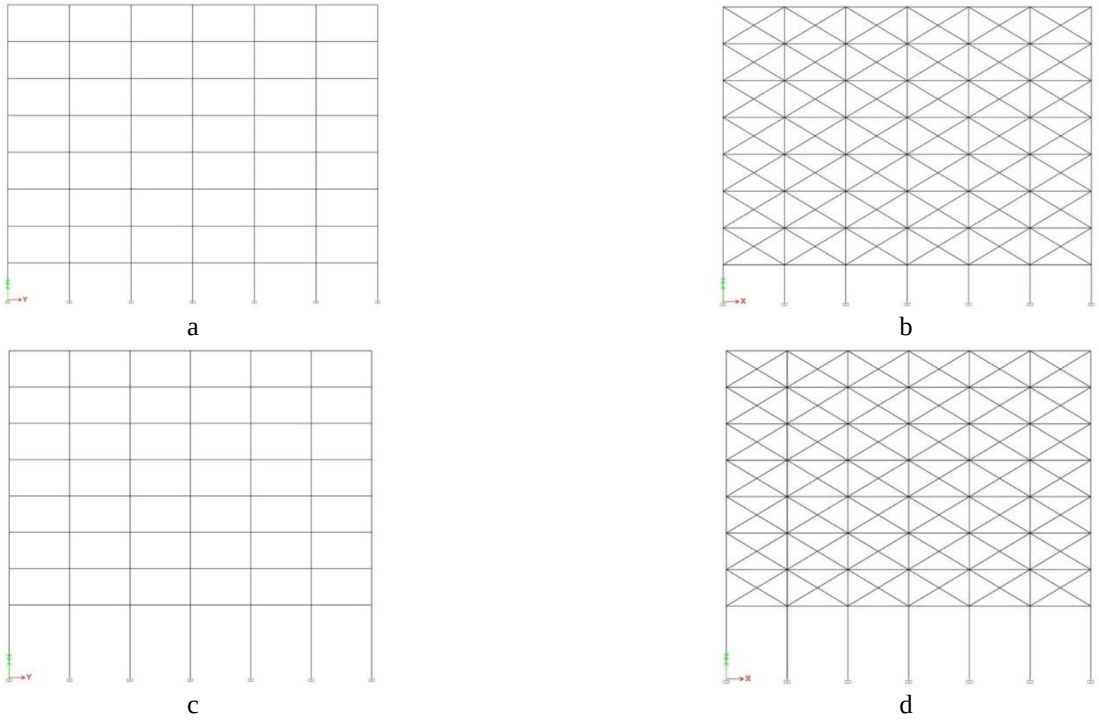


Şekil 1. Betonarme Bina Modellerinde Kullanılan Kalıp Planı.



a b c d

Şekil 2. Betonarme Bina Modellerinin 3 Boyutlu Görünüşleri**. (a)** B-Z3 ve Ç-Z3**; (b)** Ç+E-Z3**; (c)** B-Z6 ve Ç-Z6**; (d)** Ç+E-Z6.



a b c d

Şekil 3. Betonarme Bina Modellerinin Taşıyıcı Sistem Kesitleri**. (a)** B-Z3 ve Ç-Z3**; (b)** Ç+E-Z3**; (c)** B-Z6 ve Ç-Z6**; (d)** Ç+E-Z6.

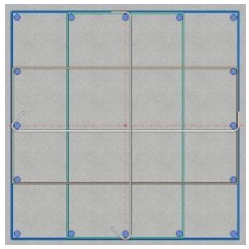
Betonarme bina modelleri her iki doğrultuda (X, Y) süneklik düzeyi yüksek çerçeveler olarak tasarlanmış ve TBDY2019 da yer alan süneklik düzeyi yüksek kolon ve kiriş tasarım kriterleri dikkate alınmıştır. Taşıyıcı sistemde kullanılan kolon ve kirişlere ait kesit ve donatıları plastik mafsal tanımlamasında kolaylık sağlaması amacıyla tek tip kullanılmış ve özellikleri Şekil 4 de sunulmuştur. Kiriş boyutları 300×600 mm olup, üst donatı $5Ø12$ $(565{,}5\ mm^2)$, alt donatı $2Ø12 + 1Ø16$ $(427{,}3\ mm^2)$ olarak donatıları belirlenmiştir. Kolon boyutları 700×700 mm olup, minimum %1 donatı oranı sağlanacak şekilde $16Ø20$ $(5026{,}5\ mm^2)$donatı yerleştirilmiştir. Tasarım aşamasında betonun kesme dayanımına katkısı ($V_c = 0$) ihmal edilmiştir. Bina modellerinde 150 mm kirişli döşemeler kullanılmış ve döşemelerin düzlemleri içinde rijit diyafram olarak davrandığı kabulü yapılmıştır.



Kiriş Boyutu 300/600 (mm)

Üst donatı
5ϕ12 (565.50 mm^2)

Alt donatı
2ϕ12+1ϕ16 (427.30 mm^2)

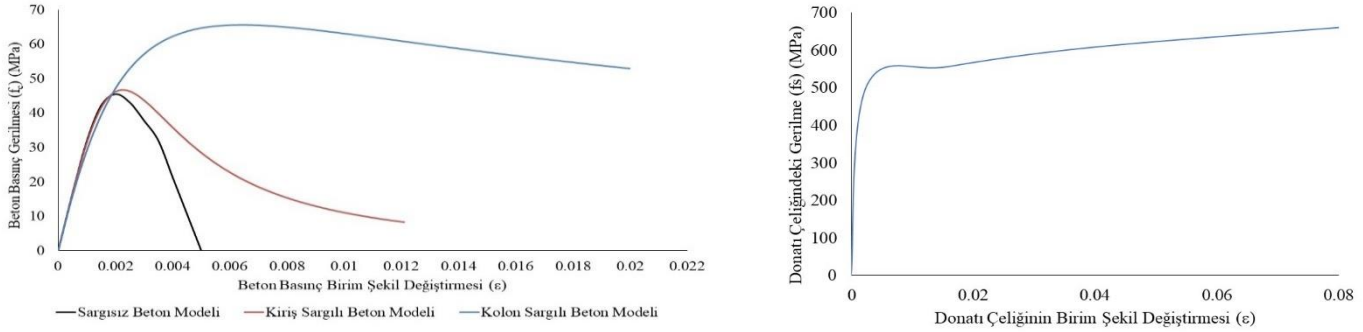


Kolon Boyutu: 700/700 (mm)

16 ϕ 20 (5026.5mm^2)

Şekil 4. Betonarme Bina Modellerinin Taşıyıcı Sistem Elemanlarına ait Kesit Detayları**. (a)** Kiriş Kesiti**; (b)** Kolon Kesiti.

Betonarme bina modellerinin şekil değiştirmeye göre değerlendirilme ve tasarımında, beton ve donatı çeliğinin dayanımları sırasıyla 1.3 ve 1.2 oranında arttırılarak beklenen (ortalama) dayanımları esas alınmıştır. Analizlerde kullanılan malzeme bilgileri Şekil 5 te sunulmuştur.



(a) (b)

Şekil 5. Doğrusal Olmayan Analizlerde Kullanılan Malzeme Bilgileri **(a)** Sargılı-Sargısız Beton Modelleri, **(b)** Donatı Çeliği Gerilme Şekil Değiştirme Eğrisi.

2.2. Dolgu Duvarların Eşdeğer Basınç Çubukları Olarak Modellenmesi

Betonarme binalarda dolgu duvarların modellenmesinde kullanılan eşdeğer basınç çubuklarının genişliğinin hesabında kullanılan parametreler Şekil 6 da verilmiştir. Dolgu duvarlar deprem gibi yatay yükler altında basınç kuvvetine karşı dayanım göstermektedir. Çekme kuvvetleri etkisi altında herhangi bir dayanım gösteremedikleri için çerçeve sistem ile dolgu duvar arasında temas yüzeylerinde azalmalar görülmektedir. Şekil 6 da görüldüğü gibi dolgu duvarda gösterilen a kalınlığındaki diyagonal hatta yük aktarımı gerçekleşmektedir. Bu nedenle eşdeğer basınç çubukları diyagonal hat üzerinde modellenebilmektedir. Bu şekilde eşdeğer basınç çubuğunun kalınlığı ve elastisite modülü, dolgu duvarın kalınlığı ve elastisite modülü ile aynı değerleri alabilmektedir.

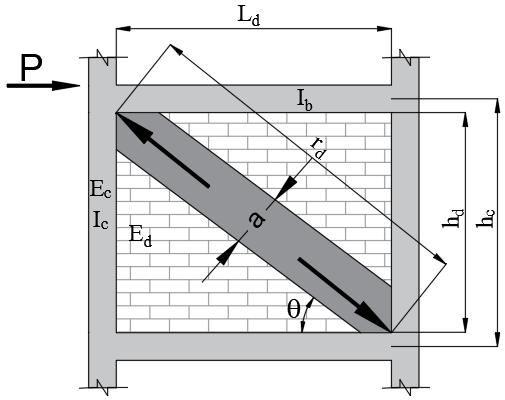
Betonarme binalarda kullanılan dolgu duvarları temsil eden eşdeğer basınç çubuklarının genişliklerinin hesabında, TBDY2019 ve FEMA356 ile verilen Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 kullanılmıştır. Eşitliklerde kullanılan parametreler Tablo 3 de verilmiştir. Dolgu duvar malzemesi olarak elastisite modülü (E_d) 2000 MPa, basınç dayanımı (f_d) 3 MPa olan ve TBDY2019 da belirtilen boşluklu fabrika tuğlası tercih edilmiştir.

$$a = 0{,}175(\lambda_1 h_c)^{-0{,}4}\, r_d \tag{1}$$

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_d t_d \sin 2\theta}{4 E_c I_c h_d}\right]^{-\frac{1}{4}} \tag{2}$$

Tablo 3. Eşdeğer Basınç Çubuğunun Kalınlığı Belirlenirken Kullanılan Değerler.

E_d (MPa)	E_c (MPa)	h_d (m)	L_d (m)	t_d (m)	r_d(m)	I_c(m)	$Sin2\theta$	λ_d	a (m)
2000	33000	2.40	4.30	0.13	4.92	0.02	0.85	0.00043	0.777

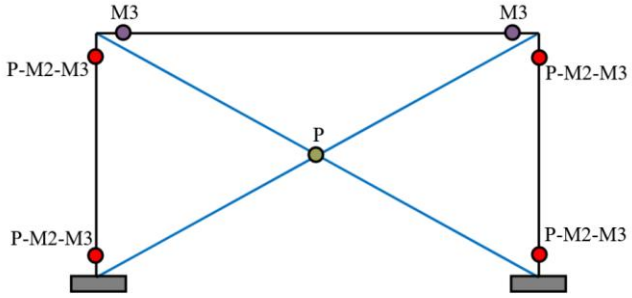


Şekil 6. Eşdeğer Basınç Çubuğuna Ait Bilgiler (a) Duvar Genişliği Hesabında Kullanılan Parametreler (Öztürkoğlu 2016).

2.3. Plastik Mafsallar

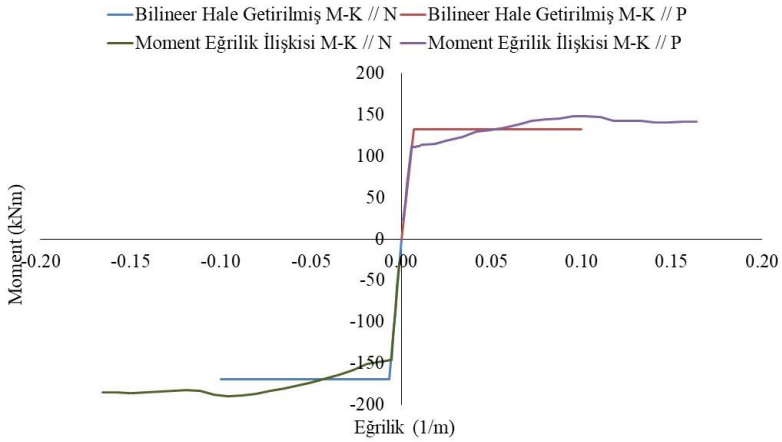
Betonarme bina modellerinde plastik mafsallar TBDY2019 doğrultusunda uygulama kolaylığı olması açısından kolon ve kirişlerin temiz açıklıklarına tanımlanmıştır. Kolonların normal kuvvet ve eğilme momenti etkisi altında olmalarından dolayı PM2M3 mafsalı

ve kirişlerin basit eğilme etkisi altında olmalarından dolayı M3 mafsalı, dolgu duvarların eksenel basınç kuvvetine çalışmaları nedeniyle eşdeğer basınç çubuklarının orta noktalarına eksenel yük (P) mafsalı tanımlanmış ve Şekil 7 de gösterilmiştir.



Şekil 7. Çerçeve Elemanlarında Tanımlanan Plastik Mafsallar.

Kiriş tip kesiti için XTRACT programı ile elde edilen moment eğrilik grafikleri Şekil 8 de sunulmuştur. Tip kesitin akma momenti (M_y), bu akma momentine karşılık gelen akma eğriliği (ϕ_y), göçmenin önlenmesi performans düzeyi dönme sınır değerinin belirlenmesi için göçme öncesi eğrilik değeri (ϕ_u) ve plastik dönme performans sınır değerleri Tablo 4'te sunulmuştur. Tip kiriş için beton ve donatı çeliğine ait birim şekil değiştirme sınır değerleri Tablo 5 de verilmiştir. Beton ve donatı çeliğinin göçmenin önlenmesi için verilen birim kısalma değerleri dikkate alınarak ϕ_u değeri belirlenmiş ve ϕ_u değeri belirlenirken göçme öncesi sınır değerine öncelikli olarak ulaşan beton veya donatı çeliğine ait eğrilik değerleri dikkate alınmıştır. Göçme önlenmesi performans düzeyi için plastik performans sınır değerleri hesaplanırken plastik mafsal boyu (L_p) 0.3m, kesme açıklığı (L_s) 2.15m ve boyuna donatı çap ortalaması (d_b) 12.5 mm olarak alınmıştır.



Şekil 8. Kiriş Tip Kesitine Ait Moment Eğrilik İlişkisi.

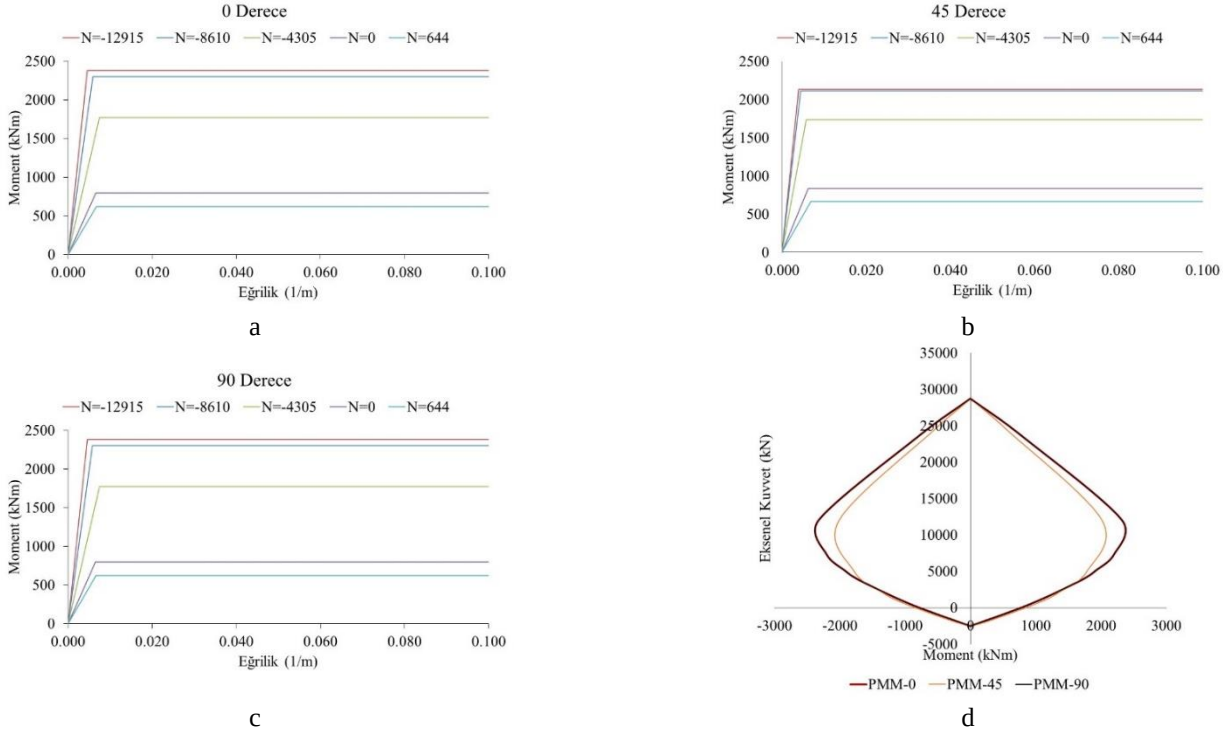
Tablo 4. Tip Kiriş İçin Akma Eğriliği, Akma Momenti, Göçme Öncesi ve Plastik Dönme Sınır Değerleri.

Tip Kiriş 30x60	$\emptyset_y\ (m^{-1})$	$M_y(kNm)$	$\phi_u(m^{-1})$	Plastik dönme performans sınır değerleri		
				$\theta_p^{(GÖ)}$(rad)	$\theta_p^{(KH)}$(rad)	$\theta_p^{(SH)}$(rad)
Pozitif	0.006965	132	0.06319	0.01283	0.00962	0
Negatif	0.006567	169	0.06338	-0.01295	-0.00971	0

Tablo 5. Tip Kiriş Ve Tip Kolon İçin Birim Şekil Değiştirme Sınır Değerleri.

	Beton birim şekil değiştirme sınır değerleri			Donatı çeliği birim şekil değiştirme sınır değerleri		
	$\varepsilon_C^{(GÖ)}$	$\varepsilon_C^{(KH)}$	$\varepsilon_C^{(SH)}$	$\varepsilon_s^{(GÖ)}$	$\varepsilon_S^{(KH)}$	$\varepsilon_S^{(SH)}$
Kiriş	0.005386	0.004039	0.0025	0.032	0.024	0.0075
Kolon	0.014366	0.010775	0.0025	0.032	0.024	0.0075

Kolon tip kesiti için XTRACT programı ile elde edilen moment eğrilik grafikleri ve PMM ilişkisi Şekil 9 de sunulmuştur. Kolonun taşıyabileceği maksimum yük değeri 28700 kN olarak PMM diyagramından alınmış ve bu yükün %45, %30, %15, %0 ve %(−25) oranlarında, 0°, 45° ve 90° etkileşim yüzeyleri için moment eğrilik değerleri belirlenmiştir. Tip kesitin akma momenti (M_y), bu akma momentine karşılık gelen akma eğriliği (ϕ_y), göçmenin önlenmesi performans düzeyi dönme sınır değerinin belirlenmesi için göçme öncesi eğrilik değeri (ϕ_u) ve plastik dönme performans sınır değerleri Tablo 6'te sunulmuştur. Tip kolon için beton ve donatı çeliğine ait birim şekil değiştirme sınır değerleri Tablo 5 de verilmiştir. Plastik mafsal boyu (L_p) 0.35 m, $h_z = 3\,m$ olan modellerde kesme açıklığı (L_s) 1.2 m, $h_z = 6\,m$ olan modellerde kesme açıklığı (L_s) 2.7 m ve boyuna donatı çap ortalaması (d_b) 20 mm olarak hesaba dahil edilmiştir. Kolonların maruz kaldıkları eksenel kuvvet değerleri dikkate alınarak etkin kesit rijitlik çarpanları hesaplanmış ve tasarımları gerçekleştirilmiştir.

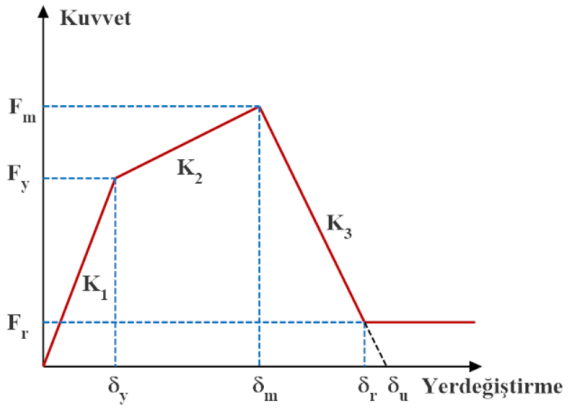


Şekil 9. Kolon Tip Kesitinin Moment Eğrilik Grafikleri Ve PMM Ilişkisi (a) 0°Etkileşim Yüzeyi , (b) 45°Etkileşim Yüzeyi , (c) 90°Etkileşim Yüzeyi , (d) PMM İlişkisi

Tablo 6. Kolon Tip Kesiti Akma Eğriliği, Akma Momenti, Göçme Öncesi ve Plastik Dönme Sınır Değerleri.

Açı (derece)	Eksenel Yük (kN)	$\emptyset_y\ (m^{-1})$	$M_y(kNm)$	$\phi_u(m^{-1})$	Plastik dönme performans sınır değerleri		
					$\theta_p^{(GÖ)}$(rad)	$\theta_p^{(KH)}$(rad)	$\theta_p^{(SH)}$(rad)
0	-12915	0.004596	2377	0.04229	0.01019	0.00764	0
	-8610	0.005886	2300	0.06020	0.01464	0.01098	0
	-4305	0.007472	1769	0.07193	0.01741	0.01305	0
	0	0.006554	795.8	0.05700	0.01367	0.01025	0
	644	0.006709	621.2	0.05526	0.01317	0.00988	0
45	-12915	0.003947	2136	0.03179	0.00756	0.00567	0
	-8610	0.004472	2111	0.03888	0.00932	0.00699	0
	-4305	0.005784	1738	0.05239	0.01261	0.00946	0
	0	0.006206	836.8	0.04816	0.01141	0.00856	0
	644	0.006840	663.7	0.04637	0.01081	0.00811	0
90	-12915	0.004596	2377	0.04229	0.01019	0.00764	0
	-8610	0.005886	2300	0.06020	0.01464	0.01098	0
	-4305	0.007472	1769	0.07193	0.01741	0.01305	0
	0	0.006554	795.8	0.05700	0.01367	0.01025	0
	644	0.006709	621.2	0.05526	0.01317	0.00988	0

Eşdeğer basınç çubuklarında tanımlanan plastik mafsallarda Panagiotakos ve Fardis (1996) tarafından önerilen Şekil 10 da verilen kuvvet yerdeğiştirme ilişkisi modeli kullanılmıştır. Önerilen kuvvet yerdeğiştirme ilişkisi 4 aşamadan meydana gelmektedir. Birinci aşama dolgu duvarın başlangıç kayma dayanımını, ikinci aşama dolgu duvarın çerçeveden ayrıldıktan sonraki davranışı, üçüncü aşama dolgu duvarın maksimum kuvvete ulaştığında oluşan deplasmandan sonraki hasarlı davranışı ve son aşama ise dolgu duvarın kalan sabit dayanımını ifade etmektedir. Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisine ait parametreler Tablo 7 de sunulmuştur. Depremin çevrimsel bir yükleme olması nedeniyle eşdeğer basınç çubukları her iki yönde sadece basınca çalışacak şekilde modellenmiştir.



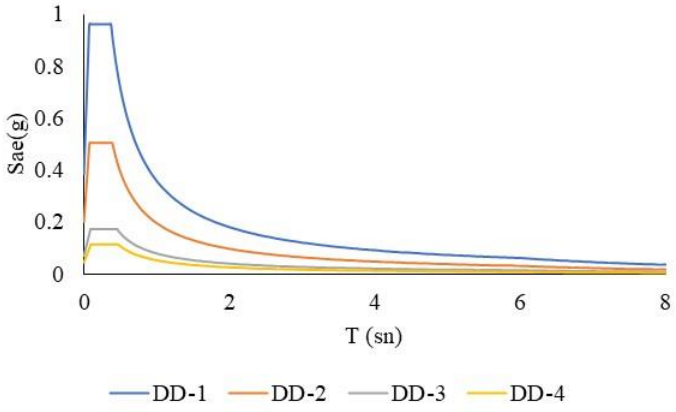
Şekil 10. Eşdeğer Basınç Çubuğuna Ait Kuvvet-Yerdeğiştirme İlişkisi.

Tablo 7. Kuvvet-Yerdeğiştirme İlişkisi Parametreleri.

Kuvvet			Yerdeğiştirme			Rijitlik		
F_y (kN)	F_m (kN)	F_r (kN)	δ_y (mm)	δ_m (mm)	δ_r (mm)	K_1 (kN/m)	K_2 (kN/m)	K_3 (kN/m)
111.8	145.34	0	0.6	1.42	157	186333.33	41007.698	931.667

2.4. Deprem Kayıtlarının Seçimi ve Dönüştürülmesi

Betonarme bina modellerinin 41.977708° enlem ve 33.757782° boylamda Kastamonu İli, İnebolu İlçesinde yer aldığı kabulü yapılarak Türkiye deprem tehlike haritalarından bu koordinatlara ait tasarım parametreleri dikkate alınmıştır (AFAD 2020). Deprem yer hareketi düzeylerine için bu konuma ait spektral ivme değerleri Şekil 11 verilmiş olup deprem parametreleri Tablo 8 de sunulmuştur.



Şekil 11. Deprem Yer Hareketi Düzeylerine Ait Yatay Elastik Tasarım Spektrumları.

Tablo 8. Betonarme Bina Modellerinin Bulunduğu Konuma Ait Deprem Parametreleri. (AFAD 2020)

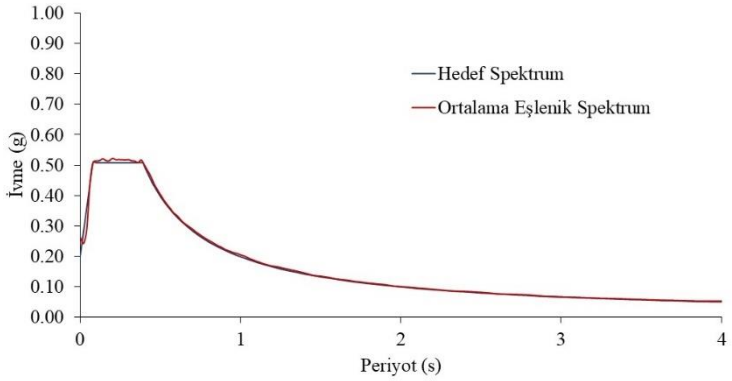
DTS	Seçilen İl	Enlem Boylam	Deprem Yer Hareketi Düzeyi	S_s S_1	F_s F_1	S_{DS} S_{D1}	PGA PGV	T_A T_B
DTS2	Kastamonu	41.977708° 33.757782°	DD-1	0.803	1.2	0.964	0.336	0.074
				0.239	1.5	0.359	20.165	0.372
			DD-2	0.390	1.3	0.507	0.167	0.078
				0.132	1.5	0.198	11.020	0.391
			DD-3	0.132	1.3	0.172	0.059	0.030
				0.052	1.5	0.078	4.366	0.152
			DD-4	0.088	1.3	0.114	0.040	0.094
				0.036	1.5	0.054	3.021	0.472

Binanın yapılması planlanan Kastamonu ili İnebolu ilçesi yakınında sismik olarak dünyadaki en aktif doğrultu atımlı fay sistemlerinden biri olan Kuzey Anadolu fay hattı mevcuttur. Deprem kayıtları doğrultu atımlı faylanma mekanizmasına sahip olacak şekilde seçilmiştir. Yakın fay etkisini önlemek adına fay kırılma uzaklığı 20-50 km arasında olan deprem kayıtları kullanılmıştır. Ayrıca tercih edilen yerel zemin sınıfı ZC olduğu için zemin kayma dalga hızı $(V_s)_{30} = 360 - 760\ m/s$ olarak alınmıştır. Belirtilen özelliklere sahip 11 adet deprem kaydı takımı PEER veri tabanından elde edilmiş ve özellikleri Tablo 9 da sunulmuştur.

Tablo 9. Tasarım Spektrumuna Uyuşum Sağlanarak Dönüştürülecek Deprem Kayıtları.

Peer Numarası	Yer	Yıl	Fay Tipi	Büyüklük	Rrup (km)	Vs30 (m/s)	D5-95 (s)	Kullanılan Deprem Kaydı
190	Imperial Valley-06	1979	Doğrultu Atımlı	6.53	24.61	362.38	11.60	√
472	Morgan Hill	1984	Doğrultu Atımlı	6.19	31.88	543.63	21.80	√
1166	Kocaeli, Turkey	1999	Doğrultu Atımlı	7.51	30.73	476.62	19.50	---
1619	Duzce, Turkey	1999	Doğrultu Atımlı	7.14	34.30	535.24	16.40	√
4150	Parkfield-02, CA	2004	Doğrultu Atımlı	6.00	22.02	412.79	15.40	√
6057	Big Bear-01	1992	Doğrultu Atımlı	6.46	26.47	362.39	13.80	---
6059	Big Bear-01	1992	Doğrultu Atımlı	6.46	29.06	396.41	12.10	---
6060	Big Bear-01	1992	Doğrultu Atımlı	6.46	41.89	367.84	12.90	---
6875	Joshua Tree, CA	1992	Doğrultu Atımlı	6.10	22.30	396.41	16.10	---
6876	Joshua Tree, CA	1992	Doğrultu Atımlı	6.10	29.40	425.02	7.80	---
6878	Joshua Tree, CA	1992	Doğrultu Atımlı	6.10	21.97	367.84	10.70	√

TBDY2019 da deprem kayıtlarının basit ölçeklendirme yöntemi ve spektral uyuşum sağlanacak şekilde dönüştürme olmak üzere iki şekilde kullanılacağı belirtilmektedir. Deprem kayıtları SeismoMatch programı kullanılarak DD-2 deprem yer hareketi düzeyi ile spektral uyuşum sağlanacak şekilde dönüştürülmüştür. Dönüştürülen deprem yer hareketlerinin spektrumlarının ortalamalarının tasarım spektrumu ile karşılaştırılması Şekil 12 ile verilmiş ve bu deprem kaydı takımlarından 5 adeti doğrusal olmayan analizlerde kullanılmıştır. Burada betonarme binalardaki dolgu duvarların etkileri araştırıldığından tüm deprem kaydı takımlarının kullanılmasına gerek görülmemiştir. Betonarme binalarda deprem hesabı, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz olarak gerçekleştirildiği için Rayleigh orantılı sönüm matrisinin oluşturulması için dikkate alınan modlarda sönüm oranı %5 olarak alınmıştır.



Şekil 12. Dönüştürülen Deprem Yer Hareketlerinin Spektrumlarının Ortalamalarının Tasarım Spektrumu İle Karşılaştırılması.

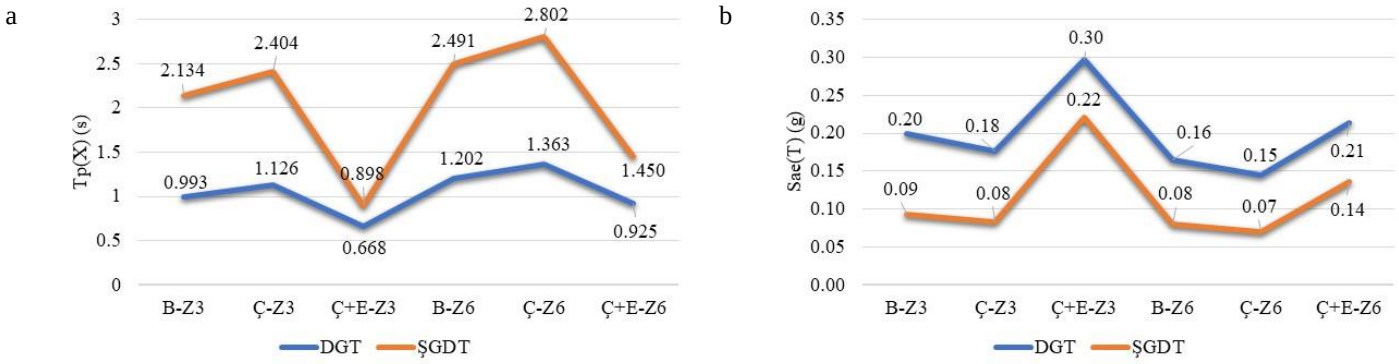
3. Değerlendirme

Bu çalışmada simetrik kat planına sahip, iki farklı zemin kat yüksekliğine sahip çerçeve tipi betonarme bina modelleri tasarlanmıştır. Dolgu duvarların dikkate alındığı modellerde zemin kat haricindeki tüm katlarda dolgu duvarlar eşdeğer basınç çubukları kullanılarak modellenmiştir. Dolgu duvarsız, çizgisel yüklü ve çizgisel yük + eşdeğer basınç çubuğu kullanılarak üç farklı tipte oluşturulan toplamda 6 adet betonarme bina modellerinin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilerek dolgu duvar etkileri belirlenmiştir (ETABS 19). Tüm tasarım ve analiz aşamalarında TBDY2019 kriterleri dikkate alınmıştır.

Betonarme bina modellerinde dayanıma göre tasarım (DGT) ve şekil değiştirmeye göre tasarım (ŞGDT) dikkate alınarak gerçekleştirilen modal analizler sonucunda elde edilen periyot değerleri ve spektral ivme değerleri ilk iki mod için Şekil 13a da sunulmuştur. Bilindiği gibi her iki tasarım yönteminde dikkate alınan etkin kesit rijitlikleri ve tasarım ilkeleri farklılık göstermektedir. Burada bahse konu olan bu farklılıkların, modal analizler ile ortaya konulmasıdır.

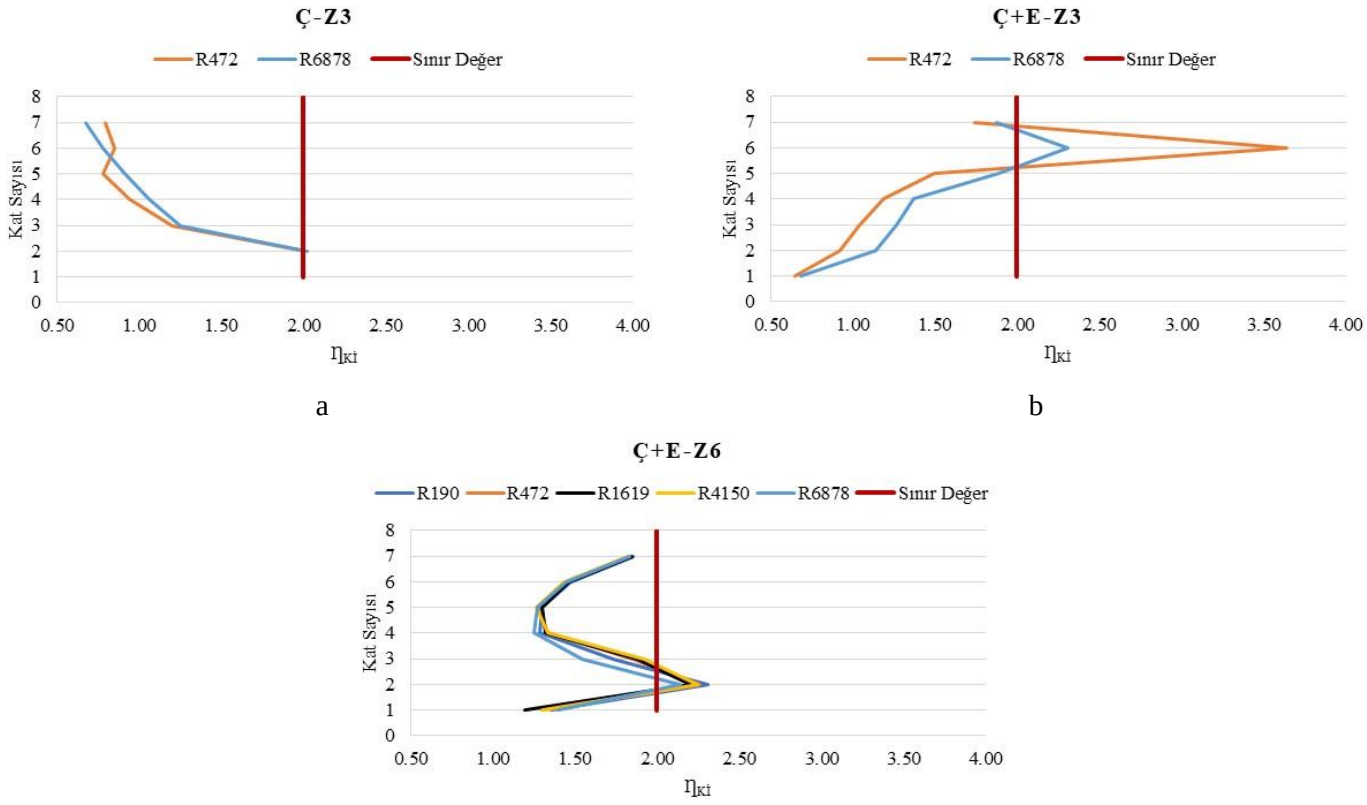
Şekil 13a incelendiğinde ŞGDT ile elde edilen periyot değerlerinin DGT'ye göre artış gösterdiği ve meydana gelen artış oranlarının B-Z3 ve Ç-Z3 modellerinde %110, Ç+E-Z3 modelinde %30, B-Z6 ve Ç-Z6 modellerinde %110, Ç+E-Z6 modelinde %60 bandında gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu veriler ışığında farklı zemin kat yüksekliğine sahip modellerde, boş çerçeveler ile çizgisel yüklü çerçevelerin benzer periyot artış oranlarına sahip olduğu ancak bu sistemlerde dolgu duvarların modellenmesi ile artış oranlarında ciddi düşüşlerin olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca zemin kat yüksekliğinin iki kat artması ile periyot değerlerinin artış oranlarında da iki kat bir artış tespit edilmiştir. Ayrıca Ç-Z3 modelinin B-Z3, Ç-Z6 modelinin B-Z6 ile kıyaslanması durumunda DGT ve ŞGDT'ye göre periyot değerlerinde meydana gelen artış oranları %15 bandında gerçekleşmiştir. DGT ve ŞGDT'ye göre sırasıyla, Ç+E-Z3 modelinde Ç-Z3 modeline kıyasla %40 ve %60 bandında, Ç+E-Z6 modelinde Ç-Z6 modeline kıyasla %30 ve %50 bandında periyot değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde eşdeğer basınç çubukları kullanılarak modellenen dolgu duvarların yapının periyodunda ciddi azalmalara neden olduğu söylenebilmektedir.

Şekil 13b incelendiğinde ŞGDT ile elde edilen spektral ivme değerlerinin DGT'ye göre azalış gösterdiği ve meydana gelen azalma oranlarının B-Z3 ve Ç-Z3 modellerinde %50, Ç+E-Z3 modelinde %30, B-Z6 ve Ç-Z6 modellerinde %50, Ç+E-Z6 modelinde %40 bandında gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu veriler ışığında farklı zemin kat yüksekliğine sahip modellerde, boş çerçeveler ile çizgisel yüklü çerçevelerin spektral ivme değerlerinde benzer azalma oranlarına sahip olduğu ancak bu sistemlerde dolgu duvarların modellenmesi ile azalma oranlarında artış olduğu gözlemlenmiştir.



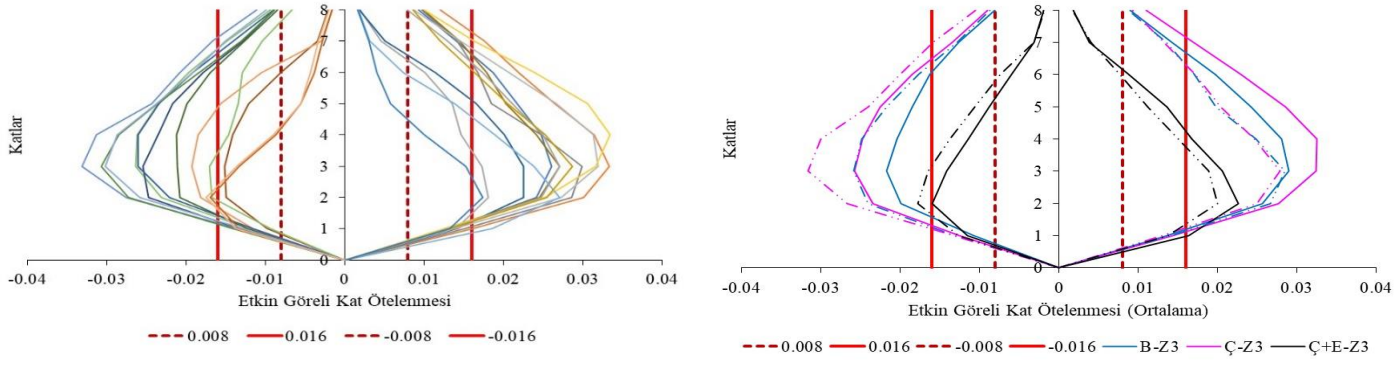
Şekil 13. DGT Ve ŞGDT'ye Göre Modal Analiz Sonuçları (a) Periyotlar; (b) Spektral İvme Değerleri.

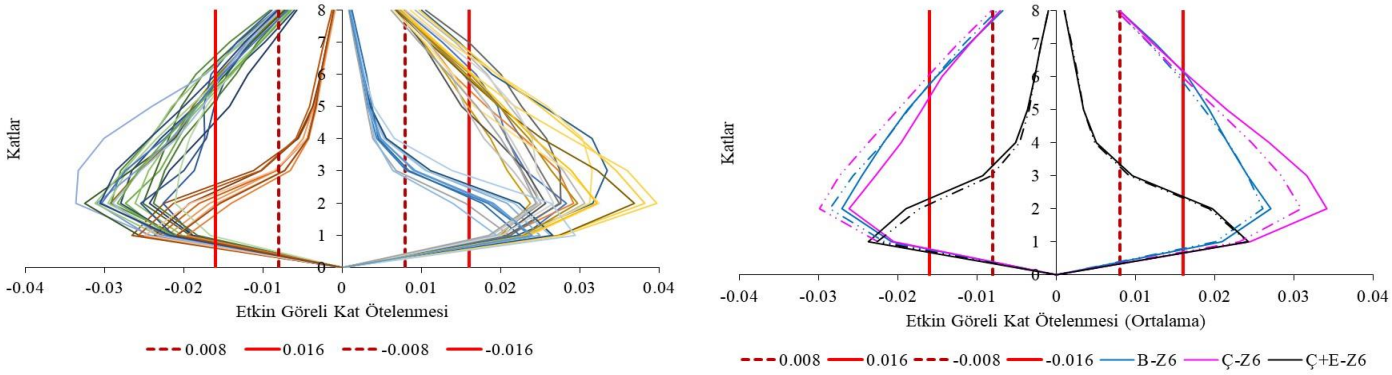
Zemin kat yüksekliğinin değişmesi ile oluşması muhtemel yumuşak kat düzensizliğine dolgu duvar etkilerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen veriler Şekil 14 de sunulmuştur. Zemin kat yüksekliği 3m olan yapıların dolgu duvarsız modellerde yumuşak kat düzensizliği meydana gelmezken, çizgisel yüklü ve dolgu duvarlı bina modellerinde tüm deprem kayıtlarında yumuşak kat düzensizliği meydana gelmiştir. Zemin kat yüksekliği 6m olan yapıların dolgu duvarsız ve çizgisel yüklü modellerde yumuşak kat düzensizliği meydana gelmezken, dolgu duvarlı bina modellerinde tüm deprem kayıtlarında yumuşak kat düzensizliği meydana gelmiştir. Dolgu duvarların eşdeğer basınç çubuğu kullanılarak modellenmesi halinde ortaya çıkan bu durum betonarme binalarda dolgu duvarların dikkate alınmasının ehemmiyetini göstermektir. Genel olarak betonarme binalarda dolgu duvarların sadece çizgisel yük olarak hesaplara dahil edilmesinin davranış açısından yanıltıcı olabileceği görülmektedir.



Şekil 14. Yumuşak Kat Düzensizliği Meydana Gelen Modellere Ait η_{Ki} Değerleri. (a) Ç-Z3; (b) Ç+E-Z3; (c) Ç+E-Z6.

Betonarme bina modellerinden elde edilen etkin göreli kat ötelenme değerleri ve ortalamaları Şekil 15 de sunulmuştur. B-Z6 ve Ç-Z6 bina modellerinde gözlemlenen etkin göreli kat ötelenmelerinin benzer değerler aldığı, Ç+E-Z6 bina modellerinde ise bu değerlerde genel olarak azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Ancak tüm bina modellerinin TBDY2019 ile sunulan sınır değerleri aştığı görülmektedir. Etkin göreli kat ötelenme sınır değerlerinin betonarme bina modellerinin doğrusal analizlerinde sağlanmasına karşın doğrusal olmayan analizlerde sağlanmadığı net olarak belirlenmiştir. Dolgu duvarlı modellerde oluşan etkin göreli kat ötelenme değerleri diğer modellere kıyasla azalmaktadır.





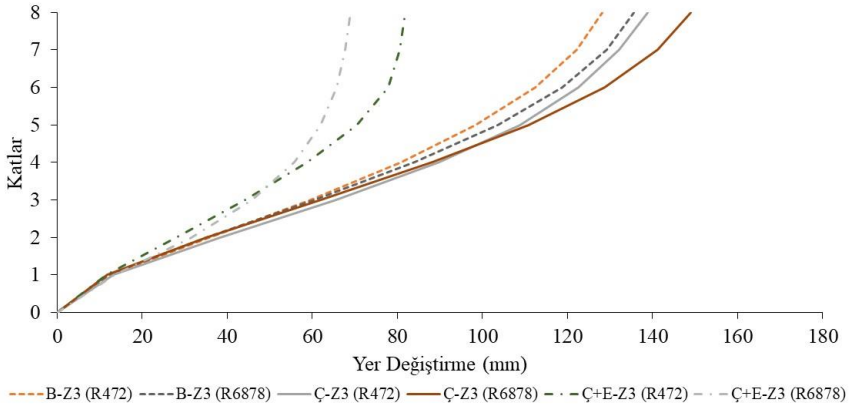
c d

Şekil 15. Etkin Göreli Kat Ötelenme Değerleri (a) $h_z = 3m$; (b) $h_z = 3m$ (ortalama); (c) $h_z = 6m$; (d) $h_z = 6m$ (ortalama).

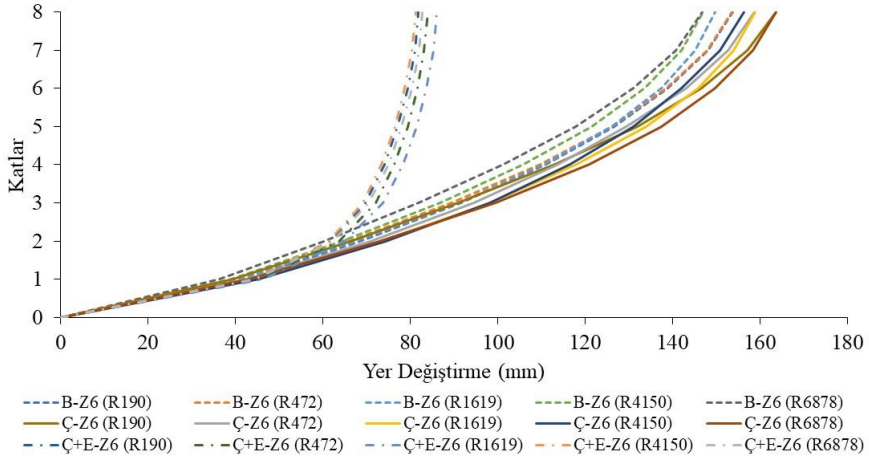
Betonarme bina modellerinden elde edilen kat yer değiştirme değerleri Şekil 16 da sunulmuştur. Katlarda meydana gelen yer değiştirmeler değerlendirildiğinde; B-Z6 modelinde elde edilen değerler B-Z3 kıyaslandığında zemin katta %220, 2. katta %80 artış, Ç-Z6 modelinde elde edilen değerler Ç-Z3 kıyaslandığında zemin katta %240, 2. katta %100 artış, Ç+E-Z6 modelinde elde edilen değerler Ç+E-Z3 kıyaslandığında zemin katta %260, 2. katta %110 artış meydana gelirken diğer katlarda bu artış oranları giderek azalarak 8. Katta %10 mertebesine kadar gerilemiştir. Zemin kattaki en yüksek artış oranının dolgu duvarlı modellerde ortaya çıktığı ve bu durumun zemin katta dolgu duvar eksikliğinden kaynaklandığı kanaatine varılmıştır.

Zemin kat yükseklikleri aynı olan tüm dolgu duvarsız, çizgisel yüklü ve dolgu duvarlı bina modellerinde, zemin kat yer değiştirmeleri benzer değerleri alırken üst katlara çıkıldıkça dolgu duvarlı modellerde meydana gelen kat yer değiştirmeleri diğer modellere kıyasla yaklaşık %35 oranında bir azalım göstermiştir. Buradan dolgu duvarların eşdeğer basınç çubuğu olarak modele dahil edilmesi ile yapı davranışındaki olumlu etkisi görülmektedir.

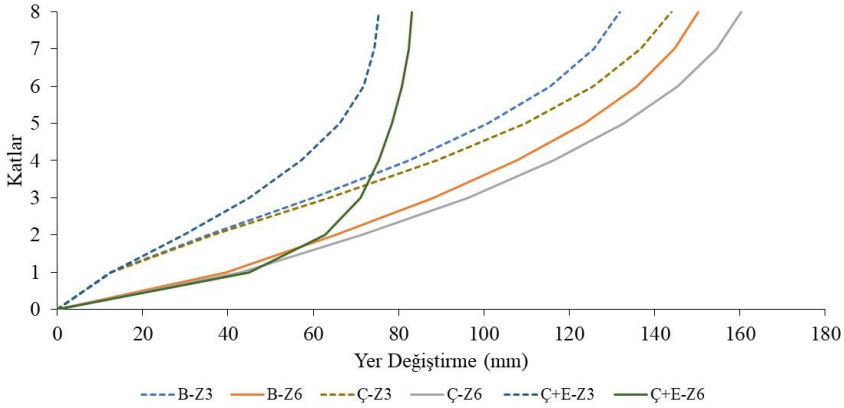
a



b

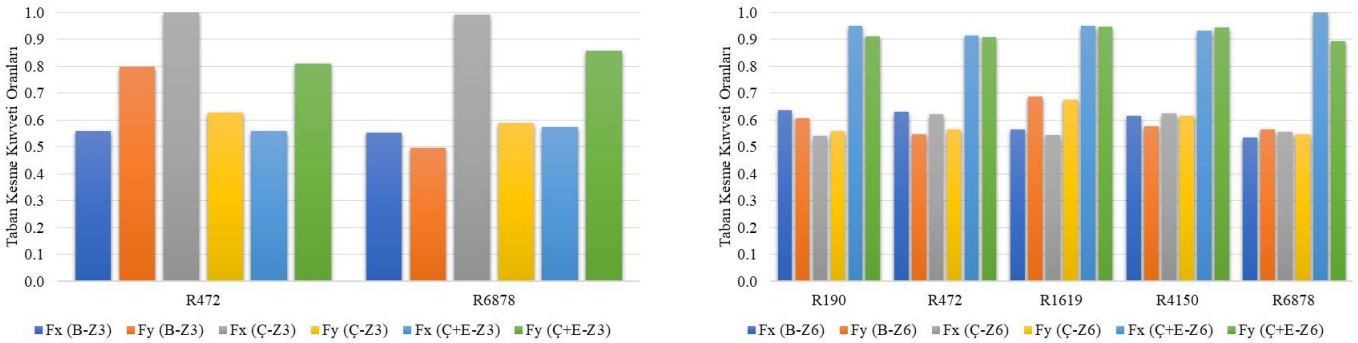


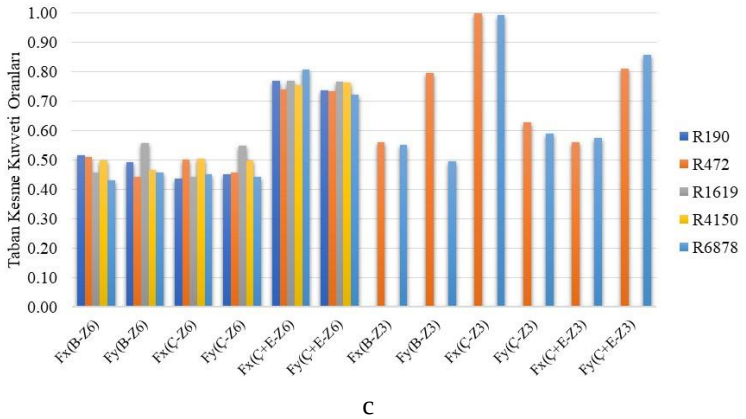
c



Şekil 16. Betonarme Bina Modellerine Ait Maksimum Kat Yerdeğiştirme Değerleri. (a) $h_z = 3m$; (b) $h_z = 6m$; (c) ortalama.

Betonarme bina modellerinden elde edilen taban kesme kuvveti oranları Şekil 17 de sunulmuştur. Zemin kat yüksekliği 3 m olan bina modellerinde en yüksek taban kesme kuvveti oranları çizgisel yüklü sistemlerde meydana gelirken sonrasında dolgu duvarlı sistemler takip etmiştir. Zemin kat yüksekliği 6 m olan bina modellerinde dolgu duvarsız ve çizgisel yüklü sistemlerde yaklaşık aynı taban kesme kuvveti oranları meydana gelirken dolgu duvarlı sistemlerde taban kesme kuvveti oranları ortalama %30 oranında artış göstermiştir. Tüm betonarme bina modellerinde meydana gelen taban kesme kuvveti değerleri kendi içlerinde oranlanmış ve Şekil 17c de sunulmuştur. Şekilden de görülebileceği gibi en yüksek taban kesme kuvveti değerleri zemin kat yüksekliği 3 m olan çizgisel yüklü sistemlerde belirlenmiştir. Bu değeri zemin kat yüksekliği 3 m olan dolgu duvarlı sistemler ve zemin kat yüksekliği 6 m olan dolgu duvarlı sistemler takip etmiştir. Betonarme binalarda dolgu duvarların varlığı yapının rijitliğini bir miktar arttırırken yapının ağırlığını da arttırmaktadır. Bu nedenle yapıya etki edecek yatay deprem yüklerinin de artmasına neden olmaktadır. Çizgisel yüklü sistemlerde ise herhangi bir rijitlik artışı olmadan yatay deprem yüklerinin artması söz konusu olmaktadır.

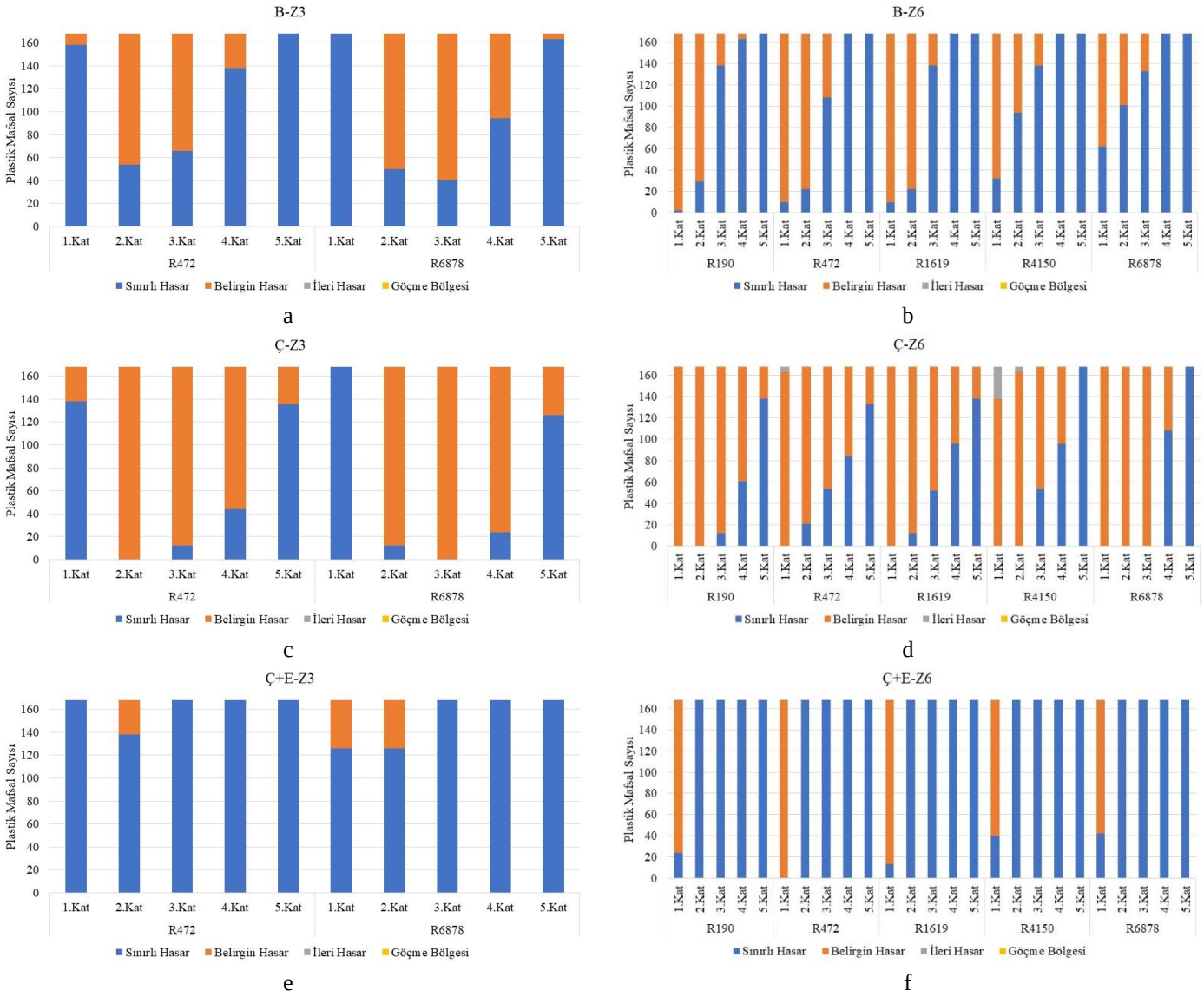




Şekil 17. Betonarme Bina Modellerine Ait Taban Kesme Kuvveti Oranları. (a) $h_z = 3m$; (b) $h_z = 6m$; (c) karşılaştırma.

Betonarme bina modellerinin zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizleri sonucunda sistemde tanımlı plastik mafsalların durumu ve sayıları Şekil 18 de verilmiştir. Betonarme bina modellerinde kolonlarda plastik mafsal meydana gelmemiş dolayısıyla sadece kirişlerde meydana gelen plastik mafsal sayıları üzerinden değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Dolgu duvarların sadece çizgisel yük olarak sisteme dahil edilmesi durumunda belirgin hasar durumundaki plastik mafsal sayısında artış olduğu

gözlemlenmiştir. Bu artışın genel olarak ilk 5 katta meydana geldiği belirlenmiştir. Ancak dolgu duvarların sisteme eşdeğer basınç çubuğu kullanılarak dahil edilmesi durumunda boş çerçevede meydana gelen belirgin hasar durumundaki plastik mafsal sayılarında ciddi azalmaların meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 18. Betonarme Bina Modellerinde Plastik Mafsal Sayıları. (a) B-Z3; (b) B-Z6; (c) Ç-Z3; (d) Ç-Z6; (e) Ç+E-Z3; (f) Ç+E-Z6.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada 3m ve 6m olmak üzere iki farklı zemin kat yüksekliği ile simetrik kat planına sahip betonarme bina modellerinde TBDY2019 da belirtilen kriterler dikkate alınarak tasarım yapılmıştır. Dolgu duvarların dikkate alındığı modellerde zemin kat haricindeki tüm katlarda dolgu duvarlar eşdeğer basınç çubukları kullanılarak modellenmiştir. Dolgu duvarsız, çizgisel yüklü ve çizgisel yük + eşdeğer basınç çubuğu kullanılarak üç farklı tipte oluşturulan toplamda 6 adet betonarme bina modellerinin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilerek dolgu duvar etkileri belirlenmiştir. PEER veri tabanından elde edilen 11 adet deprem kaydı takımı tasarım spektrumuna uyuşum sağlayacak şekilde dönüştürülmüş ve zaman tanım alanında gerçekleştirilen analizlerin çok uzun sürmesi nedeniyle zemin kat yüksekliği 3m ve 6m olan modellerde sırasıyla 2 ve 5 farklı dönüştürülmüş deprem kaydı takımı kullanılmıştır. Buradaki amaç dolgu duvar etkilerinin incelenmesi olduğu için tüm deprem kaydı takımları dikkate alınmamıştır. Analizlerden elde edilen veriler değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

- Betonarme bina modellerinin modal analizleri sonucunda, ŞGDT ile elde edilen periyot değerlerinin DGT sonucunda elde edilenlere kıyasla genel olarak artış gösterdiği görülmektedir. Dolgu duvarların çizgisel yük olarak etki ettirildiği sistemlerin periyotları boş çerçeveli sistemin periyot değerlerinden yüksek çıkmaktadır. Buradan da görüldüğü gibi dolgu duvarların ağırlığının sadece yük olarak sisteme etki ettirilmesi nedeniyle sistemde meydana gelen kütle artışı periyodun artmasına neden olmaktadır.

Ancak dolgu duvarlar sisteme yük olarak etki ettirilirken ayrıca eşdeğer basınç çubuklarının kullanılması durumunda sistemde meydana gelen rijitlik artışı ile periyot değerlerinde azalma görülmektedir. Eşdeğer basınç çubuklu sistemdeki periyot değerleri boş çerçeveli sistem ve çizgisel yüklü sistem değerlerinden daha düşük çıkmaktadır.

- Spektral ivme değerleri, boş çerçeveli sistemlerle kıyaslandığında çizgisel yüklü sistemlerde azalma eğilimindeyken eşdeğer basınç çubuklu sistemlerde artış eğilimi göstermektedir. Genel olarak dolgu duvarların çizgisel yük olarak ele alınması ile sistemlerin maruz kalacağı spektral ivme değerleri gerçeği yansıtmamaktadır. Dolgu duvarların eşdeğer basınç çubuğu olarak modellenmesi ile daha gerçekçi sonuçların elde edildiği açıktır. Ayrıca zemin kat yüksekliğinin artması durumunda spektral ivme değerlerinde düşme gözlemlenmiştir.
- Dolgu duvarların eşdeğer basınç çubuğu olarak modellenmesi durumunda sistemde yumuşak kat etkileri görülebilmektedir. Dolayısıyla sistemin dolgu duvarsız veya sadece çizgisel yüklü olarak modellenmesi davranış açısından yanıltıcı sonuçlara varmamıza neden olmaktadır.
- Dolgu duvarların çizgisel yük olarak etki ettirilmesi durumunda etkin göreli kat ötelenme değerlerinde önemli değişimler oluşmazken, eşdeğer basınç çubuklu sistemlerde bu değerlerde ciddi azalmalar belirlenmiştir. Dolayısıyla eşdeğer basınç çubuklarının etkin göreli kat ötelenmelerinde olumlu sonuçlar ortaya koyduğu belirlenmiştir.
- Betonarme bina modellerinde katlarda meydana gelen yerdeğiştirmeler değerlendirildiğinde tüm modellerde 1. ve 2. katlarda benzer değerlerin meydana geldiği ancak tepe noktasına doğru bu benzerliğin ortadan kalktığı belirlenmiştir. En yüksek tepe noktası yerdeğiştirmesi çizgisel yüklü sistemlerde meydana gelirken en düşük değer eşdeğer basınç çubuklu sistemlerde gözlemlenmiştir. Boş çerçeveli sistemlerde tepe noktası yer değiştirmeleri çizgisel yüklü sistemlerde meydana gelen tepe noktası yer değiştirme değerlerine yaklaşık çıkmaktadır.
- Dolgu duvarların çizgisel yük olarak etki ettirilmesi durumunda belirgin hasar durumundaki plastik mafsal sayılarında artış olurken eşdeğer basınç çubuklu sistemlerde boş çerçevede elde edilen değerden de düşük olmaktadır. Zemin kat yüksekliği 6m olan çizgisel yüklü sistemlerde 1. katlarda ileri hasar durumunda plastik mafsallarda gözlemlenmiştir.

Özetle eşdeğer basınç çubuklu sitemlerin boş ve çizgisel yüklü sistemlerle kıyaslanması durumunda periyot değerlerinde azalma, spektral ivme değerlerinde artma, yumuşak kat düzensizliği oluşma durumu, tepe noktası yerdeğiştirmelerinde azalma, taban kesme kuvvetlerinde artma ve etkin göreli kat ötelenme değerlerinde azalma belirlenmiştir. Dolayısıyla, betonarme bina modellerinde dolgu duvarların eşdeğer basınç çubuklu olarak modellenmesinin yapı davranışı açısından daha doğru sonuçlar vereceği kanaatine varılmıştır.

Bu çalışma da dikkate alınan kriterlerin sınırlı olduğu ve dolayısıyla betonarme bina modellerinde genelleme yapabilmek için daha kapsamlı çalışmaların gerçekleştirilmesi gerektiği unutulmamalıdır. Ayrıca gelecekte yapılacak çalışmalarda literatürde önerilen eşdeğer basınç çubuğu modelleme tekniklerinin yapı davranışı üzerindeki etkilerinin araştırılması önerilmektedir.

Referanslar

AFAD. (2020). T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması [Çevrimiçi]. Erişim: https://tdth.afad.gov.tr/.

Akyürek, O., Tekeli, H., & Demir, F. (2018). Plandaki dolgu duvar yerleşiminin bina performansı üzerindeki etkisi. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 10(1), 42-55.

Bayrak, O. F., & Bikçe, M. (2019). Dolgu duvarların yapısal düzensizliklere ve performansa etkisinin mevcut bir yapı üzerinde incelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24(3), 465-484. DOI: 10.17482/uumfd.477760.

Çavdar, Ö., Gülfem, K. Ö. S. E., & Sunca, F. (2020). Betonarme binaların deprem performanslarına dolgu duvarların etkisinin incelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 25(1), 465-484.

Çelebi, O., & Beyen, K. (2018). Betonarme binaların depreme karşı davranışında dolgu duvarların ve sönümleyici sistemlerin etkisi. Afet ve Risk Dergisi, 1(1), 9-25.

DBYBHY2007. (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. T. C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, http/www.deprern.gov.tr.

Dibekoğlu. Ş. (2022). Deprem etkisindeki betonarme binalarda dolgu duvarların davranışa etkilerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.

Doğan, O. & Bakırcı Ş. E. (2011). Hareketli yük ve dolgu duvar dağılımının burulma düzensizliğine etkisi. International Journal of Engineering Research and Development, 3(2), 2-5.

Dolšek, M., & Fajfar, P. (2008). The effect of masonry infills on the seismic response of a four-storey reinforced concrete frame—a deterministic assessment. Engineering Structures, 30(7), 1991-2001.

Ersoy, U., Uzsoy, Ş., & Aktan, E. (1971). Dolgulu çerçevelerin davranış ve mukavemeti. Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu, Proje No: MAG-205, Ankara.

Ertürkmen, D., & Çağatay, İ. H. (2016). Dolgu Duvarlı Yapılarda Yumuşak Kat ve Zayıf Kat Düzensizliklerinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(2), 269-278.

ETABS 19. (2019). Integrarated Software For Structural Analysis And Design, Computers And Structures Inc., California.

FEMA356. (2000). Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, USA.

Kaplan, S. A. (2008). Dolgu duvarların betonarme taşıyıcı sistem performansına etkisi. Türkiye Mühendislik Haberleri, 6(452), 49-62.

Köse, M. M., & Karslıoğlu, Ö. (2007). Dolgu duvarların bina doğal modal periyot ve mod Şekline olan etkileri. Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 261-270.

Morfidis, K., & Kostinakis, K. (2017). The role of masonry infills on the damage response of R/C buildings subjected to seismic sequences. Engineering Structures, 131, 459-476.

Negro, P., & Verzeletti, G. (1996). Effect of infills on the global behaviour of R/C frames: energy considerations from pseudodynamic tests. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 25(8), 753-773.

Öztürkoğlu, O. (2016). Kısmi Boşluklu Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçevelerin Doğrusal Olmayan Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Öztürkoğlu, O., Taner, U., & Yeşilce, Y. (2015). Betonarme yapılarda dolgu duvar-çerçeve etkileşiminin incelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 17(51), 109-121.

Panagiotakos, T. B., & Fardis, M. N. (1996, June). Seismic response of infilled RC frames structures. In 11th World Conference on Earthquake Engineering (Vol. 23, p. 28).

PEER, Ground Motion Database NGA-West2, Pacific Earthquake Engineering Research Center, https://ngawest2.berkeley.edu/site , son erişim: Ekim 2021

SeismoMatch. (2021). Earthquake Software for Response Spectrum Matching. Earthquake Engineering Software, Seismosoft, Lombardiya, İtalya, 2021.

Sivri, M., Demir, F., & Kuyucular, A. (2006). Dolgu duvarlarının çerçeve yapının deprem davranışına ve göçme mekanizmasına etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10(1), 109-115.

TBDY2019. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

XTRACT. (2004). Cross-sectional analysis of structural components. Imbsen and Associates Inc., Sacramento.

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

UMAGD, (2023) 15(2), 361-370.

10.29137/umagd.1201413

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Post-İnsan, Ergonomi ve Tasarım: Yok-Yerde Tasarımın İmkânı Üzerine Bir Değerlendirme

Post-Human, Ergonomics and Design: An Evaluation on the Opportunity of Design in Non-Place

Damla Altuncu[1]

[1]*Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Pürtelaş Hasan Efendi Mahallesi, Meclis-i Mebusan Caddesi No:24, 34427 Kabataş-Beyoğlu/İstanbul, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 09/11/2022* ***Kabul / Accepted**: 20/01/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Öz

'Merkezsizleşme' düşüncesi, modernitenin insanı merkeze alan antroposantrizm anlayışına karşın, 20. yy'da ortaya çıkan post-modernizmin bir ürünüdür. Ergonomik tasarım ölçütleri, post-modern tasarımlarda 'kullanılamaz' hale gelmişlerdir. Çalışmada insandan bağımsız olan 'üst-modernite' ürünü yok-yer (non-lieu) tasarımları, kamusal alanda post-insan ve yeni mekân konusu özelinde tartışılmıştır. Bu ilişki, örnek bir mekân üzerinden araştırılmıştır. 'Yok-yerlerde, post-insan anlayışının gelişmesiyle kamusal alanda ergonomik ilkeler işlevsiz hale gelir' araştırmanın hipotezidir. Çalışmada, merkez-merkezsizleşme kavramları, post-insan, tasarım ve ergonomi konuları diyalektik bir yaklaşımla tartışılmıştır. Araştırma, bir mekânın ergonomik özelliklerini sosyolojik yapıyla ilişkilendirip tartışması nedeniyle açıklayıcıdır. Araştırmanın kapsamı, yok-yerleri temsilen 'The Terminal' (Terminal) filmindeki mekân ve mobilya görselleriyle sınırlandırılmıştır. Araştırmanın yöntemi, nitel araştırma için uygun olan dokümana dayalı içerik analizidir. Çalışmanın metodolojisi iki aşamalıdır. Birinci aşamada mevcut kavramlar incelenerek konuyla ilgili tanımlamalar karşılaştırılmıştır. İkinci aşamada ise filmde yer alan mekân ve mobilyalara ait görseller incelenmiştir. Sonuç olarak yok-yerde ergonomik ilkeler dahilinde insan ölçeğini merkeze alan mimari uygulamaların sınırlı olduğu ancak 'yer kurmak' amacındaki kullanıcıların, halen mevcut mekânı dönüştürme potansiyeline sahip oldukları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

"Ergonomi, Kamusal Mekân, Mekân Sosyolojisi, Kullanıcı, Post-Hümanizm, Tasarım"

Abstract

The idea of 'decentralization' is a product of post-modernism that emerged in the 20th century, despite the anthropocentrism of modernity that puts human in the center. Ergonomic design criterias have become 'unusable' in post-modern designs. In the study, 'upper-modernity' products-non-lieu designs, which are independent of human are discussed in terms of post-human and new space in public areas. The research discusses this relationship through a sample space. 'In non-places, with the development of post-human understanding, ergonomic principles in the public sphere become dysfunctional' is the hypothesis of the research. In the study, concepts of center-decentralization ideas are discussed with a dialectical approach within context of post-human design and ergonomics issues. The research is explanatory because it discusses the ergonomic features of a space with the sociological structure. The scope of the research is limited to visuals of space and furnitures in the movie 'The Terminal' which represents non-places. The research method is document-based content analysis, which is suitable for qualitative research. The study had two-stage methodology. In the first stage, the existing concepts were examined and the definitions of the subject were compared. In the second stage, the visuals of the interior space and furnitures in the movie were examined. As a result, it has been determined that architectural practices that center human scale within ergonomic principles in non-places, which are accepted as public spaces, are still limited but users who aim to 'build a place' have still a potential to transform the existing space.

Key Words

"Ergonomics, Public Space, Sociology of Space, Occupant, Post-Humanism, Design"

***Sorumlu Yazar:** damla.altuncu@msgsu.edu.tr*

1. Giriş

Modernitenin insanı merkeze alan antroposantrizm yaklaşımına karşıt şekilde farklı alanlarda gelişen 'merkezsizleşme' düşüncesi, üst-modernitenin bir özelliği olarak 20.yy'da ortaya çıkan post-modernizm anlayışının bir ürünüdür. Buna göre 'insani' ölçütlerinden kopan mekân tasarımı için, önceden belirlenmiş fiziksel özelliklerden söz edilememesi bir tasarım sorunu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu soruna çözüm üretebilmek için öncelikle mimari mekânın fiziksel özelliklerinin, 19.yy'dan başlayarak modernizm eksenli dönüşümünü incelemek gerekmektedir.

18.yy'da Aydınlanmayla başlayan süreçte yaşanan teknik/teknolojik gelişmeler, 19.yy'ın makinelerin çağı olmasına neden olmuştur. 19.yy'da Endüstri Devrimi sayesinde gelişen makinalaşmanın sağlamış olduğu olanaklar, günlük hayatta değişimin yaşanmasına neden olurken, aynı zamanda çalışma/yaşama şartlarını da etkilemiştir. Değişen şartlarla birlikte 'verimlilik' konusu, modernizmin gereği olarak makine-insan uyumunun öncelenmesi sayesinde önem kazanmıştır. Makine-insan uyumuyla verimliliğin (dolayısıyla üretkenliğin), arttırılması için mimari mekân ve fiziksel çevre özellikleri yeniden tartışılmaya başlanmış, insan bedenine has özelliklerle makinelerin entegrasyonu 'ergonomi' sayesinde sağlanmaya çalışılmıştır. Bu bağlamda ortaya çıkan mimari mekân ve mobilyaların, büyük bir sistemin küçük parçaları gibi görülen standardize insanın, antropometrik özellikleriyle uyumlu olarak tasarlanması gerektiği düşülmüştür.

Modernizmin temelinde yer alan antroposantrizm yaklaşımı dahilinde, ölçü ve ölçütler 19.yy'da giderek önem kazanırken standardize edilmiş boyutlar dahilindeki 'normatif insan' özelliklerine dayanarak öncüllerinden farklı mimari mekanlar tasarlanmıştır. Fabrikasyon üretime dayalı gelişen bu yenilikçi tasarım anlayışı sayesinde tasarlanan modern mekanlar, aynı zamanda insani özellikler, kullanıcı konforu, kullanım kolaylığı bakımından öncüllerinin eleştirisini de yapmaktadırlar. Buna göre tarih, gelenek, kültürel aktarım gibi standardize edilmesi zor olan özellikleri dışlayarak, idealize edilmiş modern insanın normatif fiziksel özelliklerini yücelten modern mekanlar, orijinallik bakımından öncüllerinden üstün görülmüşlerdir.

'Az çoktur' (Less is more) anlayışına indirgenemeyecek kadar geniş bir skalada değerlendirilmesi gereken modern mimari mekanlar; rasyonellik, üretkenlik, verimlilik gibi özellikleriyle tanımlanırken oluşan standart mekân anlayışı, 'prototip insan' dahilinde tek düzeleşmeye/tek tipleşmeye neden olmuştur. Bunun sonucunda, insan-makine etkileşimi yanında, farklı/çeşitli özelliklere sahip kullanıcıların, standardize edilmiş makine-mekânlara uyum problemleri ortaya çıkmıştır. Bu uyum problemlerinin giderilmesi için ergonomiden faydalanılmıştır.

Tarihsel bir olgu olarak 1970'li yıllara kadar süregelen modernizm düşüncesi, rasyonelliğin önerdiği tek tip gerçekliğin sorgulanmaya başlamasıyla birlikte yerini post-modernist anlayışa bırakmıştır. Modernizm eleştirisi olarak ortaya çıkan post- modern anlayış, 20.yy'ın ikinci yarısından sonra sorun olarak kabul edilen somut sonuçları bağlamında tartışılmıştır. Giddens, modernizmin meydana getirdiği sorunların eleştirisini 'mekân-zaman uzaklaşması' üzerinden yaparken (Giddens, 2010); Harvey ise 'mekân-zaman sıkışması' kavramsallaştırmasıyla post-modernizim ekseninde bir değerlendirme yapmıştır (Harvey, Postmodernliğin Durumu, 1997). Giddens'a göre zaman gibi soyut sistemlere duyulan güven, modernizmin sonuçlarından biridir. Böylece fiziksel mekân olarak tanımlanabilecek 'yer' kavramını zamandan bağımsız olarak düşünmek mümkün hale gelmektedir.

Zaman ve mekânın fiziksel özelliklerinden kurtulması, aynı zamanda insani ölçü ve ölçütlerin de önemsiz hale gelmesine neden olmuştur. Bu durumda antroposantrizm yaklaşımının temelini oluşturan insani özellikler de göz ardı edilebilmiştir. Harvey ise zaman ve mekânı insanın varoluşunun temel öğeleri olarak birbirinden ayırmadan tanımlamaktadır. Zaman-mekân algısında ya da bu kavramlardan birinde meydana gelen değişikliklerin etkisinin teknolojik imkanlarla birlikte sağlanan 'hız' (ya da Starobinski'nin (Starobinski, 2007) modernitenin özü olarak tanımladığı hızı oluşturan 'hareket' sayesinde gerilime neden olduğu ve bu gerilimin pek çok alanda görülebileceğini söylemektedir. Düşüncelerinde Lefebvre 'den (Lefebvre, Modern Dünyada Gündelik Hayat, 1998) etkilendiğini ve kavramsallaştırmalarının temeline kapitalist üretim/tüketim eleştirisini yerleştirdiğini bildiğimiz Harvey, mekânın maddi olarak nitelendirilen belirleyici fiziksel özelliklerinden yola çıkarak hızla değişim hareketinin neden olduğu 'belirsizleşme oranı' üzerinden bir sınıflandırma yapmaktadır (Harvey, 1973). Fiziksel özellikleri bakımından (modernizm eleştirisinde olduğu gibi) harekete uyum sağlamak için tek tipleşerek belirsizleşen mekânın, artık insan merkezli olmasına gerek kalmamıştır. Bu bağlamda Harvey'in 'mekânın belirsizleşmesi' sınıflandırmasını temel aldığımızda; 'insanın fiziksel mekândan ve zamandan kopmasıyla 'yer' tanımı muğlaklaşır, bununla birlikte kavramsal mekân anlayışı güçlenir' denebilir. Bu önermeye göre belirsizliğin artmasıyla 'yersiz' kalan insan, yeni bir mekân tanımına ihtiyaç duymaktadır. Post-modernizm anlayışıyla tasarlanmış, tek bir yerin ötesinde yerlerin kullanımı olarak nitelendirilebilecek bu yeni mekânda, insanın fiziksel çevreyle olan ilişkisi, kavramsal boyutta yeniden kurulmaktadır. Bu ilişkiyi yeniden kurarken bağlamın muğlaklaşması, nesne ve kavramların kullanıcı ve mekâna göre yeniden yorumlanması; Mark Augé tarafından geliştirilen 'yer-değiller' kavramsallaştırmasıyla tanımlanmıştır (Augé, Yer-değiller:Bir Üst Modernite Antropolojisine Giriş, 2021).

Fransız etnolog ve antropolog Marc Augé, 1992 yılında yazdığı 'Yer-Değiller-Bir Üst-Modernite Antropolojisine Giriş' adlı eserinde, mekân kavramını modernizm-postmodernizm bağlamında ve farklı tanımlar özelinde tartışmıştır. Yazar, "mekân terimi kendi içinde

yer teriminden daha soyuttur" (s:94) diyerek, içiçe geçmiş olan bu iki kavram arasında diyalektik bir inceleme yapmış; kavramlar arasındaki farklılıkları ortaya koymaya çalışmıştır. Türkçe 'ye 'yer-değiller' olarak çevrilen bu ikili kavram (non-lieu/yok-yer), birbirini tamamlayan ama ayrı gerçeklikleri olan kavramlardır. (Araştırmada tercih edilen yok-yer tanımının seçilme nedeni literatür bölümünde açıklanmıştır.) Bu kavramlar; belirli amaçlar doğrultusunda 'tesis' edilen yerler (lieu) ve kullanıcıların bu mekanlarla kurdukları ilişkinin sınırlandırılması (non) olarak açıklanabilir. Her ne kadar mekanlar, kullanıcısı için tesis edilmiş olarak görülse de post-modern dönemde hızın neden olduğu zamansızlığa bağlı olarak mekân ve insan etkileşimi sınırlıdır. Çünkü, ben ve ötekiler arasındaki ilişkiyi düzenleyen mekânın işlevi artık, hareketi sürdürerek mekânın kullanıcısından öte 'bütüne-otoriteye-mevcut erke' dolaylı yoldan hizmet etmektir. Bu bağlamda kamusal ve yarı kamusal mekanlarda post-modern dönemde gözle görülür hale gelen hareket-hız faktörü, transit geçiş mekanları olarak nitelendirilebilecek olan terminaller, havalimanları, otoyollar, hipermarketler, alışveriş merkezleri vb. gibi mekanların tasarımında antroposantrizm temelli insani ölçütlerin öneminin giderek azalmasına neden olmuştur. Augé, bu yeni mekân anlayışını yeniden tanımlayarak; havalimanları, otoyollar, hipermarketler, otoparklar gibi kamusal/yarı kamusal mekanlar ve diğer transit geçiş-kullanım mekânlarını 'yok-yerler' olarak nitelendirmiştir. Bu tür mekanlarda, mekân ve kullanıcı arasındaki etkileşim, hız ve hareketten kaynaklanan nedenlerle kurulamadığı gibi 'yaşantı' da sınırlandırıldığı için aidiyet hissi gelişmemektedir.

Kullanıcıların normatif özelliklerine göre tasarlanan yok-yerlerde; yaşantının olmaması/ya da sınırlandırılması (Foucault, 1995) kullanıcı konforu, mekânsal aidiyet vb. faktörlerin göz ardı edilmesine dolayısıyla mekân-mobilya-insan uyumunu ortaya koyan ergonomik ilkelerin öneminin giderek azalmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda araştırmanın hipotezi, 'post- modern mekanlar olan yok-yerlerde, post-insan anlayışı geliştikçe kamusal alanın ergonomik ilkeleri işlevsiz hale gelir' olarak belirlenmiştir. Yeni bir kavram olan yok-yerlerin literatürde sosyoloji-ergonomi-mimari bakımdan karşılaştırmalı olarak yeterince araştırılmadığı görülmüştür. Bu bakımdan çalışma; yeni kavramsal tanımlamalara dikkati çekmek, mevcut mimari uygulamaları sistematik biçimde incelemek, kamusal mekânı ergonomik ilkeler-post-insan anlayışı ve sosyolojik yapı ile ilişkilendirmek bakımından açıklayıcı bir araştırmadır. Çalışmada, merkez-merkezsizleşme konusu, post-insan ve ergonomi konuları dahilinde diyalektik bir yaklaşımla tartışılmıştır. Çalışmanın amacı, insan ölçeğinden bağımsız olarak geliştirilen 'üst- modernite' ürünü yok-yer tasarımlarının, kamusal mekanlar kapsamında ergonomik ilkeler bakımından post-insan ve yeni mekân ilişkisi üzerinden tartışılmasıdır. Araştırmanın kapsamı, yok-yerleri temsilen 2004 yapımı 'The Terminal' (Terminal) filmindeki mekân ve mobilya görselleriyle sınırlandırılmıştır. Çalışma için seçilen araştırma nesnesi, araştırma kolaylığı sağlaması bakımından ve nitel araştırmaların doğası gereği derinlemesine bir inceleme yapılmak istendiği için tercih edilmiştir. Film sahnelerinden elde edilen görsellerin; tasarım, malzeme, estetik vb. özellikleri kapsam dışında bırakılmış; çalışmada yok- yerlerin kavramsallaştırılması görsel göstergelere dayandırılarak yapılmaya çalışılmıştır.

Araştırmanın yöntemi, nitel araştırma yöntemlerinden dokümana dayalı içerik analizidir. Çalışmanın metodolojisi iki aşamalıdır. Birinci aşamada mevcut araştırmalar incelenerek konuya içkin kavramlara ait tanımlamalar güncel literatürde yer alan kaynaklar referans alınarak netleştirilmiştir. İkinci aşamada ise 'The Terminal' (Terminal) filminde yer alan mekân ve mobilyalara ait görsel dokümanlar, teorik altyapıya uygun biçimde içerik analizi yöntemiyle değerlendirilmiştir.

2. Kaynak Araştırması

Yok-yer kavramı ilk defa, Mark Augé tarafından yazılan 'Non-Lieux, Introduction à une Anthropologie de la Surmodernité' isimli kitapta yer almıştır. Éditions du Seuil tarafından 1992 yılında yayımlanan kitap, 1997 yılında Kesit Yayıncılık'tan çevirmen Turhan Ilgaz tarafından, 'Yer-olmayanlar, Üst modernliğin Antropolojisine Giriş' başlığıyla Türkçe 'ye çevrilmiştir (Augé, Yer-olmayanlar, Üst Modernliğin Antropolojisine Giriş, 1997). Orijinal eser, Ergün A. Akça ve Arbil Ötkünç tarafından tekrar çevrilerek, 'Yok-yerler, Üst modernliğin Antropolojisine Giriş' başlığıyla Daimon Yayınları tarafından 2016 yılında yeniden yayımlanmıştır (Augé, Yok-yerler, Üst Modernliğin Antropoljisine Giriş, 2016). Bu çalışmada ana kaynak olarak kullanılan eser ise Ömer Kemal Buhari çevirisiyle Nisan 2021 yılında İnsan Yayınları'ndan çıkan 'Yer-Değiller: Bir Üst-Modernite Antropolojisine Giriş' olarak belirlenmiştir. Ana kaynak olarak bu eserin seçilmesinde, eserin yeni tarihli bir yayın olmasının yanısıra çevirmenin açıklayıcı notları etkili olmuştur.

Bu çalışmada 'non-lieu' (yok-yer) kavramının Türkçe ifadesinde, Turhan Ilgaz'ın yaptığı ilk çeviride kullandığı gibi 'yer- olmayan' sözcüğü ve Ömer Kemal Buhari'nin kullandığı 'yer-değiller' sözcükleri yerine, Ergün A. Akça ve Arbil Ötkünç çevirisinde güncellenen 'yok-yer' kavramı tercih edilmiştir. Bunun nedeni; Fransızcadaki 'non' ön ekinin Farsça 'na' ekine anlam olarak benzerlik gösterdiğinin düşünülmemesidir. Bu bağlamda, 'non' ekinin 'olmayan-değil' gibi olumsuz bir anlam içermediği düşünülmektedir. Yere atfedilen değerlerin bulunmadığı fiziksel mekanlar, 'non' olumsuzluk eki ile ifade edilemeyecek kadar nötr olmaları nedeniyle de yok-yer tanımı kullanılmıştır. Bu düşünceye paralel olarak, Türkçe'nin önden eklemeli bir dil olmaması ve kavramın Türkçeleştirilmeden orijinal kalması bakımından yeni bir tanımlama olan 'yok-yer' kavramı, çalışmada tercih edilmiştir.

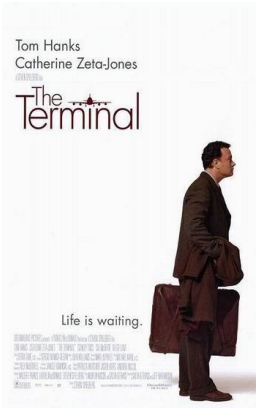
'Yok-yer' sözcüğü literatürde, post-modernizm anlayışı dahilinde bağlamdan kopuş, fiziksel mekânın muğlaklaşması ve insani ölçütlerden uzaklaşma gibi anlamlar dahilinde soyut özellikleri ölçüt alınarak incelenmiştir. Bu kavramın kaynağını, yere bağlılık üzerinden Norberg-Schulz oluşturmuştur. Norberg-Schulz'a göre insan, var olduğu günden itibaren 'varlığının özünü gösteren' yerler oluşturmaya çabalamaktadır (Norberg-Schulz, 1982). Bu bağlamda fiziksel mekân olan yer ile kullanıcısının organik bağı, yerin ruhuna

(genius loci) bağlanabilir. Bu kavramsallaştırmada yere bağlılıkta tarihsellik göz ardı edilmezken, sabitlik/stabilite ön plana çıkarılmaktadır.

Yer konusunu sabitlik üzerinden tartışan Heidegger ise konuya işlevsel bir boyuttan bakmaktadır. Heidegger'in yer kavramsallaştırmasına göre 'ikamet' olarak nitelendirilen fiziksel mekân, insanın kaos içinde, yer-gök arasında kendi yerini bilmek için belirlediği bir sabitlerden biridir. Heidegger'in pozitivizm temelli bu fikrinde insan barınması için gereken mekânın yapısal işlevi, mekanik olarak nicel özellikler üzerinden değerlendirildiği için tarihsellik gibi nitel özellikler aranmamaktadır (Heidegger, 2002). Bu noktada mekânsal aidiyet, kişiselleştirme, kullanıcı özellikleri vb. gibi konular, 'bütünlük' düşüncesi içinde erozyona uğradığı için normatif değerler üzerinden standardize insan için geliştirilmiş yapma çevreler makbul kabul edilmiştir (Mace, Hardie, & Place, 1991). Bu noktada sabit olmak ve sahip olmak arasında bir çelişki meydana gelmektedir. Sabit olmak için edinilen mekânda sahip olmak, kişiselleştirmek, alan işaretleyerek sınır çizmek gibi insani ihtiyaçlara sınırlı olarak izin verilmesine rağmen, kamusal alanlarda bunun mümkün olmadığı söylenebilmektedir.

3. Materyal ve Yöntem

Araştırmanın kapsamı, yok-yerleri temsilen 'The Terminal' (Terminal) filmindeki mekân ve mobilya görselleriyle sınırlandırılmıştır. Dreamworks Pictures ve Amblin Entertainment tarafından çekilen, Jeff Nathanson ve Sacha Gervasi'nin senaryosunu yazdığı, Steven Spielberg'in yönettiği, Tom Hanks (Viktor Navarski), Catherine Zeta-Jones (Amelia) ve Stanley Tucci (Frank Dixon)'nin oynadığı 2004 yapımı 'The Terminal' (Terminal) filmi, mekân-yer ve yer olmayan tanımları üzerinden ergonomik ilkeler ekseninde araştırma nesnesi olarak seçilmiştir. (Bkz: Şekil 1).



Şekil 1. Terminal Film Afişi (Anonim, 2022)

Terminal filminde, yersiz-mekânsız/evsiz-vatansız (Krakozya isimli bir ülke gerçekte bulunmamaktadır) bir insanın üst- modernite mekanlarından biri olarak kabul edilen New York'un John F. Kennedy Havalimanında yaşantısını sürdürme çabası, günlük yaşam pratikleri üzerinden anlatılmaktadır. Yok-yer olarak nitelendirilen havalimanında bir insanın yer kurma potansiyeli, filmde konu olarak



Şekil 2. Mehran Karimi Nasseri'nin havalimanındaki görüntüsü (Associated Press, 2022)

işlenmiştir. 1988'de mülteci kâğıtlarının çalınmasından dolayı 2006 yılına kadar (toplam 18 yıl) Charles de Gaulle Havalimanı'nın Birinci Terminali'nde yaşayan İranlı mülteci Mehran Karimi Nasseri'nin hikâyesinden esinlenilen filmde, Doğu Avrupa'daki Krakozya adlı bir ülkeden New York'a gelen Viktor Navorski'nin (Tom Hanks) öyküsü anlatılmaktadır. (Bkz: Şekil 2).

Krakozya 'da askeri darbe olması nedeniyle Amerika'nın, ülkesini bağımsız bir ülke olarak tanımamasına bağlı olarak vatansız kalan baş kahraman Viktor, yok-yerde sıkışıp kalmıştır. Yaşantısını burada sürdürmeye mecbur kalan kahramanın, otoriteyi temsil eden güvenlik müdürü Frank Dixon (Stanley Tucci) ve norm dahilinde makbul kullanıcıyı temsil eden hostes Amelia Warren (Catherina Zeta-Jones) ile diyalogları devlet-vatandaş, tasarımcı-kullanıcı ilişkisinin sorgulanması bakımından incelenmeye değerdir.

Kişiselleştirmeye, sınır çizmeye izin verilmeyen bir mekânda insanın var olmasının Norberg-Schulz'un görüşüne göre varlığının özünü gösteren yerler oluşturarak sahiplenmek istemesi (Norberg-Schulz, 1982) filmde tekrar eden vurgulardandır. Bununla birlikte norm-dışı olarak kabul edilen aktörlerin otorite tarafından baskı altında tutularak kontrol edilmesine yönelik taktik ve stratejiler de filmde yer alan diğer unsurlardandır. Toplumsal aktör ve otorite arasında oluşan bu gerilimin mekân kurma pratikleri üzerinden tartışıldığı filmde, yumuşak güç (soft power) (Ovey & White, 2006) denilebilecek otorite temelli uygulamaların ve bu uygulamalar karşısında geliştirilen toplumsal direnç görsellerle somutlaştırılmıştır.

Araştırma materyali olarak filme ait görseller, farklı dijital veri tabanları üzerinden elde edilmiştir. Elde edilen görsellerde fark edilen sosyo-kültürel ve ekonomik farklılıklar çalışmanın odağını değiştirmemek bakımından kapsam dışında bırakılmıştır. Çalışmada araştırma yöntemi olarak mevcut durumun gözden geçirilmesi için nicel araştırma yöntemlerinden tarama modeli tercih edilmiştir. Betimleyici çalışmanın araştırma evrenini oluşturmak için tercih edilen genel tarama modeli, sistematik derleme sonucunda genellenebilir bir yargıya varmak bakımından çalışma için uygun görülmüştür.

Çalışmada, belge olarak kabul edilen 'The Terminal' (Terminal) filmindeki mekân ve mobilya görsellerinin değerlendirilmesi için; görsellere ulaşma, görsellerin özgünlüğünün kontrol edilmesi ve verilerin analiz edilmesi aşamaları izlenmiştir. Belgelerin toplanması aşamasında, veri kaynaklarına tümevarım yöntemi dahilinde ulaşılmaya çalışılmıştır. Dijital veri tabanlarında yer alan filme ait görsellerin kaynak taramasında yararlanılan medya setleri, internet arama motorlarının görsel arama bölümüne, 'terminal, yok-yer, havalimanı' ve 'ergonomi, kamusal mekân, mekân sosyolojisi, post-modernizm, post-insan' gibi anahtar kelimeler yazılarak karşılaştırmalı biçimde araştırılmıştır.

4. Bulgular ve Değerlendirme

Yapılan araştırma sırasında 'The Terminal' (Terminal) filminden elde edilen görsellere ait gözlemsel sonuçlar, teorik altyapıya uygun biçimde içerik analizi yöntemiyle değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme neticesinde; yok-yerlerin 'yer' olarak nitelendirilmelerinin kullanıcıların katılımı doğrultusunda mümkün olduğu anlaşılmıştır. Kullanıcıların bu dönüşümü sağlamak için ergonomik ilkeleri yeniden kullandıkları gözlemlenmiş, bununla birlikte merkezi insan olan yapıların yere dönüşme potansiyellerinin daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Bu bağlamda mekânsal deneyim arttıkça aidiyet hissinin de artarak mekân kurma pratiklerinin profesyonelleştiği söylenebilir. (Bkz: Şekil 3, Şekil 4).



Şekil 3. Havalimanında Yatma Eylemi (Telerama, 2013)



Şekil 4. Havalimanında Mekân Kurma (Ziza, 2015)

Yok-yerde ergonomik ilkelerin değerlendirilmesi için yapılan gözlem sonucunda terminal binasının tamamen işlevselliğe yönelik olarak hareket/hız önceliğine göre tasarlandığı söylenebilir. Kullanıcıların havalimanı dahilinde eylemlerinin programlandığı, güvenlik amacıyla sürekli gözlemlendiği ve belirli bir mekân organizasyonu dahilinde sürekli hareket halinde olmalarının sağlandığı görülmüştür. (Filmin büyük çoğunluğu Montréal-Mirabel Uluslararası Havalimanı'nda çekilmiştir. Ancak filmde mekânın New York'un John F. Kennedy Havalimanı olduğu belirtilmektedir.) Bu durumda fiziksel konfor koşullarını tam olarak sağlanamadığı gibi mekân-kullanıcı uyumundan da söz edilememektedir. Öyle ki transit olarak geçmek için tasarlanan mekânda (filmde belirtildiği üzere New York'un John F. Kennedy Havaalanı) 'durmak' zorunda olan kullanıcının insani ihtiyaçlarından biri olan dinlenmek için bile mekânı yeniden düzenlemesi gerekmiştir. Çünkü yok-yerde yatmak normatif kullanıcılar için tasarlanmış bir eylem değildir. Bununla birlikte kişisel bakım ve temizlik için de benzer sınırlamalar getiren düzenlemelerin yapıldığı ancak bu sınırların mekânın kullanım süresi arttıkça aşıldığı söylenebilir. (Bkz: Şekil 5, Şekil 6)



Şekil 5. Havalimanında Kişisel Bakım (Telerama, 2013)



Şekil 6. Bakım Eyleminin Gelişimi (Guttridge & Sharman, 2022)

Kullanıcıların yaşantılarını sürdürülebilmek için beslenme gibi temel ihtiyaçlarını karşıladıktan sonra eylemlerini geliştirmek için mekân tasarımına aykırı yeni düzenlemeler yaptıklarından söz edilebilir. Bu durumda, yemek yeme ihtiyacının giderilmesi için tasarlanan bir mekânın ergonomik özellikler bakımından optimum değerlerde olması yeterli olurken, hız/hareket şartının ortadan

kalkmasıyla birlikte fiziksel konfor koşullarının tekrar sorgulandığı söylenebilir. Tüm bu çevresel şartlar altında fiziksel konforun sağlanmasında etkili olan faktör, hız ve harekete bağlı zamansızlık probleminden kaynaklanmaktadır. Zaman problemi aşıldığında mekânda ergonomik kriterlere verilen önemin arttığı, filmden elde edilen görsellerde gözlemlenmiştir (Bkz: Şekil 7, Şekil 8)



Şekil 7. Havalimanında Yemek Yeme (Kılıç, 2020)



Şekil 8. Havalimanında Yemek Yeme Eyleminin Gelişimi (Amblin Partners, 2023)

Yok-yerde oluşan yakın çevredeki boyut sorunları da filmde dikkati çeken bir diğer unsurdur. İnsani eylemlerin gerçekleştirilmesinin yanında kontrolün ve güvenliğin de sürekli sağlanmaya çalışıldığı mekanlarda görmek ve görülmek önemli bir sorun haline gelmiştir. Bu tür mekanlarda yerin belirleyiciliğinin ortadan kalkmasıyla 'güvenlik' diğer tüm bileşenlerden daha önemli hale gelmiştir (Foucault, 1995). Bu durumda mekânın kullanıcısı güvenlik unsurunu kullanarak mekanla ilişki kurmaya başlamış, güvenlik unsurları mekanla kullanıcısı arasında bir iletişim aracına dönüşmüştür. (Bkz: Şekil 9, Şekil 10).



Şekil 9. Havalimanında Görülmek (Guttridge & Sharman, 2022)



Şekil 10. Havalimanında Görülmemek (Guttridge & Sharman, 2022)

Yok-yerler, post-modernizmin mimari gerçekliğidir. Yok-yerler, içinden geçilen, deneyimlenen, fonksiyonlarını yerine getiren ancak bağ kurulamayan, benimsenmeyen mekanlardır. Anonim olarak nitelendirilebilecek bu mekanlarda karmaşa, kaos, hız, hareket vazgeçilmez unsurlardır. Bununla birlikte, yok-yerler, diğer tüm mekanlardan çok daha organize, kuralcı, sistematik ve güvenliklidirler. Bu ikilik durumu, kullanıcıların bireysel ölçekte kimliklerini ortaya koymaya engel olurken, günlük yaşantılarını da kolaylaştırmak yerine zorlaştırmaktadır. Yok-yerlerin 21.yy'ın temel konusu olan tüketim unsuru üzerinden kurgulanması sonucu ortaya çıkan bu kimliksizlik durumu, merkezden insani değerlerin uzaklaşmasıyla ergonomik kriterler bakımından olduğu kadar insani ihtiyaçlar bakımından da yetersizliklere neden olmaktadır (Lefebvre, 1996). Bu durum yok-yerlerin benimsenmemesiyle birlikte birlikte tarihsellikten kopmasına ve bir ürün ya da nesne gibi hızla tüketilmesine yol açmaktadır (Urry, 1999).

5. Sonuç ve Tartışma

Film dahilinde modernizm ve post-modernizm arasındaki farklılıklar prototipleştirilmiş post-insan özellikleri üzerinden somutlaştırılmıştır. Bu bağlamda post-insanın modernizmdeki gibi mekânsal olana ihtiyacının devam ettiğinden söz edilebilir. Ancak bu ihtiyacın barınak sağlamanın ötesinde aidiyet ihtiyacına dönüştüğü anlaşılmaktadır. Bu ihtiyacın farklı ölçeklerdeki yansımaları, yok-yerde yatak yapmaktan, vatana ulaşma isteğine kadar görülebilmektedir.

Filmin gerçek bir hikâyeden uyarlanması yok-yerlerin mekân organizasyonları bakımından her ne kadar işlevsel olsa da gelecekte tüm toplumsal aktörler için önemli bir soruna dönüşebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte kapitalistleşmiş ve kapitalistleşmekte olan toplumlarda yok-yerlerde bulunan toplumsal aktörlerin mekân ve birbirleriyle kurdukları ilişkilerin de mimari mekân ve sosyoloji bakımından yeni problemleri beraberinde getirebileceği söylenebilir. Tarihsel ve sosyolojik köklerinden kopan mekanların yer olma özelliklerini kaybettikleri gibi tarihsel unsurların da beraberinde zaman içinde silineceği bir gerçektir.

Yok-yerler, Augé tarafından 'yerin ne olmadığı' sorunsalına dayandırılarak tanımlanmıştır. Benzer biçimde Terminal filminde de aynı sorunsalın konu edildiği anlaşılmıştır. Yerellik ve evrensellik konularını içeren 'yer' konusu, Augé'nin tanımlamaları ve Terminal filmi görselleriyle incelendiğinde mekânın zaman ve kullanıcısı ile ilişkisellik boyutunun toplumsal ve bireysel bakımdan halen önemli olduğu anlaşılmıştır. Kullanıcıların bireysel bakımdan varlıklarını kimlik üzerinden ifade etme ihtiyaçları, yok-yerde kişiselleştirme çabalarının devam edeceğini göstermektedir. İlk küresel vatandaş olduğu varsayılan Mehran Karimi Nasseri'nin deneyimleri bu bakımdan tüm kullanıcılar için benzer olacaktır. Bu bağlamda Augé'nin işaret ettiği sorun olan; antropolojinin, zamansız, değişmeyen, 'bozulmamış toprakta kök salmış', yerliler tarafından arkaik ve egzotik ritüellerle devam ettirilen günlük yaşantısının sürdürülmesi, romantik bir vizyondan öteye gidemeyecektir. Bununla birlikte, modernizmin 'bütünlük' arzusunun da her ne kadar rastgele seçilmiş bireyler, eserler, yerler ve uygulamalar tarafından çeşitli şekillerde temsil edilse bile cazibesini kaybederek parçalandığı söylenebilir. Böyle bir ortamda ergonomik kriterler gibi sabitlerin varlığından söz etmek yerine, daha popülist bir yaklaşımla 'herkes için uygun' kriterler belirlemek tasarımcılar tarafından tercih edilmektedir.

Sonuçta; çalışma için hipotez olarak belirlenen ‘post-modern mekanlar olarak kabul edilen yok-yerlerde, post-insan anlayışı geliştikçe kamusal alanda ergonomik ilkeler işlevsiz hale gelir’ cümlesi sınanmış; kamusal alan olarak kabul edilen yok-yerlerde ergonomik ilkeler dahilinde insan ölçeğini merkeze alan mimari uygulamaların sınırlı olduğu ancak ‘yer kurmak’ amacındaki kullanıcıların, mevcut mekânı ergonomik ilkeler dahilinde dönüştürme potansiyeline sahip oldukları belirlenmiştir.

Konu ile ilgili gelecek araştırmaların metodolojik ve teorik bakımdan geliştirilerek, literatürün zenginleştirilmesi gerekmektedir. Böylece antropolojik ötekileştirme türleri ve yeni mekân-mimarlık konularına tasarım perspektifinden bakmak, yer ve mekân kavramlarını yeniden sorgulamamızı sağlayacaktır. Bununla birlikte artan sayıdaki yok-yerler için gelecek yıllarda üretilecek tasarım politikalarıyla daha fazla toplumsallaşmayı sağlamak için insan merkezli tasarım kavramının, ergonomi/mimari mekân ve sosyolojik boyutlarının yanında, sosyo-kültürel özellikler bakımından da incelenmesi gerektiği anlaşılmıştır. ‘Modern olmak ve insan olmak’ konularını farklı disiplinlerin bakış açılarına göre karşılaştırmalı olarak birlikte incelemek, gelecekte yapılacak kültürel çalışmalara da katkı sağlayacaktır.

Referanslar

Amblin Partners. (2023, 1 1). Amblin. The Terminal: https://amblin.com/movie/the-terminal/ adresinden alındı

Anonim, B. P. (2022, 1 2). Terminal Filmi Galerisi. beyazperde: https://www.beyazperde.com/filmler/film-40882/fotolar/ adresinden alındı

Associated Press. (2022, 11 12). Iranian man who inspired Steven Spielberg film 'The Terminal' dies at Paris airport. nbc news: https://www.nbcnews.com/news/us-news/iranian-man-inspired-steven-spielberg-film-terminal-dies-paris-airport-rcna56917 adresinden alındı

Augé, M. (1997). Yer-olmayanlar, Üst Modernliğin Antropolojisine Giriş. İstanbul: Kesit.

Augé, M. (2016). Yok-yerler, Üst Modernliğin Antropoljisine Giriş. İstanbul: Diamon.

Augé, M. (2021). Yer-değiller:Bir Üst Modernite Antropolojisine Giriş. İstanbul: İnsan.

Foucault, M. (1995). Dicipline and Punish: The Birthof the Prison. New York: Vintage.

Giddens, A. (2010). Modernliğin Sınırları. İstanbul: Ayrıntı.

Guttridge, R., & Sharman, L. (2022, 6 28). Man trapped in airport for 2 weeks with no way out just like The Terminal film. Mirror co uk: https://www.mirror.co.uk/news/world-news/dad-trapped-paris-airport-hell-27596640 adresinden alındı

Harvey, D. (1973). Social Justice and the City. London: Edward Arnold.

Harvey, D. (1997). Postmodernliğin Durumu. İstanbul: Metis.

Heidegger, M. (2002). Hümanizm Üzerine Mektup, Hümanizmin Özü. İstanbul: İz.

Kılıç, Ş. (2020, 1 1). Starbucks Bardaklarını Adeta Gözümüze Sokan 8 Dizi ve Film. Webtekno: https://www.webtekno.com/game-of-thrones-starbucks-bardaklarini-adeta-gozumuze-sokan-x-dizi-ve-film-h68236.html adresinden alındı

Lefebvre, H. (1996). Right to the City, Writtings on Cities. New York: Blackwell.

Lefebvre, H. (1998). Modern Dünyada Gündelik Hayat. İstanbul: Metis.

Mace, R., Hardie, G. J., & Place, J. P. (1991). Accessible Environments: Towards Universal Design. New York: Von Nostrand Reimhold.

Norberg-Schulz, C. (1982). Genius Loci-Towards a Phenomenology of Architecture. New York: Rizolli.

Ovey, C., & White, R. (2006). The European Convention on Human Rights. New York: Oxford Univercity.

Starobinski, J. (2007). Aynada Melankoli. İstanbul: Dost.

Telerama, V. (2013, Eylül 6). Le Terminal un film de Steven Spielberg. vodkaster telerama: https://vodkaster.telerama.fr/films/le-terminal/10248 adresinden alındı

Urry, J. (1999). Mekanları Tüketmek. İstanbul: Ayrıntı.

Ziza, J. (2015, 9 7). Le terminal, de Steven Spielberg. le coin des critiques cine: https://lecoindescritiquescine.com/les-critiques-retro/le-terminal-de-steven-spielberg/ adresinden alındı.

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

UMAGD, (2023) 15(2), 371-377.

10.29137/umagd.1213570

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Kompozit Roket Yakıtının Yanma Hızı Üzerine Ortam Basıncının ve Başlangıç Sıcaklığının Etkileri

Effects of Ambient Pressure and Initial Temperature on the Burning Rate of Composite Rocket Propellant

Salih Uğur Bayça[1], Murat Demir[2]

[1]Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 71450 Yahsihan/Kırıkkale, TÜRKİYE
[2]Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Savunma Teknolojileri, 71450 Yahşihan/Kırıkkale, TÜRKİYE

***Başvuru/Received**: 06/12/2022* ***Kabul / Accepted**: 31/01/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Öz
Kompozit roket yakıtı kullanan roket motorları, uzun süre depolama yapılabilir ve her an ateşlemeye hazır olduğu için askeri uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu çalışmada, kompozit roket yakıtının başlangıç sıcaklığı ve ortam basıncın yanma hızı üzerine etkileri incelenmiştir. Numunenin yanma ısısı, kapalı bomba kalorimetre ile belirlenmiştir. Yanma hızı MIL–STD–286C standardına göre 241, 294 ve 343 K sıcaklıklarda ve strand burner cihazı kullanılarak tespit edilmiştir. Kompozit roket yakıtının yanma hızı ortam basıncının artması ile yanma hızı artmıştır. Yanma odasının başlangıç sıcaklığının artması ile yanma hızının arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler
"Katı roket yakıtı, Kompozit roket yakıtı, Yanma hızı, Yanma ısısı, Strand burner"

Abstract
Rocket engines using composite rocket propellant are preferred in military applications because they can be stored for a long time and are ready to fire at any time. In this study, the effects of the initial temperature and ambient pressure of the composite rocket propellant on the burning rate were investigated. The combustion heat of the sample was determined with a closed bomb calorimeter. Burning rate was determined according to MIL–STD–286C standard at 241, 294 and 343 K temperatures and using a strand burner. Burning rate of composite rocket propellant increased with increasing ambient pressure. It was determined that the burning rate increased with the increase in the initial temperature of the combustion chamber.

Key Words
"Solid rocket propellant, composite rocket propellant, burning rate, combustion heat, strand burner"

1. Giriş

Roketin performansı, roket yakıtının yanma hızı ile orantılıdır. Yanma hızının artması ile roketin performansı da artmaktadır. Yanma hızı, belirli bir ortam basıncında ve başlangıç sıcaklığında, yakıt malzemenin serbest yüzeyine dik olarak birim zamanda alev yüzeyinin kat ettiği mesafe olarak tanımlanır. Katı roket yakıtları, homojen katı roket yakıtları ve heterojen katı roket yakıtları olarak iki gruba ayrılmaktadır.

1.1. Homojen katı roket yakıtları

Homojen katı roket yakıtları hem oksitleyici hem de yakıt aynı malzeme olarak içerebilir.

***Sorumlu Yazar: salihbayca@gmail.com**

Homojen katı roket yakıtlarının üç farklı türü bulunmaktadır.

- Tek bazlı (Single base)
- Çift bazlı (Double base)
- Üç bazlı (Triple base)

Tek bazlı roket yakıtları majör bileşen olarak Nitroselüloz (NC) içermektedir. Çift bazlı roket yakıtları majör bileşen olarak nitroselüloz (NC) ve nitrogliserin (NG), patlayıcı olmayan plastikleştirici, stabilizer, balistik modifiye gibi malzemeler içermektedir. Bu yakıtlar ekstrüzyon ile üretilirler. Üçbazlı roket yakıtları 3 farklı patlayıcı malzeme nitroselüloz, nitrogliserin ve nitro-guanidin içermektedir (Varghese ve Krishnamurthy, 2017). Çift bazlı katı roket yakıtının yanma ısısını 880 cal/g ve 100 bar basınçta yanma hızını 10,30 mm/s olarak rapor etmişlerdir (Yaman vd., 2014)

1.2. Heterojen katı roket yakıtları

Heterojen katı roket yakıtları, kompozit katı roket yakıtları olarak da bilinmektedir. Heterojen katı roket yakıtları; yakıt malzemesi, oksitleyici malzeme, bağlayıcı malzeme ve katalizör malzemeleri içermektedir. Kompozit roket yakıtları (propellant), amonyum perklorat (AP), alüminyum metal tozu (Al), sıvı Hydroxyl Terminated PolyButadiene (HTPB) ve Fe_2O_3 karışımı ile hazırlanır.

Amonyum perkloratın termal ayrışma özellikleri, kompozit katı yakıtların yanma davranışıyla yakından ilgilidir. Yakıt olarak en yaygın amonyum perklorat (AP) ve alüminyum metal tozları kullanılmaktadır. Amonyum perklorat (AP) hem yakıt hem de oksitleyici olarak görev yapmaktadır. Genellikle, amonyum perklorat, potasyum perklorat, amonyum nitrat gibi inorganik oksitleyiciler kullanılmaktadır. Kompozit roket yakıtı olarak amonyum perklorat (AP) tercih edilmesinin nedenleri i) yüksek oksijen içeriğine sahip olduğu için oksit sağlayıcıdır, ii) yanma sırasında katı kalıntı vermediği için verimi yüksek bir yakıttır. Amonyum perklorat (AP) kompozit roket yakıtlarının birçoğunun içeriğinde bulunan bir kristal oksitleyicidir. Amonyum perkloratın tane boyutu yanma hızını değiştirmektedir. Örneğin 3–15 µm tane boyutlu amonyum perkloratın yanma hızı 200–300 µm tane boyutlu amonyum perkloratın yanma hızının iki katıdır. Cohen and Strand (1982) %73 AP içeren kompozit roket yakıtının yanma hızını 5, 20 ve 200 µm tane boyutlu AP malzemeleri karşılaştırmıştır. AP tane boyutu çok küçük (5 µm) iken yüksek yanma hızı elde edilirken büyük tane boyutlu (200 µm) AP kullanıldığı zaman yanma hızının düşük olduğunu rapor etmişlerdir. Bastress (1961) 20 µm tane boyutlu AP ile yüksek yanma hızı ve 200 µm tane boyutlu AP ile düşük yanma hızı oluştuğunu belirtmişlerdir. Amonyum perkloratın tane boyutu azaldıkça yanma hızı artmaktadır. Enerjiyi artırmak için alüminyum metal tozu (Al) gibi yakıtlar (propellant) kompozi katı roket yakıtlarına eklenir. Kompozit katı roket yakıtları alüminyum metal tozu içermektedir. Çünkü alüminyum metal tozu roketin özgül itme kuvvetini artırır ve alüminyumun yanması sonucu yanma odasında yüksek enerji açığa çıkar. Alüminyum tozu yandığı zaman Al_2O_3 ürüne dönüşmektedir. Bu nedenle, roket egzozundan alümina tozu çıkmaktadır. Jayaraman vd. (2009) alüminyum tane boyutu mikometre yerine nanometre boyutunda olduğu zaman yanma hızı iki katına çıktığını bulmuşlardır. Zhang vd. (2014) kompozit roket yakıtına nano alüminyum eklendiği zaman roket yakıtının yanma hızının artığını belirtmişlerdir. Kompozit katı roket yakıtları bileşiminde bağlayıcı malzeme olarak organik polimerler poliester, polisülfit, ploivinil klorür, poliüretan ve polibutadien kullanılmaktadır. Ayrıca, hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB) tipik bir polimer matristir ve düşük camsı geçiş sıcaklığı ve yüksek gerilme mukavemeti gösterdiğinden, kompozit katı roket yakıtlarında bir bağlayıcı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Kompozit roket yakıtında bulunan HTPB bağlayıcının miktarı yanma hızını önemli ölçüde etkilemektedir. Kompozit roket yakıtında bulunan HTPB bağlayıcı malzemenin artması ile yanma hızı artmaktadır. Yanma hızı değiştiricisi (katalizörü), kompozit katı roket yakıtlarda oksit sağlayıcının (AP) ayrışmasını başlatmak için kullanılır. Ferrik oksit (Fe_2O_3) oldukça kararlı, sentezlenmesi kolay ve yan reaksiyonlara karşı inert olduğu için pratik uygulamada sıklıkla bir yanma hızı değiştiricisi olarak kullanılır. Kompozit roket yakıtında bulunan kataliz malzemesi olarak demir oksitler (Fe_2O_3, Fe_3O_4) yaygın olarak kullanılmaktadır. Kataliz malzemesi, AP tanelerinin bozunma hızını artırdığı için tercih edilmektedir. AP tanelerinin bozunma hızının artması ile yanma hızı da artmaktadır. Lu vd. (2012) mikro boyutlu Fe_2O_3 yerine nano boyutlu Fe_2O_3 tozu kullanıldığı zaman kompozit katı roket yakıtın yanma hızının arttığını rapor etmişlerdir. Ancak nano boyutlu Fe_2O_3 tozu kullanıldığı zaman roket yakıtının mekanik özellikleri azaldığını belirtmişlerdir. Styborski vd. (2010) kompozit roket yakıtına Fe nanopartikül eklendiği zaman yanma hızının arttığını belirtmişlerdir. Klasik kompozit yakıtlar genellikle kristal oksitleyici olarak %60–80 amonyum perklorat (AP), metal yakıt olarak aluminyum tozu %5–20 Al ve plastikleştirici olarak %5–25 HTPB elastomerik bağlayıcı ve %1–2 Fe_2O_3 içermektedir (Kubota, 2002; Lu vd., 2012; Bae vd., 2008; Varghese and Krishnamurthy, 2017; Styborski vd., 2010; Sutton ve Biblarz, 2017).

Bu çalışmada, kompozit roket yakıtının başlangıç sıcaklığı ve ortam basıncın yanma hızı üzerine etkileri incelenmiştir. Doğal yaşlanmış numunenin yanma ısısı kapalı bomba kalorimetre ve yanma hızı MIL–STD–286C standardına göre 241, 294 ve 343 K sıcaklıklarda strand burner cihazı ile belirlenmiştir.

2. Malzeme ve yöntem

2.1. Malzeme

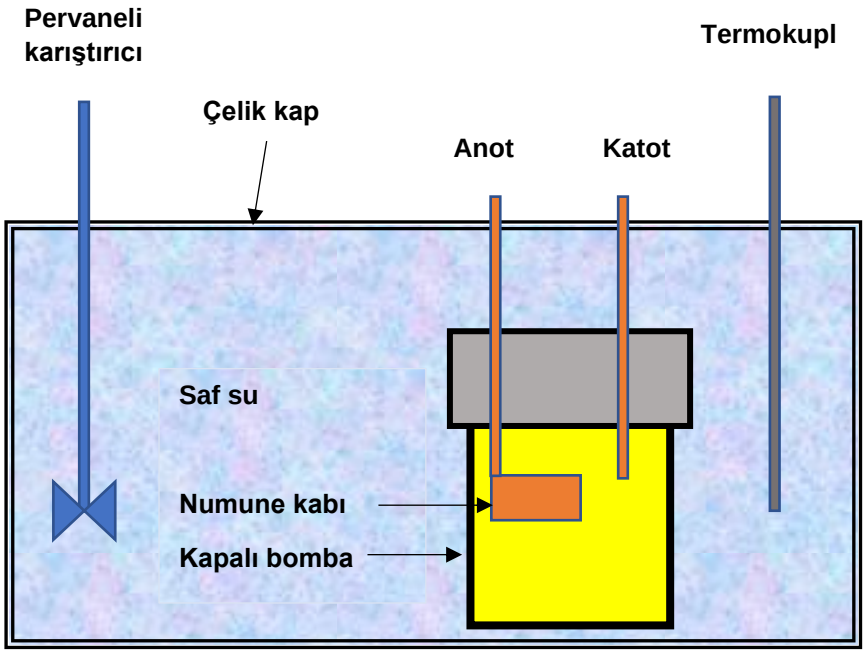
Bu çalışmada, kompozit roket yakıtı, kapalı bomba kalorimetre (Leco 350), terazi (Satorious) ve yanma hızı ölçümü Linear Strand burner (Tasarım) cihazı kullanılmıştır.

2.2. Yöntem

2.2.1 Yanma ısısı

Yakıtın yanma ısısı sabit hacimli kapalı bomba kalorimetre cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Kapalı bomba kalorimetre cihazı Leco 350 model kullanılmıştır. Kapalı bomba kalorimetre cihazının şematik gösterimi Şekil 1 de verilmiştir. Terazi 0,1 mg hassasiyetli terazi kullanılmıştır.

Tipik bir yanma ısısı deneyinde, kompozit roket yakıt numunesi ASTD-M-3286-85 standardına göre terazi ile tartılarak dikdörtgen prizma formunda yaklaşık 1 g ağırlığında kesilerek hazırlanmıştır. Numune terazi tartılmış ve kapalı bomba cihazına ağırlık kaydedilmiştir. Bu numune kapalı bomba kalorimetre içerisindeki yanma haznesine yerleştirilmiştir. 11 cm uzunluğundaki yakma teli, kompozit yakıt numunesine temas edecek şekilde anot ve katot ateşleme akımı uçlarına bağlanmıştır.



Şekil 1. Kapalı bomba kalorimetre

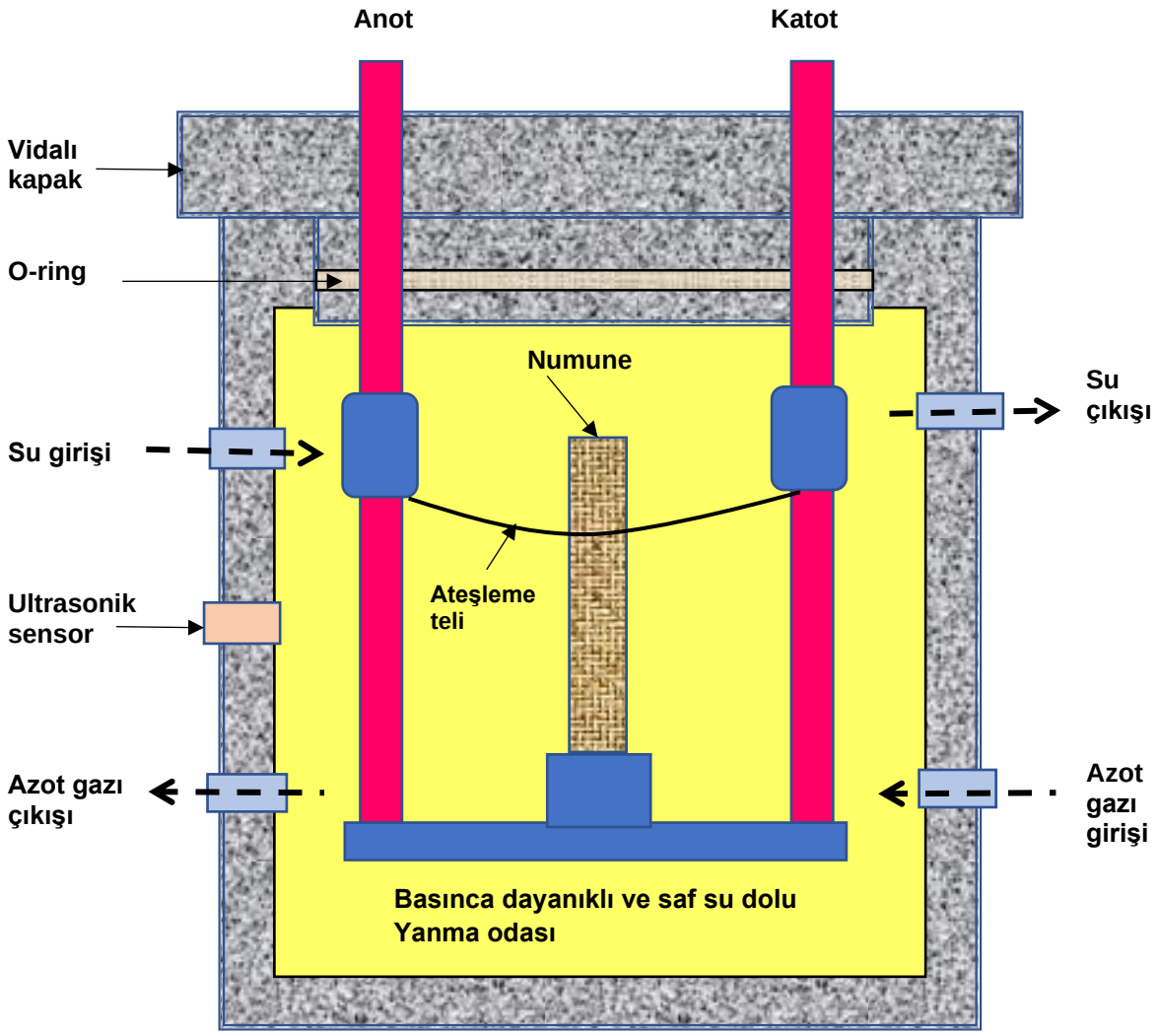
Bomba haznesi kapağı kapatılmış, argon gazı vasıtasıyla hazne içerisindeki oksijen süpürülerek yanma haznesinde inert ortam sağlanmıştır. Bomba saf su ile dolu olan çelik kaba konulmuştur. Numune ateşlenmiş ve numunenin yanması sağlanmıştır. Kompozit roket yakıtı tamamen yandığı belirlenmiştir. Cihaz ateşleme öncesi ve sonrası suyun sıcaklıkları ölçülmüştür. Suyun sıcaklık değişimlerinden numunenin yanma ısısını hesaplamıştır.
Yanma ısısı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Eşitlik 1).

$$\textbf{Yanma ısısı} = \frac{\textbf{Numunenin kalorisi, cal}}{\textbf{Numune ağırlığı, g}} \quad \textbf{(1)}$$

Yanma ısısı birimi cal/g olarak ölçülmüştür.

2.2.2 Yanma hızı

Katı yakıtlı bir roketin balistik davranışını yakıtın yanma hızı etkilemektedir. Katı roket yakıtlarının yanma hızının ölçümü için strand burner cihazı en yaygın kullanılan yöntemdir. Strand burner cihazının şematik gösterimi Şekil 2 de verilmiştir. Strand burner sabit basınç altında ve sabit bir başlangıç sıcaklığında katı roket yakıtlarının yanma hızının ultrasonik yöntem ile ölçen bir cihazdır. Kompozit roket yakıt numunesi, MIL–STD–286C standardına göre 5 mm genişlik ve 10 cm uzunluğunda şerit biçiminde numune kesilerek hazırlanmıştır. Hazırlanan yakıt numuneleri, eşit şartlarda sekiz saat süre ile 294 K sıcaklıkta şartlandırılmıştır. Her bir test için üç numune kullanılmıştır. Üç numune strand burner numune kabına yerleştirilmiş, ateşleme telinin anot, katot ve numune bağlantıları yapılmıştır. Strand burner numune taşıyıcı cihaza yerleştirilmiş ve cihaz çalıştırılmıştır.



Şekil 2. Yanma hızının ölçüm cihazı Strand burner yapısı

Yanma hızı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Eşitlik 2).

$$\textit{Yanma hızı} = \frac{\textit{Numunenin uzunluğu, mm}}{\textit{yanma süresi, s}} \quad (2)$$

Yanma hızı birimi mm/s olarak ölçülmüştür.

Cihaz sabit sıcaklığı sağlamak (294 K) için belirli bir süre yanma odasını çevreleyen su ceketinden saf su sirkülasyonu yapılmıştır. Saf su sıcaklığı sabitlendiği zaman gerekli test basıncını sağlamak maksadıyla azot gazı yanma odasına verilmiştir. Azot gazı basıncı bir değere (69 bar) sabitlenince ateşleme işlemi yapılmıştır. Yanma süresi bir ultrasonik yöntem ile belirlenmiştir. Yakıtın numune uzunluğu ve yanma süresi kullanılarak yanma hızı hesaplanmıştır. Yanma zamanı boyunca gerçekleşen tüm basınç değişiklerinden kaynaklanan yüksek frekanslı ses dalga verileri ultrasonik sensor ile alınır. Bu ultrasonik veriler dijital dönüştürücüler ile bilgisayar ortamında okunmakta, bu işlem ile yakıt yanma süresi ölçümü belirlenmektedir.

3. Bulgular ve tartışma

3.1. Yanma ısısı

Doğal yaşlanmış kompozit roket yakıtı numuneler kapalı bomba kalorimetre cihazında yakılarak yanma ısısı belirlenmiştir. Kompozit roket yakıtı yanma ısısı Tablo 1 de sonuçları verilmiştir.

Tablo 1. Kapalı bomba kalorimetre ile kompozit roket yakıtının yanma ısısı değerleri

Yaşlanma Durumu	Numune Ağırlığı, g	Yanma ısısı, Cal/g	Ortalama Yanma ısısı, Cal/g
Doğal Yaşlanmış	1,0373	1487,2	1469,73
	1,0344	1460,9	
	1,0374	1461,1	

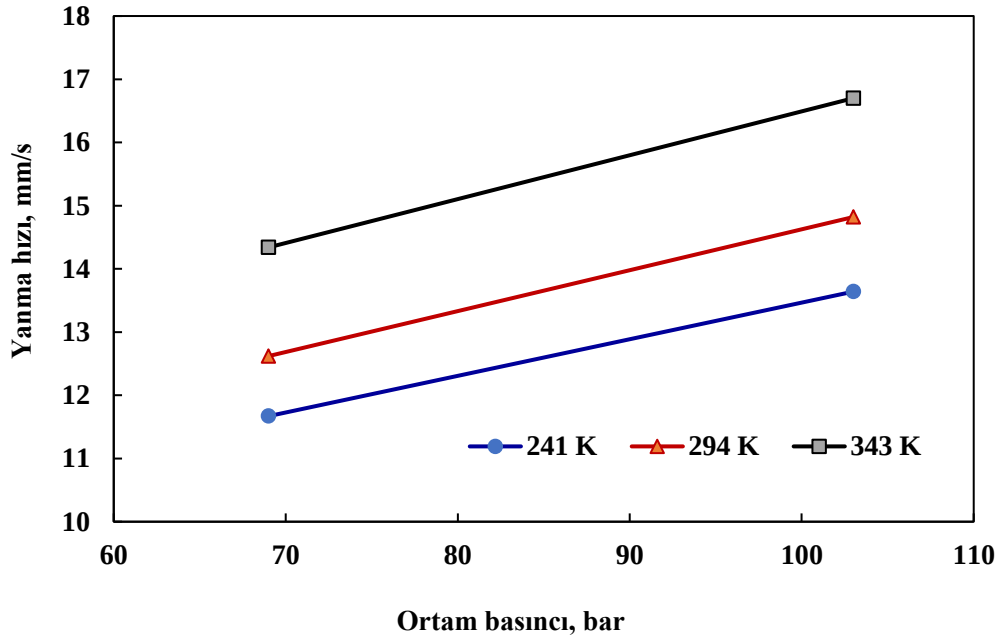
Kompozit roket yakıt numunesinin yanma ısısı 1469,73 cal/g olarak ölçülmüştür. Bu yanma ısısı literatür ile uyumludur. Kompozit roket yakıt numunesinin yanma ısısı 1514 Cal/g (Jain vd., 2019) ve 1284 Cal/g (Dönmez, 2018) olarak bulunmuştur.

3.2. Yanma hızı

Kompozit roket yakıtının belirli bir basınç altında, soğuk, oda sıcaklığı ve sıcak ortamda ve saf su içinde yanma hızının belirlenmesi için strand burner cihazı kullanılarak ölçüm yapılmıştır. Her bir deney üç kez yapılmış ve ortalaması alınmıştır.

3.2.1 Yanma odasının başlangıç sıcaklığının etkisi

Katı yakıtlı roket motorlarında yanma odasının başlangıç sıcaklığı yanma hızını etkilemektedir. Katı yakıtlı roket motorlarında yanma ortamındaki başlangıç sıcaklığının artması yanma hızının artmasına yol açmaktadır. Kompozit roket yakıtının yanma hızı başlangıç sıcaklığı MIL–STD–286C standardına göre 241 K (soğuk ortam), 294 K (oda sıcaklığı ortamı) ve 343 K (sıcak ortam) ortamlarda ölçülmüştür. Kompozit roket yakıtının yanma hızının ortam basıncı ve başlangıç sıcaklığı ile değişimi strand burner cihazı ile belirlenmiş ve sonuçlar Şekil 3 de verilmiştir.



Şekil 3. Strand burner ile ölçülen kompozit roket yakıtının yanma hızının ortam basıncı ve başlangıç sıcaklığı ile değişimi

Ortam basıncı 69 barda, yanma odasının başlangıç sıcaklığı 241, 294 ve 343 K de yanma hızı 11,67, 12,62, ve 14,34 mm/s olarak belirlemiştir. Yanma odasının başlangıç sıcaklığı 241 K iken en düşük yanma hızı elde edilmesine rağmen yanma odasının başlangıç sıcaklığı 343 K iken en yüksek yanma hızı elde edilmiştir. Yanma odasının başlangıç sıcaklığının artması ile yanma hızının arttığı belirlenmiştir. Park vd. (2021) kompozit roket yakıtının 288 K başlangıç sıcaklığında 12,43 mm/s iken 338 K başlangıç sıcaklığında 13,63 mm/s olarak ölmüşlerdir. Bu çalışmada, 294 K başlangıç sıcaklığında 12,62 mm/s ölçülmüş iken Park vd. (2021) 228 K başlangıç sıcaklığında 12,43 mm/s değerini bulmuşlardır. Bu sonuçlar birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir.

Kubota (2002) %86 AP ve %14 HTPB içeren kompozit roket yakının 241 ve 343 K sıcaklıkta yanma hızını sırası ile 6 ve 8 mm/s olarak rapor etmiştir. Atwood vd. (1999); Spurling (2013); Bossi vd. (2001) kompozit roket yakıtının yanma hızı başlangıç sıcaklığının artması ile arttığını beyan etmişlerdir.

3.2.2 Yanma odasındaki ortam basıncın etkisi

Yakıtın yanma hızını etkileyen en önemli etkenlerden birisi ortam basıncıdır. Katı yakıtlı roket motorlarında yanma ortamındaki basıncın artması yanma hızının artmasına yol açmaktadır. Kompozit roket yakıtının yanma hızı strand burner cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Yanma hızının ortam basıncı ve başlangıç sıcaklığı değişimi sonuçları Şekil 3 de verilmiştir. Her bir deney üç kez yapılmış ve ortalaması alınmıştır. Şekil 3 de verilen eğri bu ortalama değerler kullanılarak çizilmiştir. Kompozit roket yakıtının yanma hızı ortam basıncının 69 bar değerinden 103 bar değerine artması ile 241, 294 ve 343 K sıcaklıklarda yanma hızı artmıştır. Bu çalışmada, 69 bar ortam basıncında 12,62 mm/s iken Park vd. (2021) 69 bar ortam basıncında 12,43 mm/s değerini bulmuşlardır. Bu sonuçlar birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir.

Ortam basıncının artması ile yanma hızı artmıştır (Shioya vd., 2014; Ghorpade vd., 2010; Trache vd., 2019; Styborski vd., 2010; Dokhan vd., 2001). %60 AP, %10 Al ve %20 HTPB ve %10 oxamide içeren kompozit roket yakıtı, 70 bar ortam basıncında yanma hızı 5,4 mm/s olarak belirlenmiştir (Ghorpade vd., 2010). %77 AP, %5 Al ve %13 HTPB içeren kompozit roket yakıtı, 70 ve 100 bar ortam basıncında yanma hızı sırası ile 29,1 ve 32,8 mm/s olarak belirlenmiştir (Lu vd., 2012). %80 AP ve %17,4 HTPB içeren kompozit roket yakıtı, 100 bar ortam basıncında yanma hızı 12,7 mm/s olarak belirlenmiştir (Styborski vd., 2010). Kompozit roket yakıtı, 70 bar ortam basıncında yanma hızı 6,5 mm/s olarak belirlenmiştir **(**Jain vd. (2019). %68 AP, %18 Al ve %14 HTPB içeren kompozit roket yakıtı, 70 bar ortam basıncında yanma hızı 6,1 mm/s olarak belirlenmiştir (Kshirsagar vd., 2016). Park vd. (2021) kompozit roket yakıtı 6,9 MPa ortam basıncında yanma hızı 12,43 mm/s iken 13,8 MPa ortam basıncında yanma hızı 16,55 mm/s olarak ölçmüşlerdir.

4. Sonuçlar

Askeri füzeler için kompozit roket yakıtı esas tahrik gücüdür. Kompozit roket yakıtlarının balistik davranışı, yakıtın yanma hızından büyük ölçüde etkilenmektedir. Yanma hızının artması ile roketin performansı da artmaktadır. Bu çalışmada, kompozit roket yakıtının yanma ısısı belirlenmiş ve ortam basıncı ve başlangıç sıcaklığının yanma hızına etkileri araştırılmıştır. Kompozit roket yakıtın yanma ısısı ölçümleri sabit hacimli kapalı bomba kalorimetre cihazı kullanılarak yapılmıştır. Kompozit roket yakıtın yanma ısısı 1469,73 Cal/g olarak belirlenmiştir. Kompozit roket yakıtının yanma hızı strand burner cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Kompozit roket yakıtının yanma hızı ortam basıncının 69 bar değerinden 103 bar değerine artması ile yanma hızı artmıştır. Yanma odasının başlangıç sıcaklığı 241 K iken en düşük yanma hızı elde edilmesine rağmen yanma odasının başlangıç sıcaklığı 343 K iken en yüksek yanma hızı elde edilmiştir. Yanma odasının başlangıç sıcaklığının artması ile kompozit roket yakıtının yanma hızının arttığı belirlenmiştir.

Referanslar

Atwood, A. I., Boggs, T. L., Curran, P. O., Parr, T. P., Hanson-Parr, D. M., Price, C. F., & Wiknich, J. (1999). Burning rate of solid propellant ingredients, part 1: Pressure and initial temperature effects, Journal of Propulsion and Power, 15 (6), 740-747.

Bae, S. B., Kim, C. K., Kim, K., & Chung, I. J. (2008). The effect of organic modifiers with different chain lengths on the dispersion of clay layers in HTPB (hydroxyl terminated polybutadiene), European Polymer Journal, 44, 3385–3392.

Bastress, E. K. (1961). Modification of the burning rates of ammonium perchlorate solid propellants by particle size control. Princeton University.

Bossi, I., Ferriello, P., & De Luca, L. (2001). Acoustic emission of underwater burning composite solid rocket propellants. In XVI Congresso Nazionale AIDAA, 2001, 24-28 September, Palermo, Pa, Italy (Vol. 12).

Cohen, N. S., & Strand, L. D. (1982). An improved model for the combustion of AP composite propellants, *AIAA journal*, *20* (12), 1739-1746.

Dokhan, A., Price, E.W., Sigmant, R.K., & Seitzman, J. M. (2001). The Effects of Al Particle Size on the Burning Rate and Residual Oxide in Aluminized Propellents. 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Prooulsion Conference and Exhibit.

Dönmez, C.E. (2018). Kompozit esaslı katı roket yakıt numunesinin karaktersitik özelliklerinin deneysel incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Kırıkkale Üniversitesi. Kirikkale, Turkiye.

Ghorpade, V.G., Dey, A., Jawale, L.S., Kotbagi, A.M., Kumar A., & Gupta, M. (2010). Study of Burn Rate Suppressants in AP-Based Composite Propellants. Propellants Explos. Pyrotech., 35, 53 – 56

Jain, S., Gupta, G., Kshirsagar, D.R., Khire, V.H., & Kandasubramanian, B. (2019). Burning rate and other characteristics of strontium titanate ($SrTiO_3$) supplemented AP/HTPB/Al composite propellants. Defence technology 15, 313 – 318.

Jayaraman, K. V. A. K., Anand, K. V., Chakravarthy, S. R., & Sarathi, R. (2009). Effect of nano-aluminium in plateau-burning and catalyzed composite solid propellant combustion. Combustion and Flame, *156*(8), 1662-1673.

Kshirsagar, D.R., Jain, S., Jawalkar, S.N., Naik, N.H., Pawar, S., & Maurya, M. (2016). Evaluation of Nano-Co_3O_4 in HTPB-Based Composite Propellant Formulations. Propellants Explos. Pyrotech., 41, 304 – 311

Kubota, N. (2002). Propellants and Explosives Thermochemical aspects of Combustion. Wiley, Germany.

Lu, K.T., Yang, T.M., Li, J.S., & Yeh, T.F. (2012). Study on the burning characterıstics of ap/al/htpb composite solid propellant containing nano-sized ferric oxide powder. Combust. Sci. Technol., 184, 2100–2116,

MIL–STD–286C (1991). Military Standard Propellants, Solid, Sampling, Examination and Testing. Department of Defense, USA.

Park, S. J., Choi, S. H., & Park, J. H. (2021). Properties of Composite Solid Propellants Containing α-FeOOH. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 46 (1), 84-89.

Shioya, S., Kohga, M., & Naya, T. (2014). Burning characteristics of ammonium perchlorate-based composite propellant supplemented with diatomaceous earth. Combustion and Flame, 161, 620-630.

Spurling, A. (2013). Effects of initial bulk temperatures on a propellant's pressure-coupled response, International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, 12 (5).

Styborski, J.A., Scorza, M.J., Smith, M.N., & Oehlschlaeger, M.A. (2010). Iron Nanoparticle Additives as Burning Rate Enhancers in AP/HTPB Composite Propellants. Propellants Explos. Pyrotech., 35, 1 – 8

Sutton G.P., & Biblarz, O. (2017). Rocket Propulsion Elements, Wiley, Canada.

Trache, D., Maggi, F., Palmucci, I., DeLuca, L.T., Khimeche, K., Fassina, M., Dossi, S., & Colombo, G. (2019). Effect of amide-based compounds on the combustion characteristics of composite solid rocket propellants. Arabian Journal of Chemistry, 12, 3639-3651.

Varghese, T.L., & Krishnamurthy, V.N. (2017). The Chemistry and Technology of Solid Rocket Propellants (A Treatise, Allied publishers PVT LTD.

Yaman, H., Çelik, V., & Degirmenci, E. (2014). Experimental investigation of the factors affecting the burning rate of solid rocket propellants. Fuel, 115, 794–803.

Zhang, W., Xie, W. X., Fan, X. Z., Liu, F. L., Pang, W. Q., Yan, N., & Liu, Q. (2014). Effects of nano-aluminum on combustion characteristic of low smoke NEPE propellants. J. Solid Rocket Technol, 37, 516-520.

MÜHENDİSLİK MİMARLIK FAKÜLTESİ

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

UMAGD, (2023) 15(2), 378-403.

10.29137/umagd.1246245

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Dönüşüm Kaynaklı Plastisite (TRIP) ve Üçüncü Nesil İleri Yüksek Dayanımlı Çelikler Üzerine Bir İnceleme

A Review on Transformation Induced Plasticity (TRIP) and Third Generation Advanced High Strength Steels

Onur Okur [1,2] *, Mehmet Erdoğan [3]

[1]*Kırıkkale Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE*
[2]*Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 06560 Ankara, TÜRKİYE*
[3]*Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 06560 Ankara, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 01/02/2023* ***Kabul / Accepted**: 07/02/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 15/06/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 15/06/2023*

Öz

Elektrikli araçların kullanımı artarken araçların ağırlığının azaltılması ise yakıt tasarrufu için elzemdir. Araç ağırlığındaki her %10'luk azalma yakıt performansını %3,5 oranında artırmaktadır. Ağırlıktaki azalma ince kesitli sacların kullanılmasıyla mümkündür. Ancak ince sacların kaza anında yeterli dayanımı sağlayamama riski vardır. Araştırmalar hem yüksek dayanım hem de şekillendirilebilirlik dengesi sunan İYDÇ'ler üzerinde yoğunlaşmıştır. 3. Nesil İYDÇ'ler araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bunlar birinci nesilden daha yüksek mekanik özellikler vadederken, 2. Nesile kıyasla ucuzdurlar. 3. Nesil İYDÇ'ler genellikle çok fazlı mikroyapıya sahiptir ve fazların mikroyapıda bulundukları oranda çeliğin özelliklerini etkilemektedirler. Böylece farklı özelliklere sahip fazların sinerjetik etkisi ile çeliğin özellikleri istenildiği gibi ayarlanabilmektedir. Bu fazların içerisinde γ_K fazı, bu fazın miktarı ve kararlılığı önemlidir. Yüksek miktarda ve iyi kararlılığa sahip γ_K, deformasyon ile martensite dönüşerek plastik kararsızlığı yüksek gerinimlere ötelemekte ve çeliğin hasara uğramasını geciktirmektedir. Bu mekanizma TRIP etkisi olarak adlandırılmaktadır. Bu durum çeliklerin yüksek mekanik özelliklere sahip olmasının başlıca sebebidir. Yapılan bu inceleme ile TRIP mekanizması, dönüşüm kinetiği ve γ_K kararlılığını etkileyen faktörler incelenmiştir. 3. Nesil İYDÇ'lerinden SV ve P Çelikleri, MMn Çelikler ve KİB Çelikler irdelenerek termomekanik ve ısıl işlem süreçlerinin mikroyapıya etkisi açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler

TRIP etkisi, Su verme&paylaştırma çelikleri, Orta Mn'lı çelikler, Karbür içermeyen beynitik çelikler, 3. nesil İYDÇ'ler

Abstract

As electric vehicles take up much portion in sales, fuel saving by reducing vehicle weight has become essential. This can be possible by reducing sheet thickness. 10% reduction in vehicle weight increases fuel performance by 3.5%. Weight reduction is possible by using of thin-section sheets. However, it may not provide sufficient strength in collisions. 3rd Generation AHSSs have drawn attention from researchers. They promise higher properties than 1st generation and they are less expensive than the 2nd. The 3rd generally has a multiphase microstructure affecting the properties in proportion to the phases in the microstructure. Thus, with the synergetic effect of each phase with different properties, the steel properties can be tailored. Among these phases, γ_{RA} phase is important. High γ_{RA} content having good stability gradually transforms to martensite under load which postpones the plastic instability to higher strains and delays the fracture. This mechanism is known to be TRIP effect. This is the main reason why steels exhibit high mechanical properties. In this review, TRIP mechanism, transformation kinetics and factors affecting γ_{RA} stability were discussed. The effects of thermomechanical and heat treatment processes on the microstructure of the Q&P Steels, MMn Steels and CFB Steels which are the 3rd Generation AHSSs were viewed.

Key Words

***Sorumlu Yazar: onurokur@kku.edu.tr**

Simgeler ve Kısaltmalar

EA	Elektrikli araçlar
Ar-Ge	Araştırma ve geliştirme
YDÇ (HSS)	Yüksek dayanımlı çelik
İYDÇ (AHSS)	İleri yüksek dayanımlı çelik
DP	Çift fazlı
CP	Karmaşık fazlı
TRIP	Dönüşüm kaynaklı plastisite
AUST.SS	Östenitik paslanmaz çelik
TWIP	İkizlenme kaynaklı plastisite
MBIP	Mikrobant kaynaklı plastisite
MedMn veya MMn	Orta Manganlı
KİB (CFB)	Karbür içermeyen beynit
TBF	TRIP-tip beynitik ferrit
SV ve P (Q&P)	Su verme ve paylaştırma
DSÇ (PSE)	Dayanım ve süneklik çarpımı
γ_K (γ_{RA})	Kalıntı östenit
YMK	Yüzey merkezli kübik
HMK	Hacim merkezli kübik
HMT	Hacim merkezli tetragonal
U veya $U_{mekanik}$	Mekanik itici güç
Ms	Atermal martensit dönüşüm başlangıç sıcaklığı
τ	Kayma kuvveti
σ	Normal kuvvet
γ_o	Dönüşüm kayması
ε_o	Gerinim uzaması
M_s^{σ}	Gerilim kaynaklı dönüşümden gerinim yardımlı dönüşüme geçiş sıcaklığı
M_d	Östenitin dönüşüm olmadan yalnızca plastik deforme edilebildiği sıcaklık
G	Gibbs serbest enerjisi
$\Delta G_{\gamma\rightarrow\alpha'}$	Östenitin martensite dönüşebilmesi için gerekli olan kimyasal serbest enerji farkı
ΔG_{kritik}	Östenitin martensite dönüşmesi için gerekli olan minimum kimyasal serbest enerji farkı
$\Delta G_{kimyasal}$	Ms sıcaklığının üzerinde dönüşümün gerçekleşmesi için gerekli kimyasal serbest enerji farklı
T_o	Östenitin ve martensitin kimyasal serbest enerjilerinin eşit olduğu sıcaklık
α'	Martensit fazı
α	Ferrit fazı
σ_γ veya σ_γ^Y	Östenitin akma dayanımı
γ	Östenit fazı
T	Kelvin cinsinden sıcaklık
X_i	Belirtilen elementin mol hacim oranı
f_M veya $f_{\alpha'}$	Martensit faz hacim oranı
β_0	Kayma bantlarının kesişme olasılığı
α_0	Bağımsız bir sabit
n_1	Malzeme sabiti

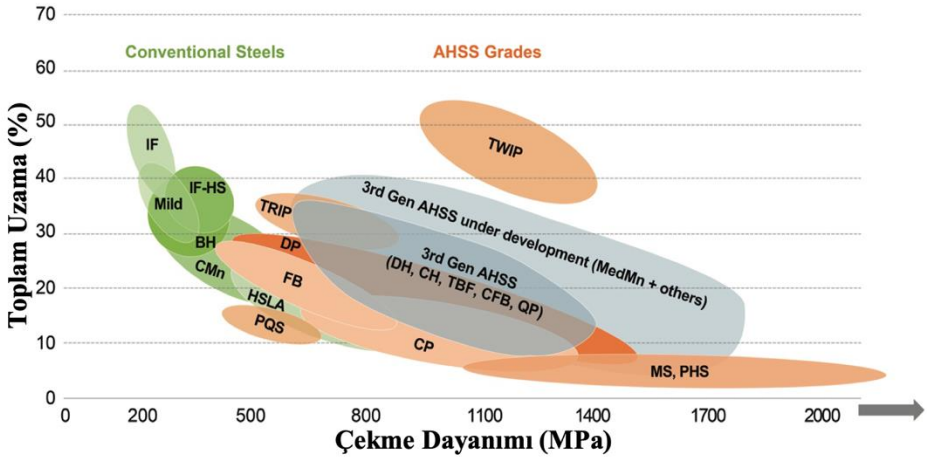
Simgeler ve Kısaltmalar (devamı)

ε	Gerçek gerinim
SDH	Sürekli döküm hattı
STH	Sürekli tavlama hattı
GTH	Galvaniz tavlama hattı
SVS	Su verme sıcaklığı
K-M	Koistinen Marburger
-α	Ampirik sabit
OS	Oda sıcaklığı
PS	Paylaştırma sıcaklığı
Mf	Martensitik dönüşüm bitiş sıcaklığı
Q&P980	980 MPa çekme dayanımı sunan ticari Q&P çeliği
MS980	980 MPa çekme dayanımı sunan martensitik çelik
Ac_1	Isıtma sırasında östenitin oluştuğu en düşük sıcaklık
Ac_3	Isıtma sırasında östenit dönüşümünün tamamlandığı en düşük sıcaklık
f_γ	Kalıntı östenit faz hacim oranı
C_γ	Kalıntı östenitin içerdiği karbon miktarı
İHE	İstif hatası enerjisi
ÖGGD	Östeniti Geri Getiren Dönüşüm
AK	Ara kritik
KİB	Karbür İçermeyen Beynit
IBT	İzotermal beynitik tutma

1. Giriş

Yakıt ekonomisi son yıllarda değişen ekonomik ve politik şartlarla birlikte oldukça önemli hale gelmiştir (Robinson et al., 2019). Bu süreçte elektrikli araçlar (EA), hem otomotiv üreticilerinin hedefleri hem de ülkelerin uyguladığı politikalar doğrultusunda giderek daha fazla oranda hayatımıza girmeye başlamıştır (Burd et al., 2021). EA'ların yaygınlaşmasının önündeki en büyük problemler ise bataryaların maliyetleri, depolama kapasiteleri ve depoladıkları elektrik enerjisi ile gidebildikleri en uzun menzil olarak görülmektedir. Bir çözüm olarak daha büyük batarya kullanmak aracın katedebileceği en uzun mesafeyi artırırken maliyetleri de beraberinde getirmektedir. Ayrıca büyük bataryalar aracın ağırlığını da artıracağı için otomotiv üreticileri mümkün oldukça bu yolla kapasite artışı sağlamaktan kaçınmaktadırlar (Mayyas et al., 2017). Bu sebeple, batarya boyutlarının yani yakıt hücresi sayısının artırılmasının dışında yakıt hücrelerinin depolama kapasitesinin artırılması üzerine de yoğun çalışmalar devam etmektedir. Yakıt tasarrufunda bir diğer yöntem ise araç ağırlığının azaltılmasıdır. Ağırlığı azaltılan araçlar daha az elektrikle daha uzun mesafeleri kat edebilirler. Ağırlığın azaltılması, batarya boyutlarının büyütülmesi gerektiği durumlarda ağırlık artışını telafi edebilmektedir (Luk et al., 2017). Örneğin, araç ağırlığında %10'luk bir azalma yakıt tüketiminden %4-8 oranında bir tasarrufu mümkün kılmaktadır (Fontaras et al., 2017). Araç ağırlığının; %40'ını gövde, %25'ini şasi, %15'ini güç aktarım organları ve %20'sini ise ekipman ağırlığı oluşturduğu düşünüldüğünde demir esaslı malzemelerin araç üretimindeki yeri hakkında fikir sahibi olunabilir (Demeri, 2013). Gerçekten de demir esaslı malzemeler günümüz araç ağırlığının %70'ine karşılık gelecek biçimde araç üretiminde yer almaktadır. Bu %70'lik oran içinde ise çelik alaşımları daha fazla yer tutmaktadır (Czerwinski, 2022). Bu yüzden ağırlık tasarrufu konusunda, araç üretiminde kullanılan çelik saclar büyük bir potansiyel barındırmaktadır. Çelik saclar kullanılarak ağırlık tasarrufu elde etmede en çok kullanılan yollardan biri sacların kesit kalınlığının azaltılmasıdır (Zuidema, 2012). Bununla birlikte unutulmamalıdır ki kesit kalınlığının azaltılması aracı hafifletse de azalan kesit kalınlığı aracın çarpışma performansını düşürebilmektedir (Safari et al., 2018).

50 yıldan fazla süredir otomotiv üreticileri ve bilim insanları, üretimde kullanılan çelik saclarda ağırlık tasarrufu yapılırken bu sacların hem şekillendirebilirlik hem de çarpışma esnasında sönümleyebildiği enerji konularında yoğun araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) faaliyetleri yürütmektedir. Bu Ar-Ge faaliyetleri sonucunda ilk olarak Yüksek Dayanımlı Çelik (YDÇ veya bilinen kısaltmasıyla *HSS*) grubu ortaya çıkmıştır (Sperle et al., 2001). Bu gruptaki çelikler yüksek sünekliğe sahip olmasına rağmen düşük dayanıma sahip olmalarından ötürü kaza anında sönümleyebileceği enerji miktarı da sınırlı kalmaktadır (Lesch et al., 2017). Bu sınırlama farklı çelik arayışlarının önünü açarken yeni bir çelik grubunun da doğmasına neden olmuştur. İleri Yüksek Dayanımlı Çelik (İYDÇ veya bilinen kısaltmasıyla *AHSS*) olarak adlandırılan bu çelik grubu temel olarak üç sınıfa ayrılmaktadır. 1. Nesil İYDÇ'ler, Çift Fazlı *(DP)*, Karmaşık Fazlı *(CP)* ve Dönüşüm Kaynaklı Plastisite *(TRIP)* Çelikleri gibi çelikleri kapsamaktadır (Klinkenberg et al., 2017). Günümüzde hâlâ yoğun olarak kullanılan bu sınıf hem şekillendirilebilirlik hem de enerji sönümleme noktalarında artan gereksinimleri karşılayamadığından Östenitik Paslanmaz *(AUST.SS)*, İkizlenme Kaynaklı Plastisite (*TWIP)* ve Mikrobant Kaynaklı Plastisite *(MBIP)* Çelikleri gibi 2. Nesil İYDÇ'ler ortaya çıkmıştır. Bu çelik sınıfı, araştırmacılar ve mühendisler tarafından Ar-Ge çalışmalarının odağında yer almıştır. Yüksek sünekliğe ve dolayısıyla iyi şekillendirilebilirliğe sahip olan bu çelikler yine oldukça yüksek dayanım değerleri sergilemektedirler. Bu da, çarpışma esnasında açığa çıkan enerjinin 2. Nesil İYDÇ'ler tarafından daha iyi sönümlenmesini sağlamaktadır (Hu et al., 2017). 2. Nesil İYDÇ sınıfı yüksek miktarlarda pahalı alaşım elementlerinin (Ni, Mn vb) kullanımını ve karmaşık üretim yöntemleri gerektirmesinden ötürü istenilen oranda ticarileşememiştir. 2. Nesil İYDÇ'lerin pahalı bir seçenek olmasından dolayı araştırmacıları ve mühendisleri 1. Nesil İYDÇ'lerden daha yüksek dayanım ve süneklik sergileyen ancak 2. Nesil İYDÇ'lerden daha ekonomik yeni bir sınıfı, 3. Nesil İYDÇ'leri ortaya çıkarmıştır. Bu yeni sınıf Orta-Manganlı *(MedMn veya MMn)*, TRIP-tip Beynitik Ferrit *(TBF)* veya diğer adıyla Karbür İçermeyen Beynit *(CFB)* ve Su Verme ve Paylaştırma (SV ve P veya bilinen adıyla *Q&P*) Çelikleri gibi çelikleri içermektedir. (Matlock & Speer, 2009). Yeni nesil İYDÇ'lerden istenilen bir özellik; yüksek dayanım ve süneklik çarpımı (DSÇ veya bilinen adıyla *PSE*) değerine sahip olmasıdır. 3. Nesil İYDÇ'lerde bu değerin 30 GPa*x*%'den yüksek olması beklenmektedir (Dai et al., 2021; Sugimoto, 2022). Tüm YDÇ'leri ve İYDÇ'leri aynı grafikte gösteren küresel şekil verilebilirlik diyagramı veya diğer ismiyle "muz diyagramı" Şekil 1.1.1'de görülmektedir.



Şekil 1.1 Küresel Şekil Verilebilirlik Diyagramı (2021) (WorldAutoSteel, 2023). WorldAutoSteel Aracılığıyla.

3. Nesil İYDÇ'ler üzerine yapılan çalışmalar yaklaşık 20 yıldan beri ivmelenerek devam etmektedir. 3. Nesil İYDÇ'lerin ortak özelliği mikroyapısında barındırdığı yarı-kararlı "kalıntı östenit" (γ_K) fazıdır. Bir yüksek sıcaklık fazı olan γ_K, belirli prosesler sonucunda oda sıcaklığında bile çeliğin nihai mikroyapısında bulanabilmektedir. Bu yarı kararlı faz gerilme altında martensit fazına dönüşerek TRIP etkisi gösterebilmektedir. TRIP etkisi sayesinde çelikte boyun verme veya diğer adıyla plastik kararsızlık daha yüksek uzama değerlerine ötelenir. Böylece bu mekanizma çeliğin sünekliğinin çarpıcı biçimde artmasına sebep olur. Bu dönüşüm yarı kararlı γ_K fazının kararlılığına bağlıdır ve kararlılığı etkileyen pek çok etken vardır. Dolayısıyla 3. Nesil İYDÇ'lerin uzama ve dayanım değerleri mikroyapıyı oluşturan fazların çeşitliliğinin yanı sıra γ_K fazının kararlılığına ve miktarına bağlıdır (Chiang et al., 2015; Kozłowska et al., 2021).

3. Nesil İYDÇ'ler giderek artan oranda ticarileşerek otomotiv üretiminde yer almakta, hedeflenen DSÇ değerlerinin oldukça üzerinde değerlere sahip olan yeni adaylar ve yeni üretim yöntemleri de her geçen gün ortaya çıkarılmaktadır (Cai et al., 2021; De Oliveira et al., 2020). γ_K fazı tüm bu çaba ve çalışmaların göbeğinde yer aldığından yeni alaşım tasarımlarında ve bilimsel çalışmalarda γ_K kararlılığının, miktarının ve γ_K'nin diğer fazlarla ilişkisinin dikkate alınması önem arz etmektedir (Dong et al., 2022; Hidalgo et al., 2019). Bu sebeple, bu incelemenin amacı 3. Nesil İYDÇ'lerin üretim yöntemlerini, γ_K'nin kararlılığını ve miktarını etkileyen faktörleri ve bu faktörlerin TRIP etkisi üzerindeki etkisini incelemektir.

2. TRIP Etkisi

3. Nesil İYDÇ'lerde oda sıcaklığında mikroyapıda östenit elde etmek kadar elde edilen kalıntı östenitin hangi etkiler altında martensite dönüşebileceğini ve bu dönüşümde etkili mekanizmaları anlamak da en az kalıntı östenit fazının oluşum süreci kadar önemlidir (Zhou et al., 2020).

Teorik olarak martensitik dönüşüm, atomların birlikte hareket etmesiyle başlayıp bu hareketin ardından kaymanın etkili olduğu ve bunun sonucunda kristal kafes yapısının çarpılmasıyla gerçekleşen difüzyonsuz bir katı hal dönüşümüdür. Bu atom hareketleriyle başlayan ve daha sonra kayma hareketine dönüşen süreç gerinim enerjisini artırarak faz dönüşüm kinetiğini başlatır. Bunun sonucunda ana faz (östenit) hacimsel olarak genişleyerek ürün fazı (martensit) ortaya çıkarır. Bu dönüşüm (genişleme) o kadar hızlıdır ki keskin martensit plakaları ses hızında oluşur (Bhadeshia & Honeycombe, 2017; Kelly, 2012).

Deformasyon yerleşik düzlemlerde gerçekleşir ve tercihli doğrultularda ilerler. Yüzey merkezli kübik (YMK) kristal kafes yapısından hacim merkezli kübik (HMK) kristal kafes yapısına dönüşüm 24 muhtemel kafes doğrultusunda gerçekleşebilir. Bununla birlikte termomekanik yüklemelerin sonucunda gerilmenin konumuna ve büyüklüğüne bağlı olarak sadece tercihli doğrultularda çekirdeklenme gerçekleşir. Plakalar arasında hapsolan karbon, HMK kristal kafes yapısını çarpıtarak tetragonaliteyi artırır ve bu yüzden çeliklerdeki martensit fazı hacim merkezli tetragonal (HMT) kristal kafes yapısına sahiptir (Caballero et al., 2014; Creuziger et al., 2019).

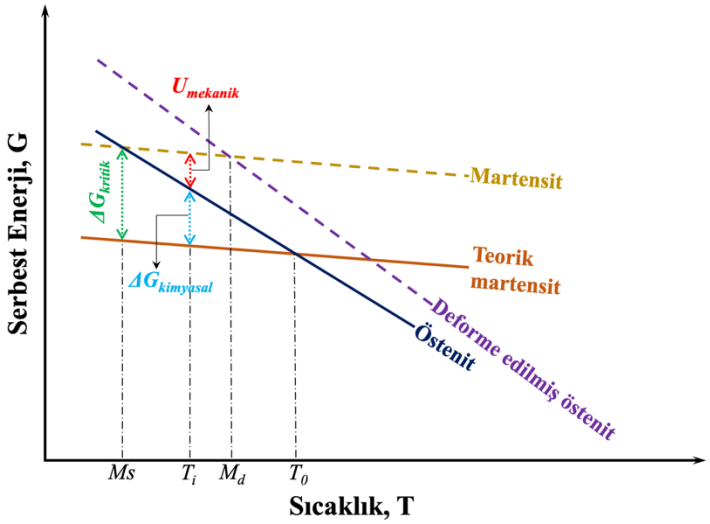
İtici güç dikkate alındığında martensitik dönüşüm 4 şekilde gerçekleşebilmektedir. Bunlar; atermal martensitik dönüşüm, izotermal martensitik dönüşüm, gerilme destekli martensitik dönüşüm ve gerinim kaynaklı martensitik dönüşümdür. Atermal martensitik dönüşüm yalnızca sıcaklığın etkin olduğu bir dönüşümdür. Bu dönüşümün başladığı nokta *Ms* sıcaklığıdır. Gerilme destekli martensitik

dönüşüm *Ms* sıcaklığından yüksek sıcaklıklarda ancak mekanik bir itici güç olan *U'*nun varlığında meydana gelir. Patel ve Cohen bu mekanik gücün uygulanan kayma kuvveti, τ'ya ve normal kuvvet, σ'ya ve ayrıca dönüşüm kaymasının, γ_o ve gerinim uzamasının, ε_o bağlı olduğu bir denklemi ifade etmişlerdir (G. Olson & M. Cohen, 1972; Tamura, 1982).

$$\boldsymbol{U = \tau\gamma_0 + \sigma\varepsilon_0} \quad (1)$$

Bogers ve Burger tarafından hata çözülüm modeli ile temel prensibi oluşturulan martensit dönüşüm kinetiğine dinamik model diye tabir edilen ve hem atermal dönüşümü hem de deformasyon kaynaklı dönüşümü kapsayan bir model ile açıklama getirilmeye çalışılmıştır (Bogers & Burgers, 1964). Bu modele termodinamik açıdan bakıldığında, östenit fazından martensit fazına bir dönüşümün gerçekleşebilmesi için Gibbs serbest enerjisinde bir düşüş olması gerekmektedir (Bleck et al., 2017).

Dönüşümün enerji açısından görünümü Şekil 2.1'de verilmiştir (Mukherjee et al., 2008). Grafik östenit ve martensit fazlarının sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Gibbs serbest enerjisini göstermektedir. *Ms*, M_S^σ ve M_d östenitin martensite dönüşümü için gerekli olan kimyasal ve mekanik itici güç ile ilgili sıcaklıklardır. *Ms* sıcaklığının altında, östenit kendiliğinden martensite dönüşür (atermal martensitik dönüşüm) çünkü kimyasal serbest enerji farkı, $\Delta G_{\gamma\to\alpha'}$, östenitte önceden var olan çekirdeklenme bölgelerinde martensit dönüşümünü sağlayacak kadar yüksektir. Sıcaklık *Ms*'nin üzerine çıktığında, dönüşüm için ihtiyaç duyulan kimyasal itici güç azalacak ve martensit çekirdeklenmesi için bir gerilme uygulayarak ek bir mekanik itici güç, *U*, sağlamak gerekecektir. Şekil 2.1'deki grafikte östenit ve martensitin Gibbs serbest enerjilerini göstermek için kullanılan kesişen doğruların altındaki kırmızı çizgi dönüşümün gerçekleşmesi için gerekli olan ek mekanik itici gücü temsil etmektedir.

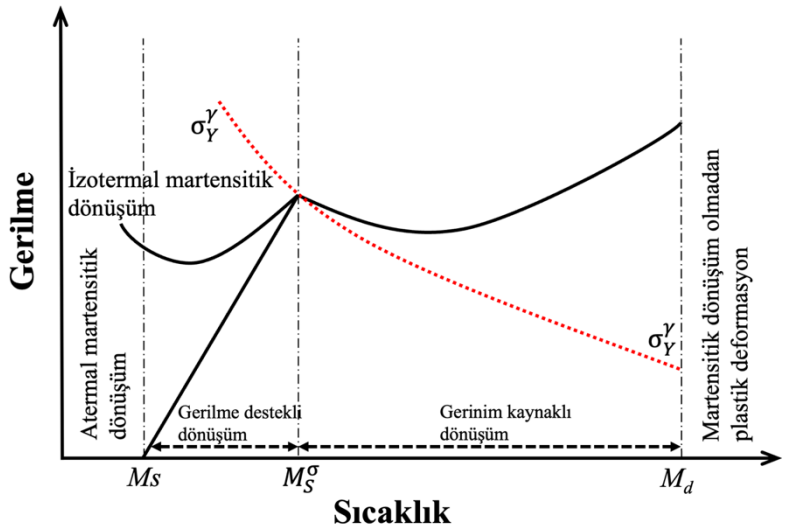


Şekil 2.1 Sıcaklık İle Gibbs Serbest Enerjisi Arasındaki İlişki. (Mukherjee et al., 2008)'den Uyarlanmıştır.

Olson ve Cohen tarafından geliştirilen ve α' fazının çekirdeklenmeye başlaması için gerekli olan gerilme ve sıcaklık arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 2.1Şekil 2.1'de verilmiştir (G. B. Olson & M. Cohen, 1972). Martensitik dönüşüm çekirdeklenme ve büyümenin görüldüğü birinci dereceden bir faz dönüşümüdür. Dönüşümün gerçekleşmesi için sistemin serbest enerjisinin düşmesi ve ayrıca heterojen çekirdeklenme bölgelerinin mikroyapıda var olması gerekmektedir. T_o sıcaklığında, östenitin kimyasal serbest enerjisi martensitin kimyasal serbest enerjisine eşittir ve her iki faz da termodinamik olarak dengededir. Fakat östenitten martensite dönüşüm ancak sistemin serbest enerji değişiminin martensitin elastik gerinim enerjisi ve yüzey enerjisini dengeleyecek kadar büyük olması durumunda gerçekleşebilir. Bundan dolayı östenit T_o sıcaklığında bile kendiliğinden martensite dönüşemez. T_o'dan daha küçük bir sıcaklık olan ve *Ms* sıcaklığına karşılık gelen bir miktar alt soğumaya ihtiyaç vardır. Bu *Ms* sıcaklığı aynı zamanda dönüşümün başlaması için gerekli olan kritik kimyasal itici gücün, ΔG_{kritik} mevcut olduğu sıcaklıktır. Diğer enerji türlerinin sistemde bulunmadığı durumda, dönüşümün gerçekleşmesi için kimyasal serbest enerji değişimi $\Delta G_{kimyasal}$'ın kritik kimyasal itici güç ΔG_{kritik}'e eşit veya ΔG_{kritik}'den büyük olması gerekmektedir (Kaufman & Cohen, 1958; Poling, 2016; Schröder et al., 2018).

Şekil 2.2 grafikte görüleceği üzere, *Ms* ve M_S^σ arasındaki sıcaklık aralığında dönüşüm östenitteki elastik gerilme ile başlar ve bu dönüşüm "gerilme destekli dönüşüm" olarak adlandırılır. Bu sıcaklık aralığında, martensit dönüşümünün başlamasından dolayı akma, östenitin akma gerilimi olan σ_γ'nin altındaki gerilmelerde meydana gelir. M_S^σ üzerindeki sıcaklıklarda, akma σ_γ'ya ulaştığında kayma ile gerçekleşir ve martensit dönüşümünün başlaması için uygulanan gerilmenin σ_γ'ya eşit veya büyük olması gerekir. Gerinim kaynaklı

dönüşüm, M_S^σ ve M_d aralığındaki sıcaklıklarda gerçekleşir. Bu sıcaklık aralığında plastik deformasyon neticesinde martensitin çekirdeklenmesi için kayma bantlarının kesişim noktalarında güçlü çekirdeklenme bölgeleri oluşur. Kayma bantlarının kesişme noktalarında, kayma bantlarının içerisinde, tane sınırları ile kayma bantlarının kesişimlerinde, ε-martensit plakalarının kesiştiği noktalarda, ε-martensit plakasının içerisinde, ikizlenme plakalarının kesişim noktalarında ve hatta dislokasyon yığınlarında bu çekirdeklenme bölgeleri oluşabilir. M_d'nin üzerinde östenit plastik deformasyon kaynaklı dönüşüm ile martensite dönüşmeyecek kadar kararlıdır (G. Olson & M. Cohen, 1972). Anlaşılacağı üzere, genel olarak, α′ martensitin çekirdeklenme bölgeleri mikroyapıdaki çeşitli kafes hatalarından kaynaklanmaktadır. Bu kafes uyumsuzluğundan doğan yerel gerilmeler martensitik dönüşümü teşvik eder. Malzemenin deformasyon durumu, tane büyüklüğü, alaşım elementlerinin varlığı gibi birçok faktör martensit çekirdekleşme bölgelerini ve ayrıca dönüşüm karakteristiğini etkilemektedir.

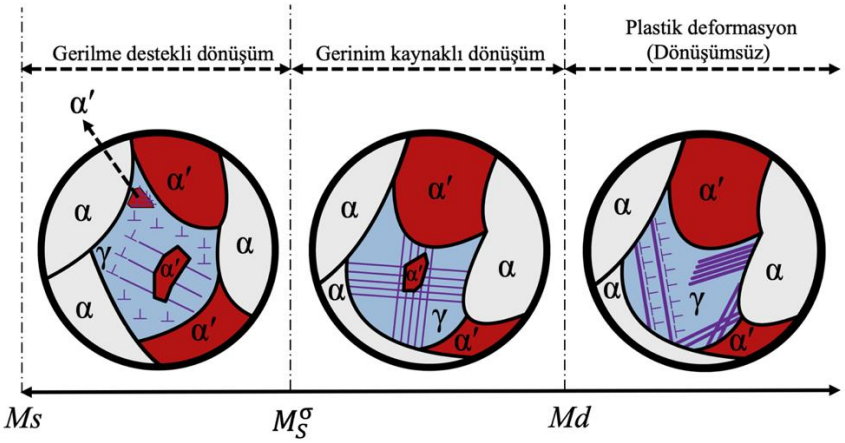


Şekil 2.2 Gerilme Destekli Dönüşüm Ve Gerinim Kaynaklı Dönüşüm Arasındaki İlişki. (Mukherjee et al., 2008)'den Uyarlanmıştır.

Martensitik dönüşüm geniş kayma bileşenleri içeren sabit-düzlem gerinimli şekil deformasyonu olarak düşünülebilir. Bu yüzden martensitik dönüşüm kristal kafes yapısında değişimle sonuçlanan bir deformasyon modu olarak görülebilir. Deformasyon veya diğer deyişle gerinim enerjisi, $U_{mekanik}$, dönüşümün gerçekleşmesinde kimyasal itici güce yardım eden bir ek mekanik itici güç olarak kabul edilebilir. Dışarıdan uygulanan gerilme ile gerçekleşen deformasyon ve ilgili mekanik itici güç sayesinde kimyasal itici gücün martensitik dönüşümü başlatabilecek kadar büyük olmamasına rağmen M_s sıcaklığının üzerinde martensit dönüşümü tetikleyerek başlatabilir. Diğer bir deyişle deformasyon kaynaklı martensitik dönüşüm deformasyon sırasında biriken gerinim enerjisinin dönüşüm yardımıyla yapıdan uzaklaştırılması olarak yorumlanabilir (Olson & Azrin, 1978).

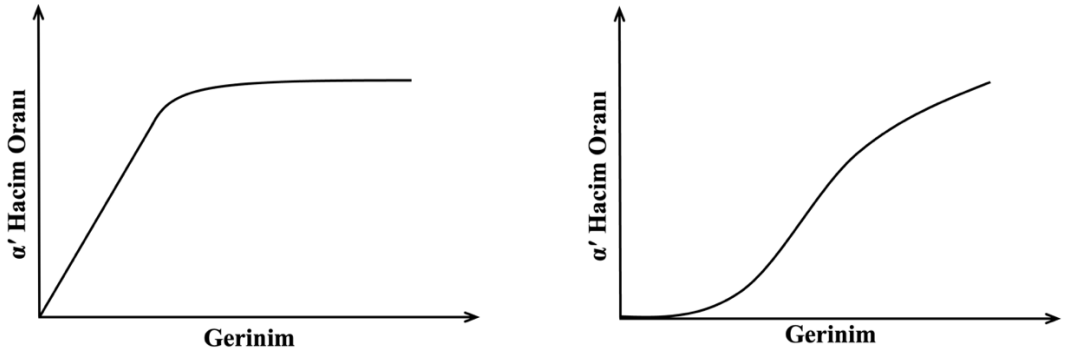
Kimyasal itici gücün büyüklüğü *Ms* sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklardaki artış ile doğrusal olarak azalır. Bundan dolayı martensit dönüşümünün *Ms* sıcaklığından yüksek sıcaklıklarda tetiklenebilmesi için sıcaklık artışıyla orantılı bir mekanik itici güç gerekmektedir. Bu ancak M_d sıcaklığına kadar geçerlidir. M_d sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda kimyasal itici güç çok küçüktür. Bundan dolayı $U_{mekanik} < \Delta G_{kritik} - \Delta G_{kimyasal}$ ve deformasyon artık martensitik dönüşümü tetikleyemez. *Ms* ve M_d arasındaki sıcaklıklarda östenitin deformasyon kaynaklı martensite dönüşümü iki şekilde olur. Şekil 2.2'de martensitik dönüşümün başlaması için gerekli olan kritik gerilme değişimini sıcaklığın bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Kararlı östenitin akma dayanımındaki sıcaklığa bağlı değişim de aynı grafik üzerinde kesikli çizgilerle gösterilmektedir. Anlaşılacağı üzere dönüşümün başlaması için gerekli olan kritik gerilme *Ms* ve M_S^σ sıcaklıkları aralığında M_S^σ'ya kadar sıcaklığın artmasıyla doğrusal olarak artmaktadır. Bununla birlikte bu sıcaklık bölgesindeki kritik gerilme, kararlı östenitin akma gerilmesinden düşüktür ve dönüşüm *Ms* sıcaklığının altındaki sıcaklıklara soğutulduğu takdirde dönüşümün gerçekleşmesine neden olacak aynı çekirdeklenme bölgelerinde heterojen çekirdeklenme ile gerçekleşir. Bu şekilde gerçekleşen dönüşüm, "gerilme destekli dönüşüm" olarak isimlendirilir. Gerilme destekli mekanizma ile östenitin martensite dönüştüğü maksimum sıcaklık M_S^σ'dır. Bu sıcaklıkta uygulanan kritik gerilme kararlı östenitin akma noktasına ulaşır ve bu sıcaklığın üzerinde martensitik dönüşümü tetikleyebilecek bir gerilme aynı zamanda östenitin kayma ile plastik deformasyona uğratabilecek kadar büyüktür. M_S^σ'dan daha büyük sıcaklıklarda, martensit dönüşüm plastik olarak deforme olmuş östenit fazının plastik deformasyonla ortaya çıkan yeni çekirdeklenme bölgelerinde gerçekleşir (Olson & Azrin, 1978; Olson & Sivarajan, 2017). Bu şekilde gerçekleşen

dönüşüm "gerinim kaynaklı dönüşüm" olarak isimlendirilir (Bleck et al., 2017). Yukarıda anlatılan mekanizmalar şematik olarak Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 *Ms*, M_S^σ ve M_d Sıcaklık Aralıklarında Kalıntı Östenitin Dönüşüm Ve Deformasyon Mekanizmaları. (De Cooman, 2004; Sugimoto & Mukherjee, 2017)'den Uyarlanmıştır.

M_S^σ, sıcaklığına yakın sıcaklıklarda her iki mekanizma aynı anda etkindir. M_d sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda gerilim artsa bile deformasyon ile martensit dönüşümü gerçekleşemez ve östenit fazı gerilme etkisiyle yalnızca plastik olarak deforme olur. Kalıntı östenitin içerdiği düşük karbon miktarı veya östenitin kararlılığını etkileyen diğer faktörler *Ms*, M_S^σ ve M_d sıcaklıklarının yükselmesine neden olur (Olson & Sivarajan, 2017). Aşağıdaki şekilde deformasyon kaynaklı dönüşüm sonucunda çeliğin yapısında oluşan martensitin miktarının gerilme destekli ve gerinim kaynaklı olmasına bağlı olarak dönüşüm davranışı verilmiştir. Bu grafikten de anlaşılacağı üzere Şekil 2.4 a)'da gerilme destekli dönüşüm etkisi altında olan östenitte gerinimin artmasıyla dönüşen martensitin hacmi hızlı biçimde doğrusal olarak artar. Buna karşın Şekil 2.4 b)'de şematik gösterimi verilen gerinim kaynaklı östenitten martensite dönüşümde bu hızlı artış görülmez. Deformasyonun ilk safhalarında östenitten martensite dönüşüm deformasyon miktarı artmasına rağmen Şekil 2.4 a)'da olduğu gibi aniden artmazken ileri deformasyon safhalarında da logaritmik bir artış gösterir (Davut, 2013).



a) $Ms < T < M_S^\sigma$ b) $M_S^\sigma < T < M_d$

Şekil 2.4 a) Gerilim Destekli Ve B) Gerinim Kaynaklı Dönüşüme Bağlı Olarak Kalıntı Östenitin Martensite Dönüşüm Davranışının Karşılaştırılması (Davut, 2013)'ten Uyarlanmıştır.

3. Nesil İYDÇ'lerin sergilediği mükemmel mekanik özellikler yukarıda bahsedildiği üzere yarı kararlı östenitin deformasyon kaynaklı martensite dönüşümü ile ortaya çıkar. Dönüşümün bu olumlu etkisi büyük ölçüde kalıntı östenitin direncine ve kararlılığına bağlıdır. Eğer östenitin kararlılığı çok düşük veya çok yüksek ise şekil verme sırasında dengeli dönüşümün bu faydalı etkisinden yararlanılamayabilir. Bundan dolayı yalnızca kalıntı östenitin miktarı değil aynı zamanda östenitin kararlılığı da plastik deformasyon davranışı ve dolayısıyla şekil verilebilirlik üzerine etkilidir (Takahashi, 2020).

Tahmin edileceği üzere kalıntı östenitin dönüşümü için matematiksel model geliştirmek de mühendisler açısından önem arz etmektedir. Bu sayede sadece deformasyon kaynaklı dönüşümün anlaşılmasını mümkün kılmayacak ayrıca TRIP özelliği sergileyen çelikleri daha iyi dizayn etmemizi de sağlayacaktır. Kalıntı östenitin gerinim ile değişimini açıklayan ve tahmin eden birçok farklı model ortaya atılmıştır. Bunların arasında en çok kullanılanlardan biri ise Olson ve Cohen modelidir (Mansourinejad & Ketabchi, 2017).

Olson ve Cohen gerinim kaynaklı martensitik dönüşüm için geliştirilmiş bir sayısal modeldir. Yarı kararlı östenit fazındaki kayma bant kesişimlerinin martensitin gerinim kaynaklı çekirdeklenmesi için birincil bölgeleri oluşturduğunu kabul ederler. Bu modele göre gerçek gerinimin, ε, uygulanmasından sonra oluşan martensitin hacimsel oranı aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Olson & Cohen, 1975).

$$f_M = 1 - e^{\{-\beta_0[1-e^{-\alpha_0\varepsilon}]^{n_1}\}} \quad (2)$$

Yukarıdaki eşitlikte, β_0, martensit çekirdeklenme ve bunu izleyen dönüşüme sebep olacak kayma bantlarının kesişme olasılığı ile ilgili katsayıyı ifade etmektedir. Bu ifade aynı zamanda östenitten martensite dönüşüm için gerekli olan itici güç olan $\Delta G_{\gamma\rightarrow\alpha'}$ bağlıdır. α_0, gerinimden bağımsız bir sabittir ve kayma bantlarının oluşum hızını ifade etmektedir. n_1 ise ≥ 2 olan bir sabittir. Örnek olarak, Angel tarafından çalışılan çeliklerde 4,5 değeri uygun görülmüştür. n_1 değeri dönüşüm kinetiğini etkileyen malzeme ve üretim parametrelerinden etkilenir. Olson-Cohen modelinin geliştirilmesi için gerilme koşulu ve gerinme hızı gibi kritik faktörleri de dikkate alan farklı çalışmalar da yapılmıştır (Liu et al., 2018). Dönüşüm kaynaklı plastisite davranışını tanımlayan derin ilişkiyi kurabilmek ve anlayabilmek 3. Nesil İYDÇ'lerin tasarımında ve üretildikten sonra etkili olarak kullanılmasında önemli avantaj sağlar.

2.1. Kalıntı Östenit Kararlılığını Kontrol Eden Etkenler

Hem gerilme yardımlı hem de gerinim kaynaklı martensitik dönüşümün kaynağı γ_K'dir. Bu sebeple kalıntı östenitin kararlılığını etkileyen faktörlerin anlaşılması önem arz etmektedir. γ_K'nin kararlılığını etkileyen birçok etken vardır (Chiang et al., 2015). Bu etkenler tek tek etki edebileceği gibi farklı etkenlerin östenit kararlılığına müşterek etkisi de göz ardı edilmemelidir (Belde et al., 2016; Bhadeshia, 2002). Östenit kararlılığını etkileyen bu faktörlerden bazılarını içeren diyagram Şekil 2.5'de verilmiştir.



Şekil 2.5 Kalıntı Östenit Kararlılığını Etkileyen Faktörlerden Bazıları. (Pereloma et al., 2016)'dan Uyarlanmıştır.

3. Nesil çelikler üzerine yapılan çalışmalarda tüm bu etkenlerin göz önünde bulundurulması gerektiğinden üretilen çeliklerin 30 GPax% ve daha yüksek DSÇ değerlerine ulaşması kolay değildir (Yi et al., 2018). γ_K'nin kararlılığını etkileyen faktörlerden en önemlileri aşağıda incelenmektedir.

2.1.1. Tane boyutu

Yapılan pek çok çalışma γ_K kararlılığı ile γ_K'nin tane boyutu arasında ters orantılı bir ilişki olduğunu göstermiştir. Yani, γ_K'nin tane boyutu ne kadar küçükse gerinim halinde martensitik dönüşüme de bir o kadar mekanik direnç gösterecektir (Zhang et al., 2017). İri tane boyutuna sahip γ_K'lerin kararlılığı düşük olduğundan dolayı düşük gerinimler altında bile kolayca martensite dönüşecek, toplam sünekliğe ve dolayısıyla TRIP etkisine katkısı oldukça kısıtlı olacaktır (Xie et al., 2014; Zhang & Findley, 2013). Dikkat edilmesi gereken bir başka husus ise γ_K tanelerinin boyutlarının çok küçük olmaması gerektiğidir. Çok küçük ve dolayısıyla ince γ_K taneleri malzeme koptuktan sonra bile martensite dönüşmemiş halde mikroyapıda kalabilmekte ve bu tanelerin TRIP etkisine katkısı olmamaktadır (Li et al., 2017). Östenitin kimyasal kararlılığının rolü bir kenara bırakıldığında, γ_K tane boyutunun küçülmesinin martensitin dönüşümünü tetikleyebilecek potansiyel çekirdeklenme bölgelerinin azalmasını yanında getireceğini göz önünde bulundurmak gerekir. Çünkü küçülen tane boyutu martensit dönüşüm ile birlikte ortaya çıkacak olan plastik rahatlamayı ve beraberindeki martensit çıtasının/plakasının büyümesini engellemekte ve martensitin ara yüzey enerjisini kontrol ederek dolaylı olarak *Ms* sıcaklığını etkilemektedir (Wang & Van Der Zwaag, 2001; Zinsaz-Borujerdi et al., 2018). γ_K önemli oranda deforme edilerek östeniti alt tanelere ayıran mikrobantlar, istif hataları, kayma bantları ve alt tane formasyonları gibi yeni çekirdeklenme bölgeleri oluştuğunda, γ_K'nin deformasyon kaynaklı martensite dönüşümü artar (Ma et al., 2016). Çünkü bu yeni oluşan alt taneler etkili heterojen çekirdeklenme bölgelerinden müstesnadır. Ayrıca yeni oluşan alt taneler etraflarındaki tanelerin dönüşümünü engellerler. Bunlara ek olarak, mekanik olarak ferrit/γ_K ara yüzeyinin yarı-uyumlu doğası martensitik dönüşüm için gerekli olan homojen olmayan kayma tipi bir sabit kristal kafes deformasyonuna izin vermemektedir (Liu et al., 2018).

2.1.2. Kimyasal kompozisyonun etkisi

Alaşım elementlerinin kalıntı östenit kararlılığı üzerine etkisinin belirlenmesi için araştırmacılar tarafından birçok ampirik formül türetilmiştir. Bunların arasında en çok kullanılan yaklaşımlardan biri Barbier'in *Ms* sıcaklığının belirlenmesi için ortaya attığı formüldür (Barbier, 2014).

$$Ms = 545 - 601{,}2x(1 - e^{-0{,}868x\%C}) - 34{,}4x\%Mn - 13{,}7x\%Si - 9{,}2x\%Cr - 17.3xNi\% - 15{,}4x\%Mo + 10{,}8x\%V + 4{,}7x\%Co - 1.4x\%Al - 16{,}3x\%Cu - 361xNb\% - 2{,}44x\%Ti - 3448x\%B \quad (3)$$

Bu formülden de anlaşılacağı üzere tüm östenit kararlaştırıcı elementler arasında, *Ms* sıcaklığını aşağı çekmesi dolayısıyla da kalıntı östenitin miktarını ve kararlılığını etkilemesinden ötürü karbon (C) ve mangan (Mn) en etkili östenit kararlaştırıcılardır. Kobalt (Co) ve vanadyum (V) dışında formüldeki diğer elementlerin östenitin atermal dönüşüm sıcaklığını düşürdüğü görülmektedir. Kimyasal kompozisyon östenit ve martensit arasındaki kimyasal enerji farkını değiştirerek östenitin kararlılığını doğrudan etkilemektedir. Bu eşitlik ile ilgili denklem aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir (Bhadeshia, 1981a, 1981b; Krizan & De Cooman, 2008).

$$\Delta G_{chem}^{\gamma \to \alpha'} = -7381.6 + 69447\, X_c + 19296 X_{Mn} - 38776 X_c X_{Mn} + (6.7821 - 33.45 X_c) T\ J/mol \quad (4)$$

X_c, karbonun ve X_{Mn}, manganın mol hacim oranını ifade ederken T ise Kelvin cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir.

Ayrıca alüminyum ve silisyum gibi ferrit kararlaştırıcı elementler, östenitin içindeki karbonun ayrılarak yapıda karbür olarak çökelmesini geciktirmekte ve hatta tamamen baskılayabilmekte ve böylece östenitin karbonca zenginleşmesini sağlamaktadır. Bu sebeple bu elementler östenit kararlılığını olumlu yönde etkilemektedir.

2.1.3. Kalıntı östenitin morfolojisi ve komşu fazların rolü

Kalıntı östenit morfolojisi genel olarak iki kategoriye ayrılabilir. Yüksek kararlılığa sahip film östenit ve düşük kararlılığa sahip blok östenit. Film ve blok östenit arasındaki farklılık genellikle östeniti çevreleyen matriksin içerdiği fazlara bağlı olmakla birlikte film östenitin daha fazla karbon içeriğine sahip olduğu bilinmektedir (Lu et al., 2020; Xie et al., 2014). Bununla birlikte blok östenitin film östenitten daha fazla karbon içerdiğine dair az sayıda da olsa bazı araştırmalar da söz konusudur (Xiong et al., 2013). Araştırmalardaki karbon oranlarının farklılığın sebebinin bu östenitleri çevreleyen matriksin farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Blok östenit tanelerinin genellikle yumuşak ferrit matriks içerisinde bulunduğu gözlemlenmiştir (G. Q. Li et al., 2022). Karbon, ara kritik (AK) tavlama sırasında ferritten östenite difüze olurken blok östenit karbonla yüksek oranda zenginleşir (Kamoutsi et al., 2015). Film östenit ise genellikle martensit çıtaları arasında kalır (Min et al., 2016). Çünkü östenitin bir kısmı soğuma sırasında martensite dönüşmekte ve bu da düşük karbonlu film östenitle sonuçlanabilmektedir. Bu az sayıdaki çalışmalarda her ne kadar film östenitin düşük karbon miktarına sahip olduğu bildirilse de iki sebepten yüksek mekanik kararlılık göstermiştir. Bunlardan ilki kalıntı gerilmeden kaynaklanan

yüksek hidrostatik basınçtır. Martensitik dönüşüm hacimsel genişlemeyi de içerdiğinden kalıntı gerilim kaynaklı yüksek basınç dönüşümü oldukça zorlaştırır (Chen et al., 2020). İkincisi ise "kalkan etkisi" olarak bilinmektedir (Wu et al., 2015). Yüksek sertliğe sahip martensit çıtaları/plakaları arasında sıkışan ince film östenitin bu fazların kalkan etkisi göstermesi sebebiyle dönüşümü zorlaşır. Küçük tane boyutu, yüksek dislokasyon oranı ve içerdiği karbon nedeniyle martensit ferritten çok daha yüksek dayanım değerine sahiptir. Bu sebeple komşu film östenitin dönüşümüne izin verecek bir hacimsel genişlemenin öncelikle martensiti deforme edebilmesi gerekmektedir. Bu ise oldukça yüksek bir gerilim gerektirmektedir. Sonuç olarak, martensit çıtaları kalkan görevi görerek film östeniti deformasyon kaynaklı martensitik dönüşüme karşı korumaktadır. Bu yüzden film östenit daha düşük karbon oranına sahip olmasına rağmen blok östenitten daha geç dönüşmekte veya hiç dönüşmemektedir (P. J. Jacques et al., 2001; Wang et al., 2022; Xiong et al., 2013). Tabi ki östenit kararlılığını aynı anda etkileyen birçok farklı faktör vardır ve tüm bu faktörlerin birlikte veya ayrı ayrı etkisini göz önünde bulundurmak gerekmektedir.

2.1.4. γ_K yönlenimi ve gerilim düzeyi

γ_K yönlenimi üzerine yapılan çalışmalar oldukça azdır. Bununla birlikte bazı mikro mekanik model kullanılan çalışmalar tane yönleniminin deformasyon kaynaklı martensitik dönüşümü etkilediğini göstermiştir (Reisner et al., 1997). Örneğin, ferrit içerisinde bulunan γ_K tanelerinin Schmid faktörünün en yüksek olduğu bulunmuştur. Bu sebeple östenit tanelerinin Schmid faktörünü azaltmak için bir rotasyon hareketi yaptığı ve bunun da deformasyon kaynaklı martensitik dönüşümü geciktirdiği bildirilmiştir (Tirumalasetty et al., 2012).

Yine bir başka çalışmada çekme gerilmesine maruz kalan γ_K tanelerinin basma gerilmesine maruz kalan tanelere göre daha fazla dönüştüğü gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin ise uygulanan yükün dik bileşeninin çekmede pozitif basmada ise negatif olması olduğu düşünülmektedir. Çünkü martensitik dönüşüm genel itibariyle bir hacimsel genişlemeyi içermektedir ve basma kuvveti bu hacimsel genişlemeyi sınırlandırmaktadır (Tirumalasetty et al., 2012). Yine düzlemsel gerinim durumunda tek yönlü olan çekme gerilmesine kıyasla martensitik dönüşüm daha geç başlamaktayken çift eksenli gerilme durumunda tek eksenli çekme koşullarına kıyasla γ_K dönüşümü daha hızlı olmaktadır (Im et al., 2002; Sugimoto et al., 1995).

2.1.5. Plastik deformasyonun etkisi

Ara kritik sıcaklık bölgesinde östenitin deformasyon ile sertleşmesi östenitin martensite dönüşümü için gerekli olan hacimsel genişlemeden kaynaklanan şekil değişimini zorlaştırdığı için *Ms* sıcaklığını düşürmektedir (Zhao & Jiang, 2018). Bu sebeple deforme edilmiş γ_K'nin deforme edilmemiş γ_K'ye kıyasla dönüşüme karşı daha kararlı olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte, deformasyonun miktarı nihai mikroyapısal incelmeyi de etkilemektedir. Örneğin, ara kritik sıcaklık bölgesinde artan miktarda deformasyon uygulanması heterojen çekirdeklenme bölgelerini artıracağından nihai mikroyapıda ferrit dönüşüm hızının artmasına ve daha ince ferrit tanelerinin oluşmasına neden olacaktır. Böylece bir sonraki ısıl işlem aşaması olan izotermal beynitik tutma bölgesinde oluşacak γ_K'lerin kararlılığını ve morfolojisini etkileyecektir (Basuki & Aernoudt, 1999). Bu ise daha sonraki deformasyon aşamalarında etkili bir TRIP mekanizmasının ortaya çıkmasını sağlayacaktır. Özetle, fazların morfolojisi ara kritik bölgede yapılacak termomekanik işlemler ile kontrollü şekilde deformasyona uğratılarak da değiştirilebilir. Bu bölgede yapılacak yüksek oranda deformasyon işlemleri sonucunda kalıntı östenitin hacim oranının arttığı ve genel çelik mikroyapısında da tane küçülmesi görüldüğü bildirilmiştir (P. Jacques et al., 2001).

2.1.6. İlk östenit tane boyutunun etkisi

İlk östenit tane boyutu, özellikle izotermal tutma ısıl işlemi sürecinde potansiyel tane sınırı beynit çekirdeklenme bölgelerinin sayısını etkilemektedir. Büyük ilk östenit tane boyutuna sahip çelik izotermal tutma sırasında daha hızlı beynitik dönüşüm geçirecek ve daha fazla miktarda beynit elde edilmesini sağlayacaktır. Büyük ilk östenit tanelerinin daha az çekirdeklenme bölgesi ihtiva etmesinden dolayı oluşacak beynit miktarının az olacağını belirten çalışmalar olsa da östenit tanesi boyunca beynit demetlerinin büyüyecek alana sahip olmasının beynit kinetiğini olumlu etkilediği düşünülmektedir. Ancak bu çalışmalar genellikle *Ms* sıcaklığının üzerindeki dönüşümlere odaklanmıştır ve Q&P Çeliklerinin literatüre girmesiyle *Ms* sıcaklığının altında yapılan izotermal tutma sürecinin etkisinin de detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir (Dhara et al., 2022; Tian et al., 2019).

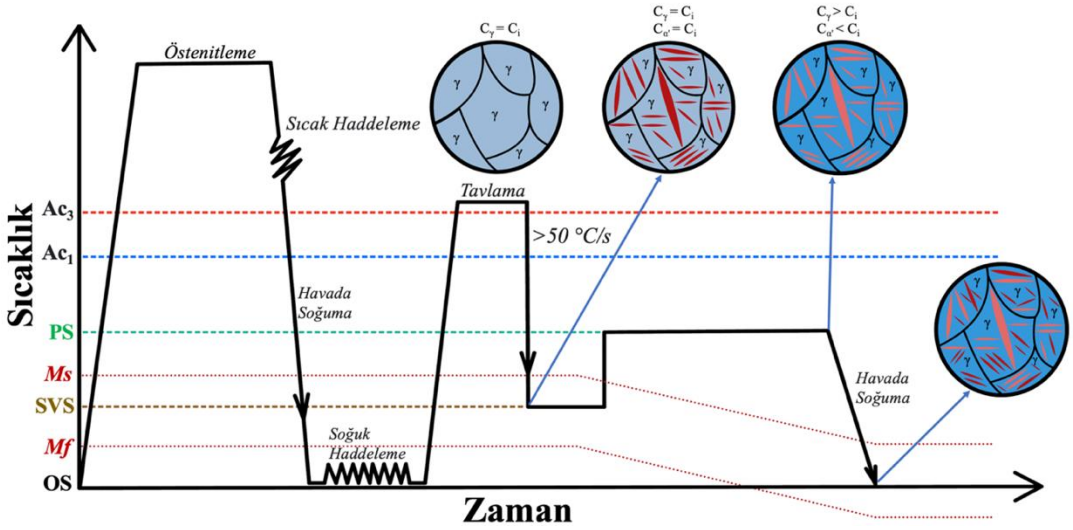
Östenitin dönüşüm ürünleri olan hem martensitin hem de beynitin dönüşüm kinetiği ve morfolojisi kısmen ilk östenit tane boyutuna bağlıdır. Ayrıca ilk östenit tane boyutunun incelmesinin martensit ve beynit başlangıç sıcaklıklarını aşağı çektiği görülmüştür. İncelen ilk östenit tane boyutunun östenitin plastik deformasyonunu zorlaştırdığı için martensitik dönüşüm için gerekli olan kayma gerinimini engellediği ve bu yüzden de *Ms* sıcaklığını daha aşağı çektiği düşünülmektedir. İlk östenit tane boyutu martensitin morfolojisini etkilemektedir. Ayrıca Nb ve V gibi mikro-alaşım elementleri de ilk östenit tane boyutunu inceltteceği için hem dönüşüm kinetiğini etkilemekte hem de çeliğin tokluğunu artırmaktadır (Dhara et al., 2022).

3. 3. Nesil İleri Yüksek Dayanımlı Çelikler

3. Nesil İYDÇ'lerin üretimi için pek çok farklı alaşım sistemi ve ısıl işlem yöntemi denenmektedir. Özellikle karmaşık ısıl işlem prosedürlerinin sonucunda oldukça başarılı sonuçlar elde edilmesine rağmen kullanılan prosedürlerin çoğu yıllardır var olan ve otomotiv sacı üretiminde kullanılan sürekli döküm (SDH), sürekli tavlama (STH) ve galvaniz tavlama (GTH) hatlarına henüz uygun değildir (Ma, 2017; Matlock & Speer, 2010). Aynı zamanda 3. Nesil İYDÇ'lerin üretim süreçleri genellikle optimum özellikleri sundukları ve "işlem penceresi" olarak bilinen çok dar bir ısıl işlem aralığına proses aralığına sahiptir (Bhadhon et al., 2022). Bu sebeple ticarileşmiş veya ticarileşme aşamasında olan 3. Nesil İYDÇ türleri oldukça sınırlıdır. Bu çelik türlerinin mikroyapısal ve mekanik özelliklerine, avantajlı ve dezavantajlı noktalarına ve ayrıca üretim yöntemlerine hâkim olmak gelecekte üretilmesi hedeflenen yeni nesil İYDÇ'ler için araştırmacılara parlak fikirler sunacaktır.

3.1. Su Verme ve Paylaştırma (SV ve P) Çeliği

Su verme ve paylaştırma çeliği (SV ve P) veya yaygın kullanımıyla Q&P Çelikleri ilk olarak 2003 yılında Speer tarafından ortaya atılmıştır (Speer et al., 2003). Q&P çeliği mikroyapısal olarak genellikle ferritten, karbonca zenginleşmiş östenitten ve temperlenmiş martensitten oluşmaktadır (Kumar, 2022). Kalıntı östenit hacim oranı %5 ile %20 arasında değişmektedir (Wang & Speer, 2013). İlk olarak martensitik çeliklerde kalıntı östenitin karbonca zenginleşmesini sağlayan ve martensitte karbür çökelmesini elimine edip karbonu östenite paylaştırarak martensitin karbonca aşırı doymasını engelleyen bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır (Matas & Hehemann, 1960). Bununla birlikte martensitik çeliklerde kullanılan, östenitin ayrışmasını ve karbürün çökelmesini hedef alan su verme ve temperleme ısıl işleminden farklı olarak Q&P Çeliklerinde, östenit ayrışmasını ve karbür çökelmesini baskılamak için görece yüksek miktarlarda Al ve Si kullanılmakta ve karbonca zenginleşmiş östenit elde edilmesi sağlanmaktadır (Yan et al., 2015). Q&P Çeliklerinin mikroyapısındaki sert ve kırılgan martensit yüksek dayanım değerleri vadederken yapıdaki γ_K ise güçlü bir TRIP etkisi sağlar ve böylece Q&P Çelikleri, yüksek dayanım sağlarken iyi sünekliği de bir araya getirir (Van Bohemen, 2012). Q&P Çeliklerinin üretim aşaması ve mikroyapı değişimi Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Q&P Çelik üretim prosesinin şematik gösterimi. Bordo ve pembe renkli fazlar farklı karbon oranına sahip martensit plakalarını göstermektedir. (Matlock et al., 2003)'ten uyarlanmıştır.

Q&P çeliği üretim prosesi ilk olarak tam veya ara kritik bölgede kısmi bir östenitleme ile başlar. Prosesin kısmi östenitleme ile başlaması durumunda bir miktar ferrit oluşacağından geri kalan östenit karbonca daha fazla zenginleşecektir. Tam östenitleme ya da kısmi östenitleme bölgesinde belli bir süre tutulan çelik sonrasında hızlıca su verilerek oda sıcaklığına soğutulmak yerine, *Ms* ve martensitik dönüşüm bitiş sıcaklığı (*Mf*) arasında bir su verme sıcaklığına (SVS) soğutulur. Böylece bu sıcaklıkta mikroyapıda su verilmiş martensit, atermal dönüşüm tamamlanmadığı için dönüşmemiş östenit ve eğer çelik başlangıçta ara kritik bölgeden soğutulmuşsa bir miktar da ferrit bulunur. Burada bir süre tutulan çelik sonrasında paylaştırma prosesi için ya aynı sıcaklıkta tutulur (tek adım SV ve P) veya *Ms* sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa çıkartılarak karbonca aşırı doymuş martensitten östenite karbon

paylaşımı sağlanır (iki adımlı SV ve P). Paylaştırma prosesi bittiğinde çelik oda sıcaklığına soğutulur. Bu soğuma sırasında östenit taneleri karbonca zenginleştiği için atermal martensit dönüşümüne karşı dirençlidir ve soğuma sırasında martensite dönüşüm oldukça sınırlıdır (Dai et al., 2021; Gao et al., 2014; Zinsaz-Borujerdi et al., 2018).

Q&P Çeliklerinin üretimi ara bir sıcaklığa su vermeyi içerdiğinden görece karmaşıktır. Q&P üretim parametreleri östenitleme sıcaklığı, zamanı, su verme sıcaklığı (SVS), paylaştırma sıcaklığı (PS) ve paylaştırma süresidir. Bu parametrelere dikkat edilerek oldukça yüksek mekanik özellikler sergileyen Q&P Çelikleri üretilebilmektedir (Taub et al., 2019).

3.1.1. Östenitleme sıcaklığı

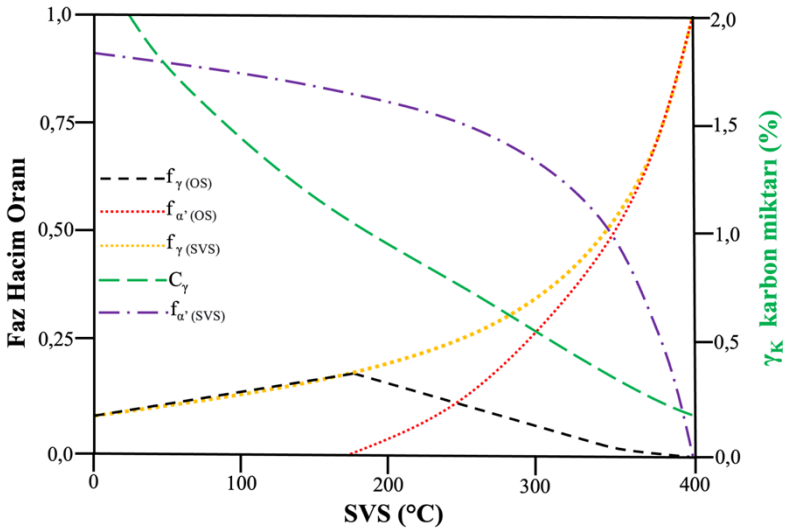
Q&P Çeliklerinde östenitleme için genellikle tam östenitleme yani Ac_3 sıcaklığının üstü seçilmektedir. Östenitin oluşumu ve yeniden kristalleşmesi ve başlangıç yapısında var olan karbürlerin çözülmesi bu aşamada gerçekleşir. Östenitleme sıcaklığı ve süresinin iyi seçilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde tane büyümesi meydana geleceğinden nihai mikroyapıdaki kalıntı östenitin miktarı ve kararlılığı azalacaktır. Zaten çoğunlukla tam östenitlemeden ziyade Q&P980'in üretiminde de kullanılan ara kritik tavlama ısıl işlemi tercih edilmektedir. Ara kritik sıcaklık seçimiyle ilgili de iki farklı görüş vardır. Bunlardan ilki ara kritik ısıl işlemin ferritten östenite karbon paylaşımını mümkün kıldığı için östenit kararlılığını artıracağını savunurken, diğer bir görüş ara kritik ısıl işlem sonucunda oluşan kaba ferrit tanelerinin Q&P çeliğinin mekanik özelliklerini azaltacağını savunmaktadır. Bununla birlikte en iyi özelliklerin önceki östenit tane büyüklüğünü azaltmasından ötürü Ac_3 bölgesine yakın sıcaklıklarda yapılan tavlamalarda elde edildiği bildirilmektedir (De Moor, Speer, et al., 2011; Soleimani et al., 2020).

3.1.2. Su verme sıcaklığı

Su verme sıcaklığı veya SVS, nihai mikroyapıda elde edilecek kalıntı östenitin faz hacim oranını direkt etkilediği için Q&P prosesinde büyük önem arz etmektedir. Her ne kadar martensitten östenite tam karbon paylaşımını varsayıp paylaştırma kinetiğini dikkate almasa da mikroyapıdaki maksimum kalıntı östenit miktarının SVS'nin bir fonksiyonu olarak belirlenmesini sağlayan oldukça başarılı bir model geliştirilmiştir. Bu model Koistinen-Marburger (K-M) ampirik formülünü dikkate alarak SVS'nin bir fonksiyonu olarak farklı sıcaklıklarda yaklaşık östenit ve martensit hacim oranlarının tahmin edilmesini sağlar (Bleck et al., 2017; Kang et al., 2016).

$$f_{\alpha'} = 1 - \left(e^{-\alpha'(Ms-T)}\right) \tag{5}$$

$f_{\alpha'}$, su verme sonrasında östenitten martensite dönüşen faz hacim oranı iken α, 0,011 olarak alınan bir ampirik sabittir. T ise oda sıcaklığıdır. *Ms* ise yukarıdaki Denklem 5 ile hesaplanabilen ve çeliğin kimyasal kompozisyonuna bağlı atermal martensit dönüşüm sıcaklığıdır. Böylece ara kritik tavlamadan sonra ve hızla oda sıcaklığına su verildiğinde oluşması beklenen γ_K değeri hesaplanır. Bu değer başlangıç değeri olarak alındıktan sonra model tekrar uygulanır. Bu defa *Ms* oda sıcaklığı seçilir ve böylece karbonca zenginleşmiş kalıntı östenit içeren çeliğin oda sıcaklığına soğutulduğunda yapısında bulunması beklenen γ_K miktarı tespit edilmiş olur. Şekil 3.2'de görüleceği üzere γ_K miktarı ilk olarak artan SVS ile artarken, daha yüksek sıcaklıklarda artan sıcaklıkla birlikte martensit miktarı ve dolayısıyla östenite paylaştırılacak karbon miktarı azalacağından paylaştırma prosesinden sonra oda sıcaklığına soğutulan çelikteki kalıntı östenit miktarı azalacaktır. Optimum SVS'nin yapıda maksimum γ_K sağlayacak sıcaklık olduğu kabul edilmektedir. Bununla birlikte Q&P Çelikleri üzerine yürütülen çalışmalar maksimum kalıntı östenit miktarının her zaman en iyi mekanik özellikleri sunmayabileceğini göstermiştir. Bu çelişkinin sebebinin kalıntı östenitin miktarı kadar kararlılığının da çeliğin mekanik özellikleri üzerinde rol oynaması olduğu düşünülmektedir (Dai et al., 2021).



Şekil 3.2 Q&P Çeliklerinde SVS'nin bir fonksiyonu olarak nihai mikroyapıda oluşması beklenen fazların faz hacim oranları ve γ_K'nin karbon içeriği. $f_{\gamma\,(OS)}$, $f_{\alpha'\,(OS)}$, $f_{\gamma\,(SVS)}$, $f_{\alpha'\,(SVS)}$ ve C_γ sırasıyla, oda sıcaklığında mikroyapıda bulunan γ_K miktarını, oda sıcaklığında mikroyapıda bulunan martensit miktarını, su verme sıcaklığında mikroyapıda bulunan γ_K miktarını, su verme sıcaklığında mikroyapıda bulunan martensit miktarını ve γ_K'nin içerdiği karbon miktarının SVS'ye bağlı olarak değişimini göstermektedir. (Dai et al., 2021)'den uyarlanmıştır.

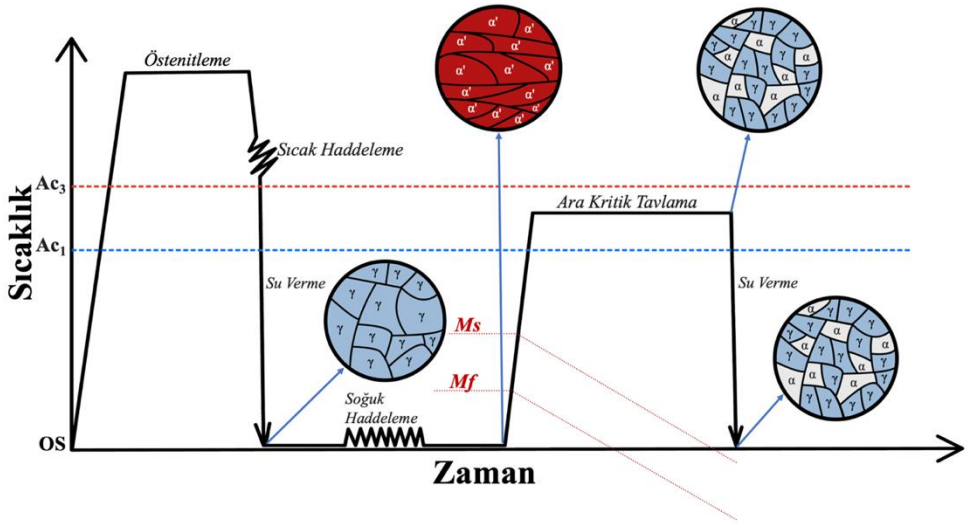
3.1.3. Paylaştırma sıcaklığı ve süresi

Paylaştırma sıcaklığı ve süresi martensitten östenite karbon paylaşım sürecini önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca bu ısıl işlem adımında beynitik dönüşüm de görülebilmektedir. Bununla birlikte beynitik dönüşümün, paylaştırma prosesinde karbon paylaştırma sürecini geciktirdiği ve γ_K'nin kararlılığını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Paylaştırma sürecinde beynitik dönüşümden kaçınmak her ne kadar zor olsa da yavaş dönüşüm kinetiğine sahip olmasından dolayı nihai mikroyapıda çoğunlukla beynit göz ardı edilebilecek kadar azdır. Bununla beraber çelikte özellikleri iyileştirmek için beynit temelli Q&P Çelikleri de geliştirilmiştir. Özellikle bu yolla nihai mikroyapıdaki östenit tanelerinin inceldiği ve bunun da tokluğu iyileştirdiği görülmüştür (Dhara et al., 2022).

Q&P Çelikleri, 1. Nesil İYDÇ'lere kıyasla γ_K'nin sunduğu sürekli TRIP etkisi dolayısıyla çok daha iyi deformasyon sertleşmesi kapasitesi, şekil verilebilirlik ve süneklik değerleri sunarlar. Bu üstün özellikleri dolayısıyla Q&P980 çeliği ticarileşmiş ve araçların B-sütunu, ön tampon ve ön göğüs enine kiriş güçlendirmelerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Martensitik çeliklerle karşılaştırıldığında (MS980), Q&P980 benzer dayanım değerleri sunarken süneklik olarak %20 uzama göstermesinden dolayı MS980'e kıyasla yaklaşık 6 kat daha fazladır. Bununla birlikte Q&P Çeliklerinin var olan hatlarda üretimi oldukça zor olmasından dolayı ilerleyen süreçte bu hatların Q&P Çeliklerini üretmek için uygun hale getirilmesi üzerine çalışılmaktadır (Wang & Speer, 2013).

3.2. Orta Manganlı Çelikler

İlk olarak 1970'lerde Miller tarafından geliştirilen Orta Manganlı Çelikler ısıl işlem parametrelerine göre yalnızca γ_K'den, γ_K ve ferritten veya γ_K, ferrit ve/veya martensitten oluşabilmektedir. Orta Manganlı TRIP Çelikleri olarak da adlandırılan bu çelikler yapısında %4 ile %12 arasında Mn içerirler. Bu çelik sınıfı 1 GPa üzerinde dayanım sağlayabilirken %25'ten fazla üniform uzama gösterebilirler. Geleneksel TRIP çeliklerine kıyasla 2-6 kat arası daha fazla Mn içeren bu çelikler geleneksel TRIP çeliklerinden çok daha yüksek γ_K hacim oranına sahiptirler. Orta Mn'lı çeliklerin deformasyon mekanizması modu önemli ölçüde içerdikleri Mn oranına ve barındırdıkları istif hatası enerjisine (IHE) bağlıdır. Örneğin, IHE 20 mJ/m^2'den daha düşük olduğunda TRIP mekanizması ektinken, 20-40 mJ/m^2 arasında TRIP ve TWIP mekanizmaları aynı anda etkili olabilmektedir. Bu da Orta Manganlı Çeliklerin sıra dışı DSÇ değerlerine sahip olmasını sağlar (Lee & De Cooman, 2015; Ma, 2017). Orta Manganlı Çeliklere uygulanan termomekanik ve ısıl işlemler Şekil 3.3'de gösterilmiştir.

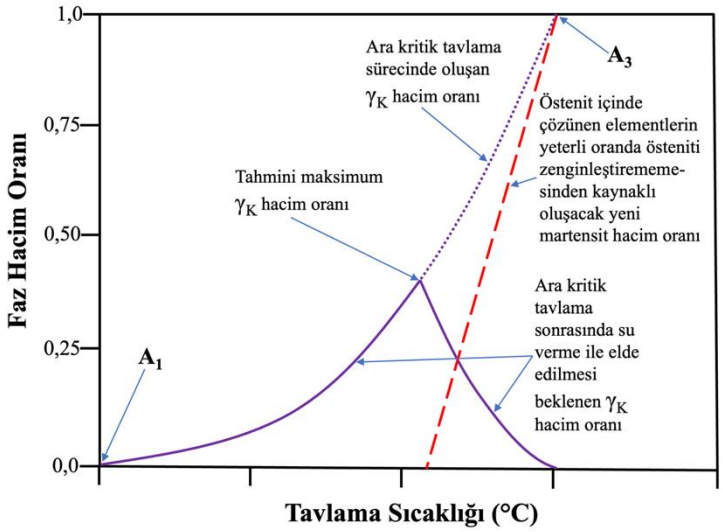


Şekil 3.3 Orta Mn'lı TRIP çeliklerinin üretiminde kullanılan termomekanik ve ısıl işlem prosedürlerinin şematik olarak gösterimi. (Soleimani et al., 2020)'den uyarlanmıştır.

3.2.1. Östeniti geri getiren dönüşüm (öggd) ısıl işlemi

Orta Manganlı TRIP Çeliklerinin üretiminde en sık kullanılan ısıl işlem östeniti-geri getiren-dönüşüm (ÖGGD veya bilinen kısaltmasıyla ART) ısıl işlemidir. Bu ısıl işlemde genellikle soğuk haddelenmiş ve martensit başlangıç mikroyapısına sahip sac, ara kritik bölgeye veya Ac_3 sıcaklığının üzerine ısıtılarak östenitin oluşmasına izin verecek bir süre boyunca izotermal olarak tavlanır ve bu sürenin sonunda su verilerek oda sıcaklığına soğutulur (Shi et al., 2010). İzotermal AK tavlama sırasında karbonun ve manganın martensitten östenite doğru difüzyonu gerçekleşirken östenit katı çözelti sertleşmesi ile dayanım artışı da kazanmaktadır. Diğer yandan martensit ve östenit ara yüzeyindeki kısa mesafeli Mn segregasyonu östenitin büyümesine de neden olur. Sonuç olarak ÖGGD ısıl işlemi Orta Manganlı Çeliklerin istenilen özelliklere uygun hale getirilmesinde kilit role sahiptir (Lee et al., 2011).

ÖGGD ısıl işleminde sıcaklık ve süre çeliğin mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde iki önemli parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. De Moor ve arkadaşları, ÖGGD ısıl işlem sıcaklığının bir fonksiyonu olarak oda sıcaklığında elde edilebilecek maksimum kalıntı östenit miktarını belirleyen bir model oluşturmuşlardır. Bu model yaygın olarak Orta Manganlı TRIP Çeliklerinin üretiminde kullanılmaktadır. Ara kritik bölgede izotermal tutma ile oluşan östenit miktarı sıcaklık arttıkça artmaktadır. Bununla birlikte östenite difüze olan C ve Mn miktarı ise artan sıcaklıkla azalmaktadır. Bu ise çeliğe ara kritik bölgeden su verildiğinde östenitin nihai mikroyapıda kalmasını zorlaştırıp martensit oluşum riskini artırmaktadır (De Moor, Matlock, et al., 2011). Şekil 3.4'deki modelden de anlaşılacağı üzere östenit miktarı ilk olarak artan ÖGGD sıcaklığıyla beraber artarken pik değerine ulaştıktan sonra artan sıcaklıkla beraber düşüş göstermektedir (Cai et al., 2014; Li et al., 2016). Optimum ÖGGD sıcaklığı genellikle bu pik değeri veya bu pik değerinin yakınındaki sıcaklıktır. Bu sıcaklık değerlerinde yapılan ÖGGD ısıl işlemiyle döndürülen östenit embriyoları martensit çıta sınırlarında ve önceki östenit tane sınırlarında oluşmaya meyilli olduğundan tane yapısı çarpıcı biçimde incelmektedir. Bu tane incelmesi ise *Ms* sıcaklığını daha da düşürmektedir (Cao et al., 2011; Zhao et al., 2014). Bunun yanı sıra döndürülen östenitler haddeleme esnasında yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahip olmasına rağmen AK tavlama sırasında görece düşük sıcaklık ve tutma süresinden dolayı dislokasyonlar toparlanamamaktadır. Bu toparlanmayan dislokasyonlar difüzyon kanalları olarak davranarak ara yer atomlarını çeker ve karbonun östenite segregasyonunu artırır. Bu ise γ_K kararlılığını artırır. Orta Manganlı Çelikler, yüksek dayanım değerleri göstermesini genel olarak tane incelmesi ve alaşım elementlerinin fazlar arası yeniden dağılımına borçludur. Bu yüzden, ÖGGD ısıl işlem sıcaklığı bu çeliklerin mekanik özelliklerini çarpıcı biçimde etkilemektedir. ÖGGD ısıl işlem sıcaklığı arttıkça soğuk haddelenmiş mikroyapıdaki dislokasyonlar toparlanacağı için akma dayanımı düşecektir. Ayrıca artan ÖGGD ısıl işlem sıcaklığı nedeniyle östenit kararlılığı azalacağı için yüksek uzama değerlerine çıkabilmek için gerekli olan deformasyon kaynaklı martensitik dönüşüm gerçekleşemeyecek ve toplam uzama çarpıcı biçimde azalacaktır. Bu yüzden genellikle Orta Manganlı Çeliklerde ÖGGD ısıl işlem sıcaklığı soğuma sonucu elde edilebilecek maksimum kalıntı östenit miktarının hemen altında seçilmektedir (Ma, 2017; Zhao et al., 2014).



Şekil 3.4 Östenit kararlaştırıcı elementlerin ara kritik tavlama sıcaklığının bir fonksiyonu olarak östeniti zenginleştirerek γ_K oluşturması. (De Moor, Matlock, et al., 2011)'den uyarlanmıştır.

ÖGGD ısıl işlem süresi Orta Manganlı Çeliklerin mikroyapısı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Uzun ÖGGD süreleri çeliğin mikroyapısını önemli ölçüde değiştirmektedir. Örneğin yüksek sıcaklıkta uzun ÖGGD ısıl işlem süreleri ile γ_K miktarı artsa bile östenitin tane boyutu irileşecek ve γ_K'nin kararlılığı azalacaktır. Diğer yandan uzun süre düşük AK sıcaklıkta yapılan ÖGGD ısıl işlemi östenite doğru yüksek miktarda Mn ve C geçişine sebep olacak bu ise γ_K'yi çok kararlı hale getirdiği için γ_K dönüşemeyecek ve çeliğin etkili TRIP etkisi göstermesini engelleyecektir (Liu et al., 2019). Bu sebeple, optimum ÖGGD ısıl işlem süresi çok dikkatli seçilmeli ve iki zıt özellik arasında denge sağlanmalıdır (Zhao et al., 2014).

Orta Manganlı TRIP Çeliklerinin üretiminde alternatif termomekanik proseslerin ve farklı alaşım elementlerinin ilavesinin etkisi de sıklıkla çalışılmaktadır (Lee & Han, 2015). Örneğin, çevrimli su verme ısıl işlemi ÖGGD için sıklıkla başvurulan bir ısıl işlemdir. Bu ısıl işlemde kısa süre ara kritik bölgede veya Ac_3 sıcaklığının üzerinde tutulan çeliğe su verilir ve bu işlem birkaç defa tekrarlanır. İlk su verme işleminde dönen östenitlerden bazıları yeniden martensite dönüşmektedir. Bu yeni martensitler ikinci çevrimde yeni östenitlerin çekirdeklenebilmesi için oldukça uygun bölgelerdir ve ayrıca östenit için de bir karbon kaynağıdır (Zhu et al., 2017). Böylece bu çevrim sayesinde hem dönen östenit miktarı hem de dönen östenitlerin kararlılığı artmaktadır. Kesikli su verme ısıl işlemi yine bir başka alternatif yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntemde çelik ilk olarak *Ms* ve *Mf* arasında bir sıcaklığa su verilerek burada belirli bir süre tutulur. Sonrasında çelik tekrar önceden belirlenen tavlama sıcaklığına çıkartılır. Böylece temperlenmiş martensit, yeni martensit, blok ve film tip östenit mikroyapısına sahip çok fazlı çelik üretilmiş olur. Bu çelikler, yeni martensitin ve temperlenmiş martensitin özelliklerini TRIP etkisi ile bir araya getirerek üstün mekanik özellikler sergilerler (Tsuchiyama et al., 2016). Bir diğer umut vadeden yöntem ise ara kritik tavlama bölgesinde haddeleme prosesidir. Bu yöntem mikroyapının incelmesini sağlarken yüksek miktarda kalıntı östenitin de çeliğin nihai mikroyapısında oluşmasını sağlar. Ayrıca östenit tanelerinin içinde nano ikizlenme, dislokasyon ormanları, tane içi ferrit ve V çökeltiler oluşturmak suretiyle çeliğin akma dayanımını iyileştirme stratejileri üzerine ve ayrıca bakır (Cu) ile alaşımlama suretiyle mikroyapıda çökelti sertleşmesi etkisi yaratmak ve bu yolla dayanım artışı sağlama ile ilgili çalışmalar yürütülmektedir (He et al., 2018; Yan et al., 2019). Alaşım elementleri içerisinde Al ve Si sırasıyla yaklaşık %1,5-3,0 ve %1,2-2,0 oranlarında kullanılmaktadır. Bu elementler bir yandan karbür çökelmesini engellerken diğer yandan ara kritik tavlama sıcaklık aralığını yukarıya doğru öteledikleri için ÖGGD kinetiğini hızlandırmaktadır (Lee & De Cooman, 2015; Suh et al., 2013).

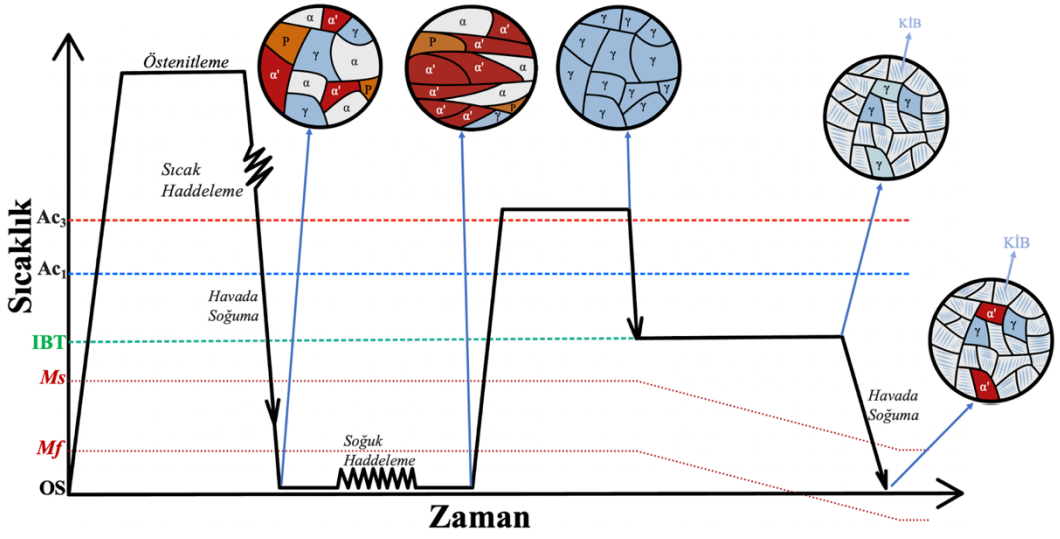
Optimum ÖGGD ısıl işlem sıcaklığının ve süresinin seçilmesiyle yapılan bir ısıl işlemle Orta Manganlı Çelikler çok yüksek oranda kararlı γ_K'ye sahip olabilirler ki bu haliyle diğer tüm 3. Nesil İYDÇ'lerden daha çarpıcı TRIP etkisi sergilerler. Bu çarpıcı TRIP etkisi yüksek akma/çekme oranına katkı sağlayarak Orta Manganlı Çelikleri araçların çarpışma sönümleyici parçalarında kullanılması için mükemmel adaylardan biri yapar. Bununla birlikte Orta Manganlı Çeliklerle ilgili hala çözülmesi gereken problemler vardır. Örneğin, yüksek manganlı çelik üretiminde sıklıkla karşılaşılan Mn segregasyonu kaynaklı bantlaşma, şekil verme işleminden sonra geri yaylanma sorunu ve lokalize olan deformasyon sorunu gibi sorunlar gelecekteki çalışmalarla aşıldığı takdirde Orta Manganlı TRIP Çeliklerinin ticarileşmesi oldukça kolaylaşacaktır (Liu et al., 2018).

3.3. Karbür İçermeyen Beynitik (KİB) Çelikler

KİB Çelikleri 3. Nesil İYDÇ'ler arasında en orijinal konsepte sahip çelik sınıflarından biridir. Bunda diğer 3. Nesil İYDÇ'lerden daha az alaşım elementi içermesine rağmen daha iyi TRIP özelliği sergilemesinin etkisi büyüktür. Bu çelikler nihai mikroyapıda sahip olduğu kalıntı östenitin tipi, morfolojisi, kararlılığı, miktarı ve beynitik matriksin büyüklüğü ile diğer 3. Nesil İYDÇ'lerden ayrılmaktadır (Hasegawa et al., 2004). Beynitin keşfi Davenport ve Bain'in 1929'da çelik şeritleri ortalama bir sıcaklıkta izotermal tutarak beynitik yapı elde ettikleri çalışmaya kadar gitmektedir (Davenport & Bain, 1970). 1998'de, Bhadeshia ve arkadaşları beynitik yapının sıcaklık düştükçe inceldiğini fark ettikleri çalışma ile modern beynitik çeliklerin önünü açmıştır (Singh & Bhadeshia, 1998). Nano yapılı KİB Çelikleri sadece 20-40 nm kalınlığında ultra ince lamel tip beynitik ferrit ve film tip kalıntı östenit fazlarını içerirler. Bu çok fazlı çelikler çoğu ultra ince taneli malzemelerin gösterdiği düşük süneklik zafiyetini göstermedikleri için yüksek uzama değerleri sergileyebilmektedirler (Caballero et al., 2002).

İki farklı morfolojiye sahip östenit, beynitik dönüşümden sonra nihai mikroyapıda bulunabilir. Bunlardan ilki, film östenittir. Film östenit beynitin paralel olmayan demetleri, iri blok östenit taneleri ve beynitik ferritin alt taneleri arasında bulunabilir. Blok östenitler mekanik olarak yeterince kararlı olmadığından deformasyonun erken aşamasında martensite dönüşürler ve bu yüzden KİB Çeliklerinin sünekliğine yeterince katkı sağlayamazlar. Bu yüzden yüksek uzama ve dayanım değerlerini elde etmek için nihai mikroyapıdaki blok östenit miktarı azaltılmalı veya tamamen bitirilmelidir (Garcia-Mateo et al., 2012).

Ultra ince taneli KİB Çeliklerinin üretimi çoğunlukla tam ancak bazen kısmi östenitleme adımı ile başlar. Belirlenmiş sürenin sonunda çelik hızlı bir şekilde beynitik bölgeye soğutularak burada izotermal olarak belirli bir süre boyunca beynit bölgesinde tutulur (IBT). Bu çok adımlı düşük sıcaklık beynitik dönüşüm mikroyapıyı oldukça inceltirken mekanik özelliklerin önemli ölçüde iyileşmesini sağlar. İzotermal beynitik dönüşüm ile tane incelmesinde iki mekanizma etkindir. Birincisi, düşük sıcaklıkta yapılan IBT ısıl işlemi beynitik dönüşüm için gerekli olan itici gücü sağlayarak beynit çekirdeklenmesini hızlandırır. İkincisi ise IBT ısıl işlemi sırasında karbon östenite ve daha çok östenit tane sınırlarına doğru yayınacağı için östenit ara yüzey hareketlerine karşı daha dirençli olacaktır. Bu ise beynit tanelerinin büyümesini sınırlayıp yeni alt taneler oluşmasının önünü açacaktır (Caballero et al., 2002; Wang et al., 2014). KİB çeliklerinin üretiminde kullanılan termomekanik ve ısıl işlem prosesleri Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



Şekil 3.5 KİB çeliği üretiminde kullanılan termomekanik ve ısıl işlem prosedürlerinin şematik olarak gösterimi. (J. Li et al., 2022)'den uyarlanmıştır.

KİB Çeliklerinin geliştirilmesinde çözülmesi gereken bazı sorunlar vardır. Bunlardan ilki beynitik dönüşüm mekanizması için getirilmeye çalışılan teorik açıklamaların birbiriyle çelişmesidir. Bu iki görüş şu şekilde özetlenebilir: Difüzyonal çıkıntılardan yeni beynit demetlerinin büyümesi yardımıyla gerçekleşir. Isıl işlem sürecinde beynitik dönüşüm, hareket eden östenit-beynitik ferrit ara yüzeyinin katı çözelti atomlarının sürüklenme etkisi ile durduğunu savunan "difüzyon kontrollü dönüşüm" teorisidir. İkincisi ise martensitik dönüşüme benzer olarak beynitik dönüşümün yer değiştirmeli dönüşüm mekanizması ile gerçekleştiğini savunan "yer

değiştirmeli dönüşüm" mekanizmasıdır. Bu teoride beynitik ferrit ve östenitin Gibbs serbest enerjilerinin birbirine eşit olduğu anda reaksiyonun duracağı bildirilmektedir (Dai et al., 2021; Lu et al., 2020).

Bir diğer sorun ise düşük sıcaklıkta gerçekleştirilen IBT ısıl işleminin dönüşüm kinetiğini yavaşlatmasıdır. Bu ise izotermal beynitik sıcaklık bölgesinde çok uzun tutma süreleri gerektirebildiğinden endüstriyel uygulamasını sınırlamaktadır. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda beynitik dönüşüm kinetiğini hızlandırmak için Al ve Co gibi alaşım elementleri katılmaktadır. Bu elementler dönüşüm kinetiğini hızlandırır ve tane incelmesi de sağlarlar. İncelen tanelerin ara yüzey yoğunluğu artacağı ve böylece tanelerde beynitin çekirdeklenmesi için uygun çekirdeklenme alanları bulunacağı için bu durum beynitik dönüşümü daha da hızlandırır (Gjostein et al., 1966).

Özetle, KİB Çelikleri ultra ince çift faz mikroyapısına sahip olduklarından tokluk, dayanım ve şekillendirilebilirlik olarak tatmin edici değerler sunarlar. Bu ise KİB Çeliklerini sahip oldukları yüksek akma ve iyi süneklik değerlerinden dolayı araçların şase ve çarpışma sönümleyici parçaları için mükemmel adaylar yapar (Caballero et al., 2013; Hofer et al., 2015).

4. Sonuç ve Genel Değerlendirme

İlk temelleri düşük karbonlu çelik ile atılan ve 1900'lü yılların ortalarından itibaren özellikle dayanım noktasında çağının gerisinde kalan otomotiv çelikleri yaşanan yakıt krizleriyle beraber "yüksek dayanımlı çelik*"* sınıfının doğuşunun önünü açmıştır. Bu çelik kategorisinin oluşmasıyla birlikte aslında farklı prosesler kullanılarak çeliklerden günün şartlarına göre beklenenden çok daha yüksek mekanik özellikler ortaya koyabileceği görülmüş ve 1990'lardan itibaren DP çeliklerinin otomotiv endüstrisine sunulması yeni bir neslin başlangıcı olmuştur. İYDÇ kategorisi olarak bilinen bu çelik kategorisinin son üyesi 3. Nesil İYDÇ'lerdir. Bu çeliklerin en önemli özelliği seleflerinden çok daha iyi DSÇ değeri sunabilmesidir. Bu ise otomotiv üreticilerinin rahatlıkla bu çeliklere şekil verebilmesini sağlarken kullanıcıların ise araçlarında güvenle seyahat edebilmesine olanak tanımaktadır.

Elektrikli araçların her geçen gün hayatımızda daha fazla yer alacağı gerçeği 3. Nesil İYDÇ'lere olan ilgiyi artırmıştır. Çünkü bu çelikler kullanılarak ağırlık tasarrufu için gerekli olan kesit daralması sağlanabilir. Hem de bu tasarruf için şekil verilebilirlikten ya da dayanımdan da önemli ölçüde ödün vermeye gerek kalmadan sağlanabilmektedir. Bu cezbedici özellikleri son 20 yıldır bu çeliklerin çelik endüstrisinin gündeminde tutmaya yetmiş ve bu çelikler üzerine yapılan çalışmalar artarak devam etmektedir. Sürdürülen bu çalışmalar meyvelerini vermeye başlamış ve Q&P çelikleri diğer ismiyle SV ve P çelikleri ticarileşerek araçlarda kullanılmaya başlanmıştır.

3. Nesil İYDÇ'lerin özellikleri büyük oranda mikroyapısında bulundurdukları fazlara bağlıdır. Genellikle yapısında birden fazla faz bulunduran bu çelikler çok fazlı çelikler olarak bilinmektedir. Her bir faz mikroyapıda bulunan hacim oranına bağlı olarak kendi karakteristik özelliklerini sergiler. Bu fazlardan en önemlisi ise γ_K'dir. γ_K'nin hem kararlılığını hem de miktarını etkileyen pek çok faktör vardır. Bu faz ise çelikten istenen süneklik ve dayanım değerlerinin elde edilmesinde kilit rol oynamaktadır.

Üretim prosesi sırasında hem mikroyapıdaki diğer fazların hem de γ_K fazının durumu çok dikkatli şekilde değerlendirilmeli ve termomekanik ve ısıl işlem proses parametreleri optimum özellikleri sağlayacak biçimde seçilmelidir. Bu proseslerde yapılacak ufak değişiklikler sonucunda elde edilebilecek nihai mikroyapı da değişeceğinden istenilen özelliklerin elde edilmesi parametrelerin sıkı şekilde kontrol edilmesinden geçmektedir. Bununla beraber alaşım elementlerinin türleri ve bu elementlerin ağırlıkça yüzdeleri de γ_K fazının miktarını ve kararlılığını doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple, optimum TRIP etkisini elde edebilmek için termomekanik ve ısıl işlem proses parametrelerinin çok iyi belirlenmesinin gerekliliğinin yanı sıra alaşım elementlerinin seçimi ve bu elementlerin miktarlarının belirlenmesi de 3. Nesil İYDÇ sınıfına ulaşmada büyük önem arz etmektedir.

3. Nesil İYDÇ sınıfı içerisinde bulunan diğer çeliklerin ticarileşmesi için aşılması gereken problemler de bulunmaktadır. Öncelikle bu çeliklerin üretimi için gerekli olan termomekanik ve ısıl işlem prosesleri oldukça karmaşık olabilmektedir. Dahası "işlem penceresi" aralığı olarak bilinen ve optimum γ_K miktarını ve kararlılığını sunan ısıl işlem sıcaklık ve süresi genellikle oldukça dardır. Bu sebeple ısıl işlem sıcaklık ve süresinin sıkı bir biçimde kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu yüzden ticari olarak hali hazırda kullanılan üretim hatlarında bu çeliklerin üretilmesi oldukça zordur. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, ticari olarak kullanımda olan hatların 3. Nesil İYDÇ'leri üretmek üzere modifiye edilmesinden ziyade bu hatlarda üretime uygun 3. Nesil İYDÇ'lerin üretilmesine odaklanılması bu çeliklerin ticarileşmesini kolaylaştıracaktır. Bir diğer olumsuzluk ise 3. Nesil İYDÇ'lerin genel olarak sergiledikleri DSÇ üzerinden değerlendirilmelidir. Halbuki yorulma dayanımı, hidrojen gevrekliliği, kaynaklanabilirlik, dinamik yük altındaki davranışı,

galvanizlenebilirlik, korozyon dayanımı ve şekillendirilebilirlik sınırı diyagramları gibi özellikler üzerine çalışmaların yoğunlaşması bu çeliklerin ticarileşmesi için şarttır.

3. Nesil İYDÇ'lerin yüksek dayanım sergilerken yine oldukça yüksek uzama sergileyebilmelerinin temel sebebi yapısında bulundurduğu γ_K'nin deformasyonla birlikte aşama aşama martensite dönüşmesidir. Bu inceleme ile deformasyon kaynaklı dönüşüm olarak isimlendirilen TRIP mekanizması için hem teorik hem de matematiksel olarak ortaya atılan modeller incelenmiş ve böylece dönüşüm kinetiğinin ve TRIP etkisinin anlaşılabilmesi adına öngörüler sunulmuştur. γ_K miktarını ve kararlılığını etkileyen farklı parametreler sıralanmış ve en önemli parametreler tartışılmıştır. Ayrıca, 3. Nesil İYDÇ'lerin üretiminde kullanılan termomekanik ve ısıl işlem süreçleri ele alınmış ve bu faktörlerin nihai mikroyapı üzerindeki etkileri açıklanmıştır. Gelecekte, östenitin mekanik kararlılığı üzerine odaklanan çalışmaların yanı sıra üretim sonrası özelliklerini de kapsayan çalışmaların gerçekleştirilmesi sayesinde ucuz ve kolay üretilebilir yeni 3. Nesil İYDÇ adayları üretilecektir. Ayrıca bu çeliklerin var olan üretim hatlarına tamamen veya yapılacak küçük değişiklikler ile uyarlanabilmesiyle de ticarileşmesinin önü açılacaktır.

Teşekkür

Çalışmamızın gerçekleştirilmesinde Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine (GÜBAP 07/2019-22) teşekkür ederiz.

Referanslar

Barbier, D. (2014). Extension of the Martensite Transformation Temperature Relation to Larger Alloying Elements and Contents. *Advanced Engineering Materials*, *16*(1), 122-127. https://doi.org/10.1002/adem.201300116

Basuki, A., & Aernoudt, E. (1999). Influence of rolling of TRIP steel in the intercritical region on the stability of retained austenite. *Journal of Materials Processing Technology*, *89-90*, 37-43. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00037-0

Belde, M., Springer, H., & Raabe, D. (2016). Vessel microstructure design: A new approach for site-specific core-shell micromechanical tailoring of TRIP-assisted ultra-high strength steels. *Acta Materialia*, *113*, 19-31. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.04.051

Bhadeshia, H., & Honeycombe, R. (2017). *Steels: microstructure and properties*. Butterworth-Heinemann.

Bhadeshia, H. K. D. H. (1981a). Driving force for martensitic transformation in steels. *Metal Science*, *15*(4), 175-177. https://doi.org/10.1179/030634581790426714

Bhadeshia, H. K. D. H. (1981b). Thermodynamic extrapolation and martensite-start temperature of substitutionally alloyed steels. *Metal Science*, *15*(4), 178-180. https://doi.org/10.1179/030634581790426697

Bhadeshia, H. K. D. H. (2002). TRIP-Assisted Steels? *ISIJ International*, *42*(9), 1059-1060. https://doi.org/https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.1059

Bhadhon, K. M. H., Wang, X., McNally, E. A., & McDermid, J. R. (2022). Effect of Intercritical Annealing Parameters and Starting Microstructure on the Microstructural Evolution and Mechanical Properties of a Medium-Mn Third Generation Advanced High Strength Steel. *Metals*, *12*(2), 356. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/met12020356

Bleck, W., Guo, X., & Ma, Y. (2017). The TRIP effect and its application in cold formable sheet steels. *Steel research international*, *88*(10), 1700218.

Bogers, A. J., & Burgers, W. G. (1964). Partial dislocations on the {110} planes in the B.C.C. lattice and the transition of the F.C.C. into the B.C.C. lattice. *Acta Metallurgica*, *12*(2), 255-261. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0001-6160(64)90194-4

Burd, J. T. J., Moore, E. A., Ezzat, H., Kirchain, R., & Roth, R. (2021). Improvements in electric vehicle battery technology influence vehicle lightweighting and material substitution decisions. *Applied Energy*, *283*, 116269. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116269

Caballero, F., Bhadeshia, H., Mawella, K., Jones, D., & Brown, P. (2002). Very strong low temperature bainite. *Materials Science and Technology*, *18*(3), 279-284. https://doi.org/https://doi.org/10.1179/026708301225000725

Caballero, F. G., Allain, S., Cornide, J., Velásquez, J. P., Garcia-Mateo, C., & Miller, M. K. (2013). Design of cold rolled and continuous annealed carbide-free bainitic steels for automotive application. *Materials & Design*, *49*, 667-680. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.02.046

Caballero, F. G., Garcia-Mateo, C., & Miller, M. K. (2014). Design of novel bainitic steels: Moving from ultrafine to nanoscale structures. *JOM*, *66*(5), 747-755. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11837-014-0908-0

Cai, Z., Ding, H., Ying, Z., & Misra, R. (2014). Microstructural evolution and deformation behavior of a hot-rolled and heat treated Fe-8Mn-4Al-0.2 C steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *23*(4), 1131-1137. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11665-014-0866-2

Cai, Z., Zhang, D., Wen, G., Ma, L., & Misra, R. D. K. (2021). The Influence of Cooling Rate on Austenite Stability and Mechanical Properties in an Austenite–Ferrite Medium-Mn Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *30*(11), 7917-7925. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11665-021-05982-z

Cao, W., Wang, C., Shi, J., Wang, M., Hui, W., & Dong, H. (2011). Microstructure and mechanical properties of Fe–0.2 C–5Mn steel processed by ART-annealing. *Materials Science and Engineering: A*, *528*(22-23), 6661-6666. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.05.039

Chen, L., Ma, Z., Shi, R., Su, Y., Qiao, L., & Wang, L. (2020). Comprehensive effect of hydrostatic compressive stress in retained austenite on mechanical properties and hydrogen embrittlement of martensitic steels. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(41), 22102-22112. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.012

Chiang, J., Boyd, J. D., & Pilkey, A. K. (2015). Effect of microstructure on retained austenite stability and tensile behaviour in an aluminum-alloyed TRIP steel. *Materials Science and Engineering: A*, *638*, 132-142. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.03.069

Creuziger, A., Poling, W. A., & Gnaeupel-Herold, T. (2019). Assessment of martensitic transformation paths based on transformation potential calculations. *Steel research international*, *90*(1), 1800370. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/srin.201800370

Czerwinski, F. (2022). Critical minerals for zero-emission transportation. *Materials*, *15*(16), 5539. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma15165539

Dai, Z., Chen, H., Ding, R., Lu, Q., Zhang, C., Yang, Z., & van der Zwaag, S. (2021). Fundamentals and application of solid-state phase transformations for advanced high strength steels containing metastable retained austenite. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, *143*, 100590. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100590

Davenport, E., & Bain, E. (1970). Transformation of austenite at constant subcritical temperatures. *Metallurgical Transactions*, *1*(12), 3503-3530. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF03037892

Davut, K. (2013). *Relation between Microstructure and Mechanical Properties of a Low-alloyed TRIP steel* Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2013].

De Cooman, B. (2004). Structure–properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, *8*(3-4), 285-303. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cossms.2004.10.002

De Moor, E., Matlock, D. K., Speer, J. G., & Merwin, M. J. (2011). Austenite stabilization through manganese enrichment. *Scripta Materialia*, *64*(2), 185-188. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.09.040

De Moor, E., Speer, J. G., Matlock, D. K., Kwak, J.-H., & Lee, S.-B. (2011). Effect of carbon and manganese on the quenching and partitioning response of CMnSi steels. *ISIJ International*, *51*(1), 137-144. https://doi.org/https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.137

De Oliveira, P. G. B., Mariani, F. E., Casteletti, L. C., Itman Filho, A., Neto, A. L., & Totten, G. E. (2020). Boro-Austempering Treatment of High-Strength Bainitic Steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *29*(6), 3486-3493. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11665-020-04590-7

Demeri, M. Y. (2013). *Advanced high-strength steels: science, technology, and applications*. ASM international.

Dhara, S., van Bohemen, S. M. C., & Santofimia, M. J. (2022). Isothermal decomposition of austenite in presence of martensite in advanced high strength steels: A review. *Materials Today Communications*, *33*, 104567. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104567

Dong, X. X., Shen, Y. F., Jia, N., & Zhu, Y. T. (2022). Improving mechanical properties and retained-austenite stability of a medium carbon Q&P steel by adjusting phase ratio. *Materials Science and Engineering: A*, *833*, 142580. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142580

Fontaras, G., Zacharof, N.-G., & Ciuffo, B. (2017). Fuel consumption and CO2 emissions from passenger cars in Europe–Laboratory versus real-world emissions. *Progress in energy and combustion Science*, *60*, 97-131. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.12.004

Gao, G., Zhang, H., Gui, X., Luo, P., Tan, Z., & Bai, B. (2014). Enhanced ductility and toughness in an ultrahigh-strength Mn–Si–Cr–C steel: The great potential of ultrafine filmy retained austenite. *Acta Materialia*, *76*, 425-433. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.05.055

Garcia-Mateo, C., Caballero, F., Sourmail, T., Kuntz, M., Cornide, J., Smanio, V., & Elvira, R. (2012). Tensile behaviour of a nanocrystalline bainitic steel containing 3 wt% silicon. *Materials Science and Engineering: A*, *549*, 185-192. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.031

Gjostein, N., Domian, H., Aaronson, H., & Eichen, E. (1966). Relative interfacial energies in Fe-C alloys. *Acta metallurgica*, *14*(12), 1637-1644. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0001-6160(66)90016-2

Hasegawa, K., Kawamura, K., Urabe, T., & Hosoya, Y. (2004). Effects of Microstructure on Stretch-flange-formability of 980 MPa Grade Cold-rolled Ultra High Strength Steel Sheets. *ISIJ International*, *44*(3), 603-609. https://doi.org/https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.603

He, B. B., Huang, B. M., He, S. H., Qi, Y., Yen, H. W., & Huang, M. X. (2018). Increasing yield strength of medium Mn steel by engineering multiple strengthening defects. *Materials Science and Engineering: A*, *724*, 11-16. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.03.065

Hidalgo, J., Huizenga, R. M., Findley, K. O., & Santofimia, M. J. (2019). Interplay between metastable phases controls strength and ductility in steels. *Materials Science and Engineering: A*, *745*, 185-194. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.096

Hofer, C., Leitner, H., Winkelhofer, F., Clemens, H., & Primig, S. (2015). Structural characterization of "carbide-free" bainite in a Fe–0.2 C–1.5 Si–2.5 Mn steel. *Materials Characterization*, *102*, 85-91. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.02.020

Hu, B., Luo, H., Yang, F., & Dong, H. (2017). Recent progress in medium-Mn steels made with new designing strategies, a review. *Journal of Materials Science & Technology*, *33*(12), 1457-1464. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.06.017

Im, D.-B., Lee, C. G., Kim, S.-J., & Park, I.-M. (2002). Stress and strain mode effects on strain induced martensite transformation in TRIP-aided cold-rolled steel sheets. *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials(South Korea)*, *40*(1), 8-13.

Jacques, P., Delannay, F., & Ladrière, J. (2001). On the influence of interactions between phases on the mechanical stability of retained austenite in transformation-induced plasticity multiphase steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *32*(11), 2759-2768.

Jacques, P. J., Delannay, F., & Ladrière, J. (2001). On the influence of interactions between phases on the mechanical stability of retained austenite in transformation-induced plasticity multiphase steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *32*(11), 2759-2768. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11661-001-1027-4

Kamoutsi, H., Gioti, E., Haidemenopoulos, G. N., Cai, Z., & Ding, H. (2015). Kinetics of solute partitioning during intercritical annealing of a medium-Mn steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *46*(11), 4841-4846. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11661-015-3118-7

Kang, S., Speer, J. G., Krizan, D., Matlock, D. K., & De Moor, E. (2016). Prediction of tensile properties of intercritically annealed Al-containing 0.19 C–4.5 Mn (wt%) TRIP steels. *Materials & Design*, *97*, 138-146. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.058

Kaufman, L., & Cohen, M. (1958). Thermodynamics and kinetics of martensitic transformations. *Progress in metal physics*, *7*, 165-246. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0502-8205(58)90005-4

Kelly, P. (2012). Crystallography of martensite transformations in steels. In *Phase transformations in steels* (pp. 3-33). Elsevier. https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857096111.1.3

Klinkenberg, C., Kintscher, B., Hoen, K., & Reifferscheid, M. (2017). More than 25 Years of Experience in Thin Slab Casting and Rolling Current State of the Art and Future Developments. *Steel research international*, *88*(10), 1700272. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/srin.201700272

Kozłowska, A., Grajcar, A., Janik, A., Radwański, K., Krupp, U., Matus, K., & Morawiec, M. (2021). Mechanical and thermal stability of retained austenite in plastically deformed bainite-based TRIP-aided medium-Mn steels. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, *21*(3), 133. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s43452-021-00284-6

Krizan, D., & De Cooman, B. (2008). Analysis of the Strain-Induced Martensitic Transformation of Retained Austenite in Cold Rolled Micro-Alloyed TRIP Steel. *Steel research international*, *79*(7), 513-522.

Kumar, S. (2022). Quenching and partitioning (Q&P) process: a critical review of the competing reactions. *Materials Science and Technology*, *38*(11), 663-675. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2062646

Lee, S., & De Cooman, B. C. (2015). Tensile Behavior of Intercritically Annealed Ultra-Fine Grained 8% Mn Multi-Phase Steel. *Steel research international*, *86*(10), 1170-1178. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/srin.201500038

Lee, S.-J., Lee, S., & De Cooman, B. C. (2011). Mn partitioning during the intercritical annealing of ultrafine-grained 6% Mn transformation-induced plasticity steel. *Scripta Materialia*, *64*(7), 649-652. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.12.012

Lee, Y.-K., & Han, J. (2015). Current opinion in medium manganese steel. *Materials Science and Technology*, *31*(7), 843-856. https://doi.org/https://doi.org/10.1179/1743284714Y.0000000722

Lesch, C., Kwiaton, N., & Klose, F. B. (2017). Advanced high strength steels (AHSS) for automotive applications− tailored properties by smart microstructural adjustments. *Steel research international*, *88*(10), 1700210. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/srin.201700210

Li, G. Q., Shen, Y. F., Jia, N., Feng, X. W., & Xue, W. Y. (2022). Microstructural evolution and mechanical properties of a micro-alloyed low-density δ-TRIP steel. *Materials Science and Engineering: A*, *848*, 143430. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143430

Li, J., Chen, P., Yang, D., Di, H., & Yi, H. (2022). Improving Strength-Ductility via Short Austenitization in a Low-Carbon Carbide-Free Bainitic Steel. *Crystals*, *12*(11), 1636. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/cryst12111636

Li, Z., Ding, H., Misra, R., & Cai, Z. (2017). Microstructure-mechanical property relationship and austenite stability in medium-Mn TRIP steels: The effect of austenite-reverted transformation and quenching-tempering treatments. *Materials Science and Engineering: A*, *682*, 211-219. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.11.048

Li, Z., Misra, R., Cai, Z., Li, H., & Ding, H. (2016). Mechanical properties and deformation behavior in hot-rolled 0.2 C-1.5/3Al-8.5 Mn-Fe TRIP steel: The discontinuous TRIP effect. *Materials Science and Engineering: A*, *673*, 63-72. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.023

Liu, L., He, B., & Huang, M. (2018). The role of transformation-induced plasticity in the development of advanced high strength steels. *Advanced Engineering Materials*, *20*(6), 1701083.

Liu, L., He, B. B., & Huang, M. X. (2019). Engineering Heterogeneous Multiphase Microstructure by Austenite Reverted Transformation Coupled with Ferrite Transformation. *JOM*, *71*(4), 1322-1328. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11837-019-03365-3

Lu, J., Yu, H., Duan, X., & Song, C. (2020). Investigation of microstructural evolution and bainite transformation kinetics of multi-phase steel. *Materials Science and Engineering: A*, *774*, 138868. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138868

Luk, J. M., Kim, H. C., De Kleine, R., Wallington, T. J., & MacLean, H. L. (2017). Review of the fuel saving, life cycle GHG emission, and ownership cost impacts of lightweighting vehicles with different powertrains. *Environmental science & technology*, *51*(15), 8215-8228. https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00909

Ma, B., Li, C., Han, Y., & Wang, J. (2016). γ→ α′ Martensitic transformation and magnetic property of cold rolled Fe–20Mn–4Al–0.3 C steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, *419*, 249-254. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.06.013

Ma, Y. (2017). Medium-manganese steels processed by austenite-reverted-transformation annealing for automotive applications. *Materials Science and Technology*, *33*(15), 1713-1727.

Mansourinejad, M., & Ketabchi, M. (2017). Modification of Olson–Cohen model for predicting stress-state dependency of martensitic transformation. *Materials science and technology*, *33*(16), 1948-1954. https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1342016

Matas, S., & Hehemann, R. (1960). Retained austenite and the tempering of martensite. *Nature*, *187*(4738), 685-686. https://doi.org/https://doi.org/10.1038/187685a0

Matlock, D. K., Brautigam, V. E., & Speer, J. G. (2003). Application of the quenching and partitioning (Q&P) process to a medium-carbon, high-Si microalloyed bar steel. Materials Science Forum,

Matlock, D. K., & Speer, J. G. (2009). Third generation of AHSS: microstructure design concepts. In *Microstructure and texture in steels* (pp. 185-205). Springer. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-84882-454-6_11

Matlock, D. K., & Speer, J. G. (2010). Processing opportunities for new advanced high-strength sheet steels. *Materials and Manufacturing Processes*, *25*(1-3), 7-13. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10426910903158272

Mayyas, A., Omar, M., Hayajneh, M., & Mayyas, A. R. (2017). Vehicle's lightweight design vs. electrification from life cycle assessment perspective. *Journal of Cleaner Production*, *167*, 687-701. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.145

Min, J., Hector Jr, L. G., Zhang, L., Lin, J., Carsley, J. E., & Sun, L. (2016). Elevated-temperature mechanical stability and transformation behavior of retained austenite in a quenching and partitioning steel. *Materials Science and Engineering: A*, *673*, 423-429. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.090

Mukherjee, M., Singh, S. B., & Mohanty, O. N. (2008). Deformation-induced transformation of retained austenite in transformation induced plasticity-aided steels: a thermodynamic model. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *39*(10), 2319-2328. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11661-008-9599-x

Olson, G., & Cohen, M. (1972). A mechanism for the strain-induced nucleation of martensitic transformations. *Journal of the Less Common Metals*, *28*(1), 107-118. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-5088(72)90173-7

Olson, G., & Cohen, M. (1975). Kinetics of strain-induced martensitic nucleation. *Metallurgical Transactions A*, *6*(4), 791.

Olson, G. B., & Azrin, M. (1978). Transformation behavior of TRIP steels. *Metallurgical Transactions A*, *9*(5), 713-721.

Olson, G. B., & Cohen, M. (1972). A mechanism for the strain-induced nucleation of martensitic transformations. *Journal of the Less Common Metals*, *28*(1), 107-118. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-5088(72)90173-7

Olson, G. B., & Sivarajan, S. (2017). Effects of Stress and Deformation on Martensite Formation☆. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.03146-5

Pereloma, E. V., Gazder, A. A., & Timokhina, I. (2016). Retained austenite: transformation-induced plasticity. *Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys; Taylor and Francis: New York, NY, USA*, 3088-3103.

Poling, W. A. (2016). *Tensile deformation of third generation advanced high strength sheet steels under high strain rates* Colorado School of Mines].

Reisner, G., Werner, E., Kerschbaummayr, P., Papst, I., & Fischer, F. (1997). The modeling of retained austenite in low-alloyed TRIP steels. *JOM*, *49*(9), 62-65. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02914354

Robinson, A. L., Taub, A. I., & Keoleian, G. A. (2019). Fuel efficiency drives the auto industry to reduce vehicle weight. *MRS Bulletin*, *44*(12), 920-923. https://doi.org/https://doi.org/10.1557/mrs.2019.298

Safari, H., Nahvi, H., & Esfahanian, M. (2018). Improving automotive crashworthiness using advanced high strength steels. *International Journal of Crashworthiness*, *23*(6), 645-659. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/13588265.2017.1389624

Schröder, C., Weiß, A., & Volkova, O. (2018). Development of a new stainless austenitic CrMnNi steel using TRIP/TWIP effect for a high cold formability: Entwicklung eines neuartigen nichtrostenden, austenitischen CrMnNi-Stahls mit hoher Kaltumformbarkeit unter Ausnutzung von TRIP/TWIP-Effekten. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, *49*(5), 577-590. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/mawe.201700278

Shi, J., Sun, X., Wang, M., Hui, W., Dong, H., & Cao, W. (2010). Enhanced work-hardening behavior and mechanical properties in ultrafine-grained steels with large-fractioned metastable austenite. *Scripta Materialia*, *63*(8), 815-818. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.06.023

Singh, S., & Bhadeshia, H. (1998). Estimation of bainite plate-thickness in low-alloy steels. *Materials Science and Engineering: A*, *245*(1), 72-79. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00701-6

Soleimani, M., Kalhor, A., & Mirzadeh, H. (2020). Transformation-induced plasticity (TRIP) in advanced steels: a review. *Materials Science and Engineering: A*, *795*, 140023.

Speer, J., Matlock, D. K., De Cooman, B. C., & Schroth, J. G. (2003). Carbon partitioning into austenite after martensite transformation. *Acta Materialia*, *51*(9), 2611-2622. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00059-4

Sperle, J.-O., Zuidema, B. K., Denner, S. G., & Engl, B. (2001). *New High Strength Steels Applied to the Body Structure of ULSAB-AVC* https://doi.org/10.4271/2001-01-3042

Sugimoto, K., & Mukherjee, M. (2017). TRIP aided and complex phase steels. In *Automotive steels* (pp. 217-257). Elsevier. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100638-2.00008-0

Sugimoto, K.-i. (2022). Effects of Partial Replacement of Si by Al on Cold Formability in Two Groups of Low-Carbon Third-Generation Advanced High-Strength Steel Sheet: A Review. *Metals*, *12*(12), 2069. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/met12122069

Sugimoto, K.-i., Kobayashi, M., Nagasaka, A., & Hashimoto, S.-i. (1995). Warm stretch-formability of TRIP-aided dual-phase sheet steels. *ISIJ International*, *35*(11), 1407-1414. https://doi.org/https://doi.org/10.2355/isijinternational.35.1407

Suh, D. W., Ryu, J. H., Joo, M. S., Yang, H. S., Lee, K., & Bhadeshia, H. (2013). Medium-alloy manganese-rich transformation-induced plasticity steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *44*(1), 286-293. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11661-012-1402-3

Takahashi, M. (2020). TRIP Steel.

Tamura, I. (1982). Deformation-induced martensitic transformation and transformation-induced plasticity in steels. *Metal science*, *16*(5), 245-253. https://doi.org/https://doi.org/10.1179/030634582790427316

Taub, A., De Moor, E., Luo, A., Matlock, D. K., Speer, J. G., & Vaidya, U. (2019). Materials for automotive lightweighting. *Annual Review of Materials Research*, *49*(1). https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070218-010134

Tian, J., Xu, G., Jiang, Z., Yuan, Q., Chen, G., & Hu, H. (2019). Effect of austenisation temperature on bainite transformation below martensite starting temperature. *Materials Science and Technology*, *35*(13), 1539-1550. https://doi.org/10.1080/02670836.2019.1631946

Tirumalasetty, G., Van Huis, M., Kwakernaak, C., Sietsma, J., Sloof, W., & Zandbergen, H. (2012). Deformation-induced austenite grain rotation and transformation in TRIP-assisted steel. *Acta Materialia*, *60*(3), 1311-1321. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.11.026

Tsuchiyama, T., Inoue, T., Tobata, J., Akama, D., & Takaki, S. (2016). Microstructure and mechanical properties of a medium manganese steel treated with interrupted quenching and intercritical annealing. *Scripta Materialia*, *122*, 36-39. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.05.019

Van Bohemen, S. M. C. (2012). Bainite and martensite start temperature calculated with exponential carbon dependence. *Materials Science and Technology*, *28*(4), 487-495. https://doi.org/https://doi.org/10.1179/1743284711Y.0000000097

Wang, J., & Van Der Zwaag, S. (2001). Stabilization Mechanisms of Retained Austenite in Transformation-Induced Plasticity Steel. *Metall. Mater. Trans. A*, *32*, 1527-1539. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11661-001-0240-5

Wang, K., Gui, X., Bai, B., & Gao, G. (2022). Effect of tempering on the stability of retained austenite in carbide-free bainitic steel. *Materials Science and Engineering: A*, *850*, 143525. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143525

Wang, L., & Speer, J. G. (2013). Quenching and Partitioning Steel Heat Treatment. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, *2*(4), 268-281. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13632-013-0082-8

Wang, X., Wu, K., Hu, F., Yu, L., & Wan, X. (2014). Multi-step isothermal bainitic transformation in medium-carbon steel. *Scripta Materialia*, *74*, 56-59. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.10.019

WorldAutoSteel. (2023). *Global Forming Diagram 2021*. Retrieved 23/01/2023 from https://ahssinsights.org/blog/a-new-global-formability-diagram/

Wu, R.-M., Li, W., Wang, C.-L., Xiao, Y., Wang, L., & Jin, X.-J. (2015). Stability of retained austenite through a combined intercritical annealing and quenching and partitioning (IAQP) treatment. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, *28*(3), 386-393. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s40195-015-0217-9

Xie, Z., Ren, Y., Zhou, W., Yang, J., Shang, C., & Misra, R. (2014). Stability of retained austenite in multi-phase microstructure during austempering and its effect on the ductility of a low carbon steel. *Materials Science and Engineering: A*, *603*, 69-75. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.02.059

Xiong, X., Chen, B., Huang, M., Wang, J., & Wang, L. (2013). The effect of morphology on the stability of retained austenite in a quenched and partitioned steel. *Scripta Materialia*, *68*(5), 321-324. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.11.003

Yan, S., Liang, T., Chen, J., Li, T., & Liu, X. (2019). A novel Cu-Ni added medium Mn steel: Precipitation of Cu-rich particles and austenite reversed transformation occurring simultaneously during ART annealing. *Materials Science and Engineering: A*, *746*, 73-81. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.014

Yan, S., Liu, X., Liu, W. J., Lan, H., & Wu, H. (2015). Comparison on mechanical properties and microstructure of a C–Mn–Si steel treated by quenching and partitioning (Q&P) and quenching and tempering (Q&T) processes. *Materials Science and Engineering: A*, *620*, 58-66. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.09.047

Yi, H. L., Sun, L., & Xiong, X. C. (2018). Challenges in the formability of the next generation of automotive steel sheets. *Materials Science and Technology*, *34*(9), 1112-1117. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/02670836.2018.1424383

Zhang, S., & Findley, K. (2013). Quantitative assessment of the effects of microstructure on the stability of retained austenite in TRIP steels. *Acta Materialia*, *61*(6), 1895-1903. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.12.010

Zhang, Y., Wang, L., Findley, K. O., & Speer, J. G. (2017). Influence of Temperature and Grain Size on Austenite Stability in Medium Manganese Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *48*(5), 2140-2149. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11661-017-3995-z

Zhao, J., & Jiang, Z. (2018). Thermomechanical processing of advanced high strength steels. *Progress in Materials Science*, *94*, 174-242. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.01.006

Zhao, X., Shen, Y., Qiu, L., Liu, Y., Sun, X., & Zuo, L. (2014). Effects of intercritical annealing temperature on mechanical properties of Fe-7.9 Mn-0.14 Si-0.05 Al-0.07 C steel. *Materials*, *7*(12), 7891-7906. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma7127891

Zhou, T. P., Wang, C. Y., Wang, C., Cao, W. Q., & Chen, Z. J. (2020). Austenite stability and deformation-induced transformation mechanism in cold-rolled medium-Mn steel. *Materials Science and Engineering: A*, *798*, 140147. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140147

Zhu, J., Ding, R., He, J., Yang, Z., Zhang, C., & Chen, H. (2017). A cyclic austenite reversion treatment for stabilizing austenite in the medium manganese steels. *Scripta Materialia*, *136*, 6-10. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.03.038

Zinsaz-Borujerdi, A., Zarei-Hanzaki, A., Abedi, H., Karam-Abian, M., Ding, H., Han, D., & Kheradmand, N. (2018). Room temperature mechanical properties and microstructure of a low alloyed TRIP-assisted steel subjected to one-step and two-step quenching and partitioning process. *Materials Science and Engineering: A*, *725*, 341-349. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.04.042

Zuidema, B. K. (2012). Bridging the design–manufacturing–materials data gap: material properties for optimum design and manufacturing performance in light vehicle steel-intensive body structures. *JOM*, *64*(9), 1039-1047. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11837-012-0405-2

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

UMAGD, (2023) 15(2), 404-415.

10.29137/umagd.1232816

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Atmosferik Plazma Sprey (APS) Yöntemi ile Üretilmiş MCrAlY ve YSZ içerikli Termal Bariyer Kaplama (TBC) Sisteminin 750°C Sıcaklıktaki Oksidasyon ve Sıcak Korozyon Davranışlarının İncelenmesi

Investigation of the Oxidation and Hot Corrosion Behavior of a MCrAlY and YSZ containing Thermal Barrier Coating (TBC) System Produced by the Atmospheric Plasma Spray (APS) Method at 750°C

Derviş Özkan[1] *, Garip Erdoğan[2], Gülfem Binal[3] Yasin Özgürlük[4], Abdullah Cahit Karaoğlanlı[3]

[1]Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 74110 Bartın, TÜRKİYE
[2]Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 54052 Sakarya, TÜRKİYE
[3]Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 74110 Bartın, TÜRKİYE
[4]Bartın Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Optisyenlik Programı, 74100 Bartın, TÜRKİYE

***Başvuru/Received**: 11/01/2023* ***Kabul / Accepted**: 09/02/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Öz

Bu çalışmada, Inconel 718 Ni-esaslı süper alaşım altlık malzeme üzerine MCrAlY içeriğine sahip metalik bağ ve itriya ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ) seramik üst kaplamalar atmosferik plazma sprey (APS) kaplama yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen TBC sistemi oksidasyon ve sıcak korozyon koşulları altında test edilerek, mikroyapısal özellikleri ve oluşan değişimleri incelenmiştir. İzotermal oksidasyon testleri 750°C'de 5, 25, 50 ve 75 saatlik zaman süreçlerinde gerçekleştirilmiştir. Sıcak korozyon testleri 750°C'de 1, 3 ve 5 saatlik zaman süreçlerinde %45 Na_2SO_4 ve %55 V_2O_5 oranlarındaki karışımlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. TBC sisteminin izotermal oksidasyon ve sıcak korozyon gibi ana hasar mekanizmalarına karşı yüksek sıcaklık davranışları belirlenerek, mikroyapısal değişimleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. TBC sistemini oluşturan bileşenlerin içerikleri, testlerin gerçekleştirildiği sıcaklık ve zaman süreçleri ile sıcak korozyon ortamını oluşturan bileşenler ve oranlarının TBC sisteminin yüksek sıcaklık koşullarında dayanımını ve mikroyapısal değişimlerini belirleyen faktörler olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

"Termal bariyer kaplama (TBC), MCrAlY, ZrO_2+Y_2O_3 (YSZ), Atmosferik plazma sprey (APS), İzotermal oksidasyon, Sıcak korozyon"

Abstract

In this study, a metallic bond coat with MCrAlY content and a yttria-stabilized zirconia (YSZ) ceramic topcoat were deposited on the Inconel 718 Ni-based superalloy substrate using the atmospheric plasma spray (APS) coating method. The produced TBC system was tested under oxidation and hot corrosion conditions, and its microstructural properties and changes were investigated. At 750 °C, isothermal oxidation tests were performed for 5, 25, 50 and 75 hours. Hot corrosion tests were carried out at 750°C for time periods of 1, 3 and 5 hours using mixtures of 45% Na_2SO_4 and 55% V_2O_5. The high-temperature behavior of the TBC system against the main damage mechanisms such as isothermal oxidation and hot corrosion was determined, and its microstructural changes were investigated in detail. It has been observed that factors affecting the TBC system's strength and microstructural changes under high temperature conditions include the composition of the components that comprise the TBC system, the temperature and time processes in which the tests are conducted, the components that constitute the hot corrosion environment, and their ratios.

Key Words

"Thermal barrier coating (TBC), MCrAlY, ZrO_2+Y_2O_3 (YSZ), Atmospheric plasma spray (APS), Isothermal oxidation, Hot corrosion"

***Sorumlu Yazar:** dervisozkan@gmail.com*

1. Giriş

Modern gaz türbinleri, uçaklar da güç kaynağı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Hizmet sırasında yüksek sıcaklıklarda, gaz türbinlerinin sıcak bileşenleri karmaşık ve zorlu koşullarla (oksidasyon, erozyon ve korozyon) karşı karşıya kalmaktadır (Shen ve ark. 2022). Termal bariyer kaplamalar (TBC'ler), süper alaşımlı alt tabakaları korumak için uçak motorlarının gaz türbinlerinin sıcak bileşenlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. TBC sistemi, yüksek sıcaklıktaki gazı sıcak parçalardan etkili bir şekilde izole edebilir ve alaşım yüzey sıcaklığını düşürerek süper alaşımı koruyabilir (Wei ve ark. 2022). Tipik olarak, TBC sistemleri dört farklı tabakadan oluşmaktadır: her biri farklı özelliklere sahip olan altlık, metalik bağ kaplama (genellikle MCrAlY M = Ni ve/veya Cr), kendinden büyüyen oksit tabakası (TGO) ve seramik üst kaplama (genellikle ağırlıkça %6–8 itriya ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ)). Bu tabakaların diğer parçalardan ayrılması kaplamayı tahrip ederek performansını düşürmektedir (Rahimi ve ark. 2022). Ni esaslı süper alaşımlar, mükemmel mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklıklarda yüksek güvenilirlikleri nedeniyle genellikle altlık malzemesi olarak kullanılmaktadır (Shi ve ark. 2020). Bağ kaplama tabakası, altlık tabakayı oksidatif ve korozif saldırılara karşı korur ve seramik üst tabaka ile altlık tabakası arasındaki bağlanmayı geliştirir. Seramik üst kaplama, metalik alt tabakadan önemli ölçüde daha düşük bir termal iletkenliğe sahiptir bu sayede bileşenlere dahili bir soğutma uygulamak mümkün olur (seramik katman boyunca birkaç 100K sıcaklık düşüşü). Bu sayede, ya metalik alt tabakaların sıcaklığını düşürmek, böylece bileşenlerin ömrünü uzatmak ya da türbindeki yanma sıcaklığını yükselterek çalışma verimini artırmak mümkün olur (Vaßen ve ark. 2010). YSZ seramik kaplama atmosferik plazma sprey (APS) veya elektron ışını-fiziksel buhar biriktirme (EB-PVD) termal sprey kaplama yöntemleri kullanılarak uygulanmaktadır (Wu ve ark. 2022). MCrAlY bağ kaplamaları da APS yöntemi ile üretilebilmektedir. APS işleminde, toz parçacıkları inert bir gazla plazma jetine enjekte edilir, eritilir ve altlık malzemesine doğru hızlandırılır. Hızlandırılmış parçacıklar altlığa yüksek hızda çarpar böylece splat sınırları, gözenekler ve mikro çatlaklar gibi tipik mikro yapısal kusurlara sahip bir kaplama üretilir (Lamuta ve ark. 2015). APS-TBC'ler, altlık yüzeyine paralel hizalanmış katmanlı bir yapı sergilemektedir. Seramik üst tabakada rastgele dağılmış mikro çatlaklar ve mikro gözenekler APS-TBC'ler de düşük termal iletkenlik sağlar (Mehboob ve ark. 2020).

TBC'ler de bulunan dört tabaka farklı fiziksel, termal ve mekanik özelliklere sahiptir. Üretim ve kullanım koşulları altında, bu tabakalar kimyasal ve mekanik olarak etkileşime girer. Tabakalar arasındaki bu etkileşimler, TBC'nin dayanıklılığını ve kullanım ömrünü belirler (Darolia 2013). Kullanım esnasında, termal genleşme katsayılarındaki uyumsuzluğun neden olduğu termal stres, yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kalma nedeniyle üst kaplama malzemesinin sinterlenmesi ve bağ kaplamasının oksidasyonu TBC'lerin hasar mekanizmalarından bazılarıdır. Bağ kaplamanın oksidasyonundan kaynaklanan TGO oluşumu, TBC sistemindeki en yaygın hasar nedenidir (Kim ve ark. 2010, Parlakyiğit ve ark. 2020). Yüksek sıcaklıklarda, seramik tabakadan oksijen difüzyonu nedeniyle bağ kaplamanın oksidasyonu, seramik/bağ kaplama arayüzünde bir TGO katmanının oluşmasına neden olur. TGO sürekli bir Al_2O_3 ölçeğinden oluşuyorsa, hizmet sırasında diğer zararlı oksitlerin oluşumunu bastırmak için bir difüzyon bariyeri görevi görecek ve böylece altlık tabakasının oksidasyondan korunmasına yardımcı olarak sistemin dayanıklılığını artıracaktır. Bununla birlikte oksidasyon koşulları altında kromya ($(Cr, Al)_2O_3$), spinel ($Ni(Cr, Al)_2O_4$) ve nikel oksit (NiO) gibi diğer bazı oksitlerde oluşabilir. Oluşan bu oksit ve spinel yapılar hızlı yerel hacim artışı nedeniyle termal bariyer kaplama sistemlerinin dayanıklılığına zarar vermektedir. Bağ tabakasının oksidasyonu, seramik tabakanın alt tabakadan ayrılmasının nedeni olarak kabul edilmiştir ve bu da TBC hasarına yol açmaktadır (Chen ve ark. 2006, Liu ve ark. 2013, Chen ve ark. 2005). TBC'lerin kullanım ömrünü kısaltan bir diğer önemli hasar mekanizması da sıcak korozyon hasarıdır. Gaz türbinlerinde kullanılan TBC'ler de, yüksek sıcaklıkta erimiş tuzların olumsuz etkilerinden dolayı sıcak korozyon meydana gelir. Sülfat ve vanadatlar gibi korozif tuzların ana kaynağı, kullanılan düşük kaliteli yakıtlarda bulunan safsızlıklardır (kükürt, vanadyum). Sıcak korozyona bağlı TBC hasar mekanizmasında, soğuma sırasında YSZ üst kaplamada %3-5'lik bir hacim değişikliği ile sonuçlanan istenmeyen bir martensitik faz dönüşümü (tetragonalden monokliniğe) meydana gelmektedir. Bu durum zirkonyada bulunan stabilizatörün (Y_2O_3) erimiş tuzlarla reaksiyona girerek kaplama yapısından uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır (Mahade ve ark. 2017, Mohammadi ve ark. 2019, Ozgurluk ve ark. 2019). Bu çalışmada, YSZ içerikli TBC sistemlerinin en önemli hasar mekanizmalarından olan oksidasyon ve sıcak korozyon hasarları farklı zaman süreçlerinde test edilerek, karakterize edilmiş ve ayrıntılı şekilde tartışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kaplama Üretimi Ve Hazırlık Süreci

Gerçekleştirilen bu çalışmada havacılık, uzay, otomotiv ve deniz sanayisinde yaygın bir şekilde kullanılan yüksek sıcaklıklarda sürünmeye, oksidasyona ve sıcak korozyona karşı dayanımı oldukça yüksek olan Nikel esaslı süper alaşım bir malzeme olan Inconel 718 TBC üretiminde altlık malzeme olarak tercih edilmiştir. İçeriğinde titanyum, molibden ve niyobyumun yanı sıra birçok element bulunan Inconel 718 malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Inconel 718 Nikel Esaslı Süper Alaşım Malzemesinin % Kimyasal Kompozisyonu

Ni	**Cr**	**Nb**	**Mo**
52-53	17-18	4-5	3-4
Cu	**Mn**	**C**	**Ta**
0,04-0,06	0,04-0,06	0,01-0,03	0,005-0,01
Ti	**Al**	**Co**	**Si**
0,5-1	0,3-0,5	0,1-0,3	0,05-0,09
P	**B**	**S**	**Fe**
0,005-0,006	0,004-0,005	0,001-0,002	Kalan

Inconel 718 süper alaşım altlık malzemeler piyasadan ticari olarak elde edilmiştir. Uzun silindirik çubuklar şeklinde satın alınan Ni-esaslı malzemelerin sertliklerinin yüksek olması ve eşit aralıklarla kesilmesi için geleneksel kesim yöntemlerinin aksine tel erozyon yöntemiyle yaklaşık olarak 5 mm kalınlıklar uzunluklar halinde kesilmiştir. 1 inç (25,4 mm) çapa sahip olan silindirik çubuklar tel erozyon yönteminin ardından kaplama işlemine hazır hale getirilmesi ve yüzeylerde oluşan oksit, kir ve pasların temizlenmesi için 2-3 bar basınç altında Al_2O_3 aşındırıcı toz partikülleri eşliğinde kumlama işlemine tabi tutulmuştur. Yüksek basınçlarda gerçekleştirilen kumlama işlemlerinin ardından kaplama işlemine hazır hale gelmiş olan altlık malzemelerin üst yüzeylerine yaklaşık olarak 100 µm kalınlığında metalik bağ kaplama üretimi gerçekleştirilmiştir. CoNiCrAlY (Sulzer Metco, Amdry 9951, 5-37 µm) içeriğine sahip bağ kaplama tozları termal sprey kaplama yöntemlerinden geleneksel, çok kullanışlı ve en çok tercih edilen bir yöntem olan APS yöntemiyle süper alaşım malzemelerin üzerine biriktirilmiştir. Bağ kaplamaların üzerine ise yine APS yöntemi kullanılarak yaklaşık 200 µm kalınlıklarda YSZ seramik üst kaplama üretimi de APS yöntemiyle biriktirilmiştir. Bağ kaplama ve üst kaplama üretim yöntemi olarak kullanılan termal sprey kaplama yönteminin üretim parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. TBC Üretiminde Kullanılan APS Kaplama Yönteminin Parametreleri

Ark Akımı	Elektrik gücü	Argon akış hızı	Hidrojen akış hızı	Toz besleme hızı	Püskürtme mesafesi
600 A	40 kW	65 slpm	14 slpm	30 g/dk	140 mm

2.2. İzotermal Oksidasyon Testleri

TBC sistemleri, birçok endüstride özellikle de motorların yanma odaları, yakıt depoları ve nozullar gibi uçağın belirli bölümlerinde yüksek sıcaklıklara maruz kalan kısımlarda yüksek sıcaklık direnci, termal şok direnci ve mekanik dayanım için tercih edilmektedir. TBC sistemlerindeki TGO, bağ kaplama ile üst kaplama arasında yüksek sıcaklıklarda kendiliğinden oluşan, termal olarak büyüyen bir oksit tabakasıdır. Seramik üst kaplamaların yüksek oksijen geçirgenliği nedeniyle TGO oluşumu kaçınılmaz bir durumdur. Aynı zamanda yapıdaki bağ kaplamaların özellikleri de TGO oluşumunu tetikleyen bir diğer faktördür. Yüksek gözenekli bir bağ kaplama, oksijen geçişine neden olur ve TGO oluşumunu hızlandırır. Bu çalışmada, geleneksel üst kaplama malzemesi olan YSZ içeriğine sahip TBC sistemlerinin izotermal oksidasyon davranışları incelenmiştir. Oksidasyon testleri için APS yöntemi ile bağ ve üst kaplamaları biriktirilen 1inç çapına sahip TBC sistemleri dört eşit parçaya bölünerek Protherm, PLF 130/12, Türkiye marka ve modele sahip atmosfer koşullarına açık yüksek sıcaklık fırını içerisinde 750°C'de 5, 25, 50 ve 75 saat boyunca tutulmuştur. Gerçekleştirilen testler sonrasında taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınım (XRD) analizi, enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) ve SEM elementel haritalama analiz yöntemleri ile karakterize edilerek değerlendirilmiştir.

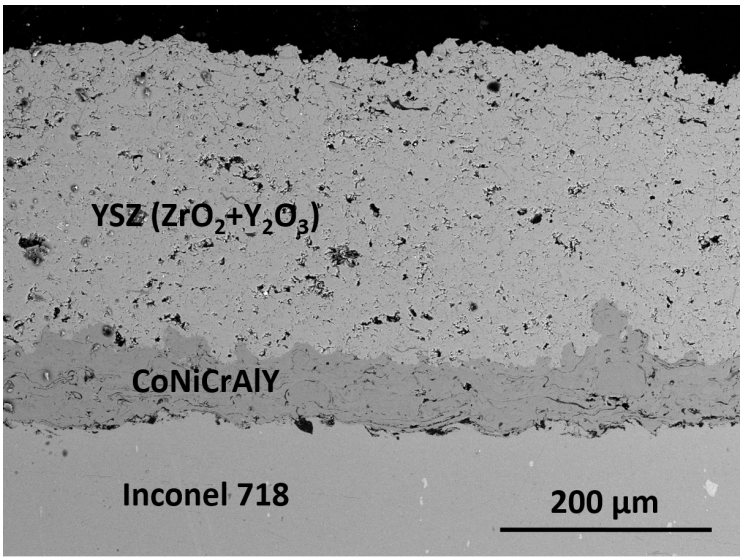
2.3. İzotermal Sıcak Korozyon Testleri

TBC sistemlerinde diğer bir önemli hasar mekanizması ise, sıcak korozyon hasarıdır. Sıcak korozyon hasarları oldukça tehlikeli ve istenmeyen bir durumdur. Bu hasar mekanizması uçak motorlarında kullanılan yakıt içerisindeki safsızlıkların yüksek sıcaklıklarda ergiyerek TBC sistemi içerisine nüfuz etmesi ve sistem içerisinde oluşturdukları etkileşimler neticesinde meydana gelir. Sıcak korozyon oluşumunda öncü rol oynayan erimiş tuzlar, seramik üst kaplama ile reaksiyona girebilir. Akabinde soğutmaya tabi tutulan kaplamalarda faz dönüşümleri meydana gelir. Faz dönüşümü sergileyen TBC'ler hacim olarak genişler. Böylece kaplamalarda ayrışmalar ve çatlaklar oluşmaya başlar. Bu nedenle sıcak korozyonu en aza indirmek için dayanıklı ve uzun ömürlü kaplamaların kullanılması çok önemlidir. Gerçekleştirilen bu çalışmada, geleneksel üst kaplama malzemesi olan YSZ içeriğine sahip TBC sistemleri 750°C'de 1, 3 ve 5 saat boyunca izotermal sıcak korozyon testlerine tabi tutulmuştur. Sıcak korozyon testleri için dört eşit parçaya bölünen TBC sistemlerinin her birinin üzerine 10 mg/cm^2 miktarında ağırlıkça %55 V_2O_5 + %45 Na_2SO_4 tuz karışımı serpilerek Protherm, PLF 130/12, Türkiye marka ve modele sahip fırın içerisine yerleştirilmiş ve korozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Sıcak korozyon testlerinden önce ve sonra TBC numuneleri üzerinde faz analizi için EDS, SEM ve XRD analizleri yapılmıştır.

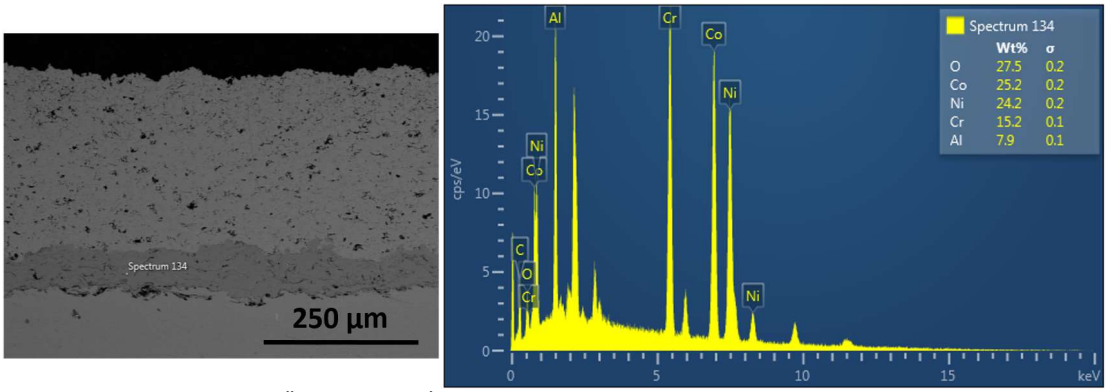
3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. YSZ İçerikli TBC'lerin Mikroyapısal Karakterizasyonu

Şekil 1'de kaplanmış haldeki numunenin mikroyapısı verilmektedir. Seramik YSZ kaplama yapısında Porozite ve oksit yapıları mevcuttur. Bağ tabakada ise erimenin tam gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Aynı zamanda altlık-bağ kaplama ve bağ kaplama-seramik kaplama arasında yapışmanın ileri derecede olduğu anlaşılmaktadır. TBC sisteminde, kaplamanın termal iletim katsayısına porozitenin oldukça ciddi bir katkısı olmaktadır (Portinha et al. 2005). Ayrıca termal bariyer kaplamalarda dikey çatlakların oluşması mümkündür. Bazı durumlarda dikey çatlakların varlığı termal-çevrim özelliklerini iyileştirse de korozif ürünlerin altlığa ilerlemesi için patika görevi görmektedir (Kulkarni et al. 2004).

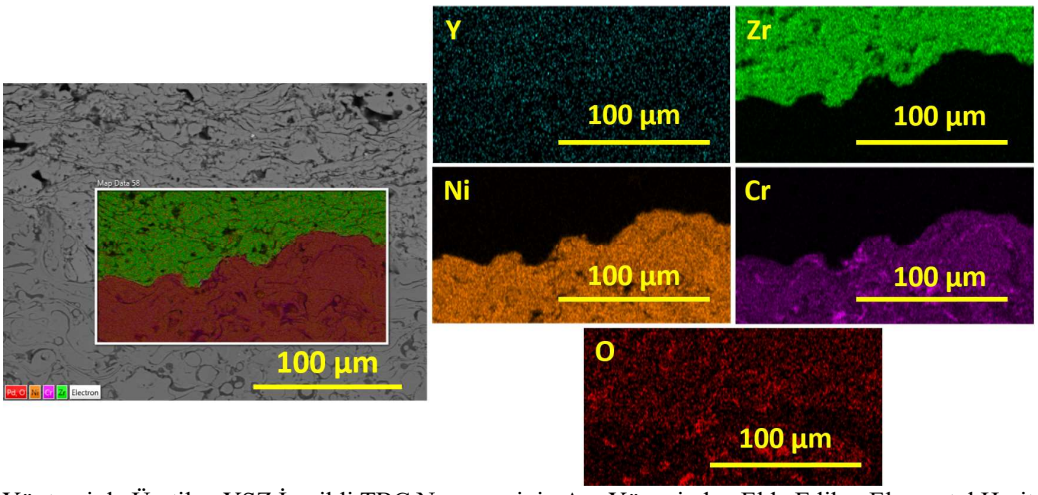


Şekil 1. APS Yöntemiyle Üretilen YSZ İçerikli TBC Numunesinin Ara Yüzey Mikroyapısı



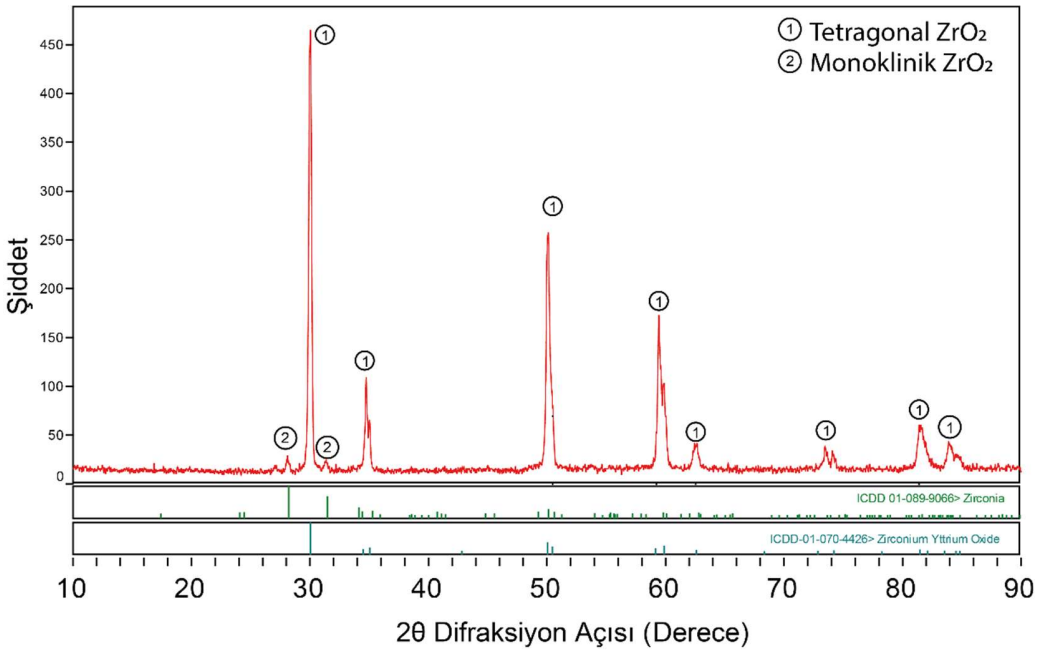
Şekil 2. APS Yöntemiyle Üretilen YSZ İçerikli TBC Numunesinin Ara Yüzeyinden Alınan EDS Analizi

Şekil 3'te gösterilen EDX spektrumuna göre bağ tabakanın Co, Cr, Ni, Al elementlerinden oluştuğu ve püskürtme sırasında oksitlenmelerin oluştuğu anlaşılmaktadır. Nispeten koyu görülen bölgelerin oksijence zengin bölgeler olduğu bulunmuştur. Püskürtme sırasında yüksek sıcaklıklara çıkan partiküllerin uçuş sırasında oksitlenmesi beklenen bir durumdur.



Şekil 3. APS Yöntemiyle Üretilen YSZ İçerikli TBC Numunesinin Ara Yüzeyinden Elde Edilen Elementel Haritalama Analizi

Şekil 4'te üretilen kaplama numunesinin XRD diffraktogramı verilmektedir. Kaplamanın üst tabakasının tetragonal ZrO_2 fazından oluştuğu ve ICDD kartlarından 70-4426 kart numarası ile eşleştiği bulunmuştur. Bu faz (Guo et al. 2003) özellikle ZrO_2 fazının artan sıcaklıklarda polimorfik dönüşüm gösterdiği yüksek sıcaklık fazıdır. ZrO_2 oda sıcaklığında monokilinik yapıda olmakla beraber yaklaşık 1000 °C civarında tetragonal yapıya dönüşmektedir (Brandon and Taylor, 1991). Yapıdaki bu dönüşüm yaklaşık olarak %4 civarında hacimsel bir genleşme ortaya çıkarmaktadır ve kaplamada çekme gerilmelerine sebep olmaktadır. Bu nedenle yapıya ilave edilen Y_2O_3 fazı ile ZrO_2 kafesi oda sıcaklığında da tetragonal yapıda olmaktadır (Gorelov, 2019). Kaplamada aynı zamanda az miktarda monoklinik yapıda ZrO_2 bulunduğu ICDD 089-9066 kart numarası ile tespit edilmiştir. Termal bariyer kaplamalarda her iki fazın bulunması beklenen ve arzu edilen bir durumdur. Az miktarda monoklinik yapı artan sıcaklıklarda faz dönüşümü ile birlikte kırılma tokluğunu artırıcı özellik göstermektedir (Loganathan ve Gandhi, 2012).

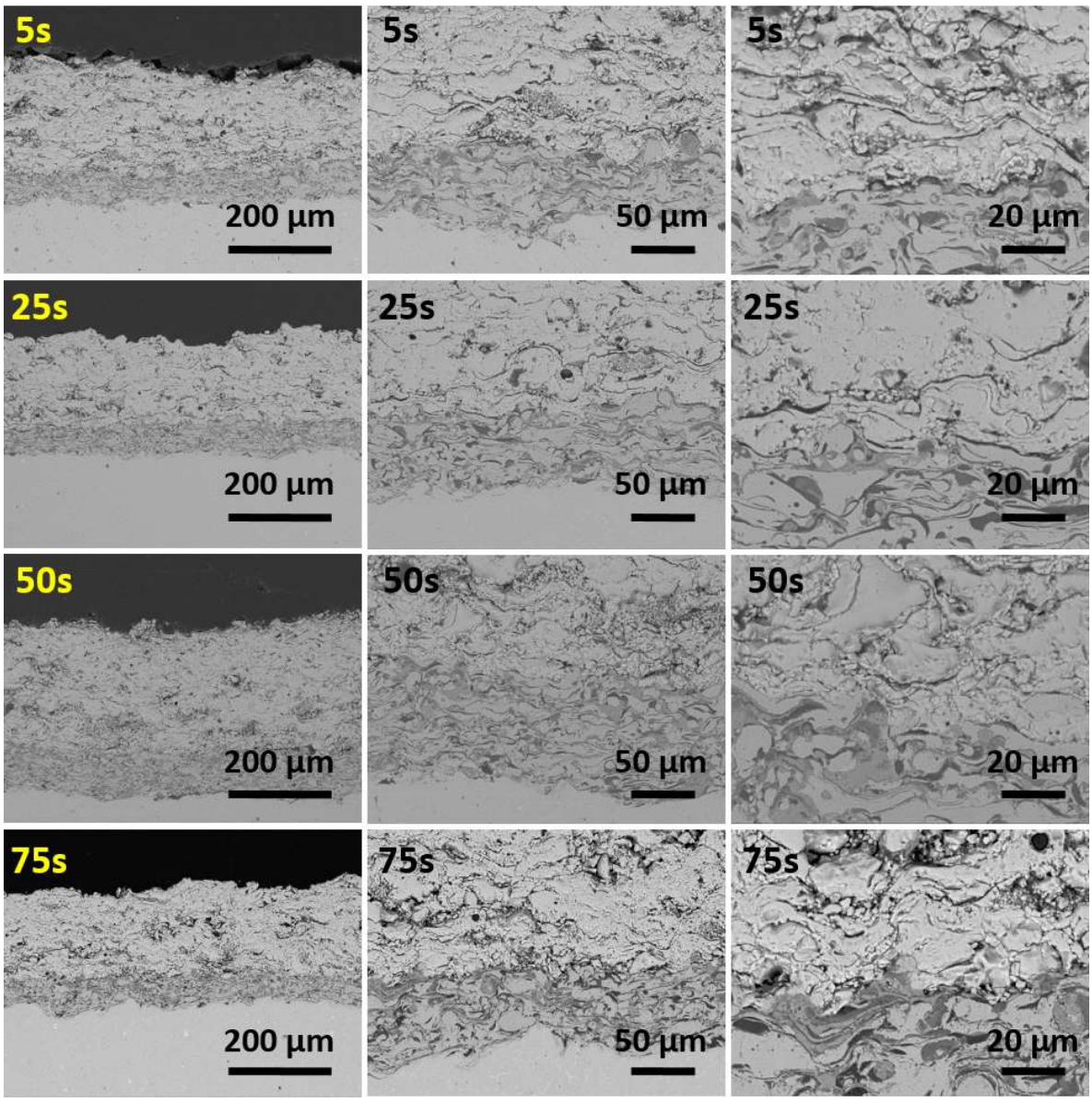


Şekil 4. APS Yöntemiyle Üretilen YSZ İçerikli TBC Numunesine Ait XRD Paterni

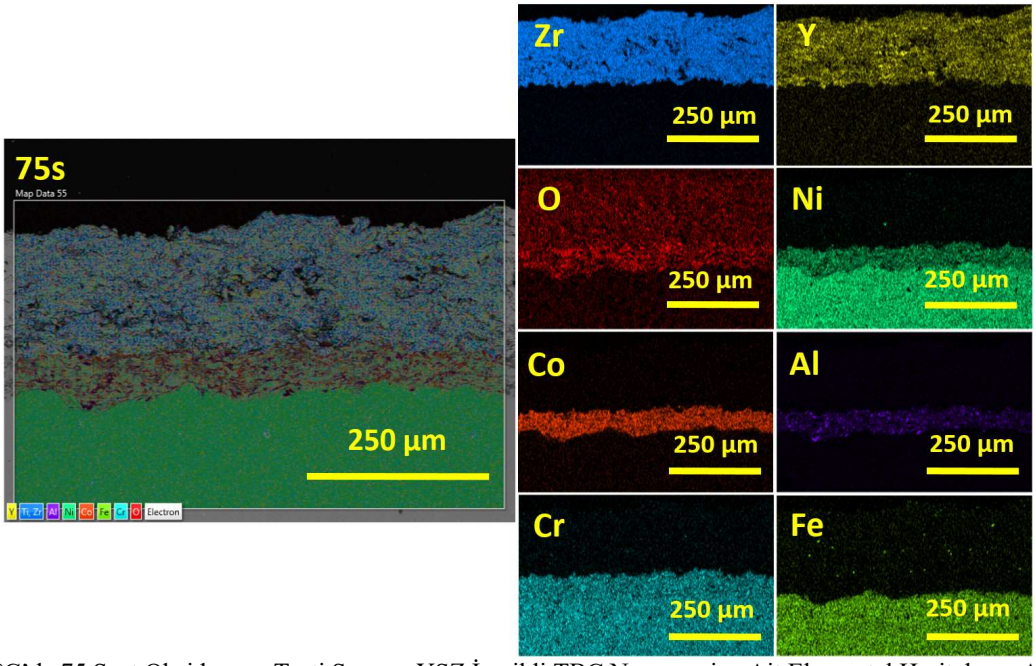
3.2. YSZ İçerikli TBC'lerin Oksidasyon Davranışları

Oksidasyon testleri sonrası numuneler SEM ile incelenmiş ve görüntüler Şekil 5'te verilmektedir. Artan test süresine bağlı olarak kaplama bünyesinde önemli bir değişiklik olmadığı gözlenmektedir. Termal bariyer kaplamaların yüksek sıcaklıklarda çalıştığı göz önüne alındığında YSZ tabakasından bağ tabakaya doğru oksijen difüzyonu gerçekleşmektedir (Brossmann et al., 1999). Difüze olan oksijen bağ tabaka üzerinde oksidasyona sebep olarak TGO adı verilen kendiliğinden büyüyen bir oksit tabakası oluşturur (Rabiei and Evans, 2000, Özkan, 2022). Çalışma şartlarında, TGO tabakasının varlığı difüzyon bariyeri olarak rol oynasa da artan kalınlıkla birlikte gerilim oluşturucu bir etken halini alır (Rabiei and Evans, 2000). Şekil 5 ve Şekil 6'da verilen izotermal oksidasyon testleri sonrası elde edilen görüntüler ve elementel haritalamadan anlaşılacağı üzere önemli ölçüde bir TGO tabakası oluşmadığı gözlenmektedir.

Ancak bağ tabakada oksit miktarının arttığı anlaşılmıştır. Ayrıca kaplamada herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Artan süre ile kaplama yapısındaki porozite miktarının azaldığı dikkati çekmektedir.

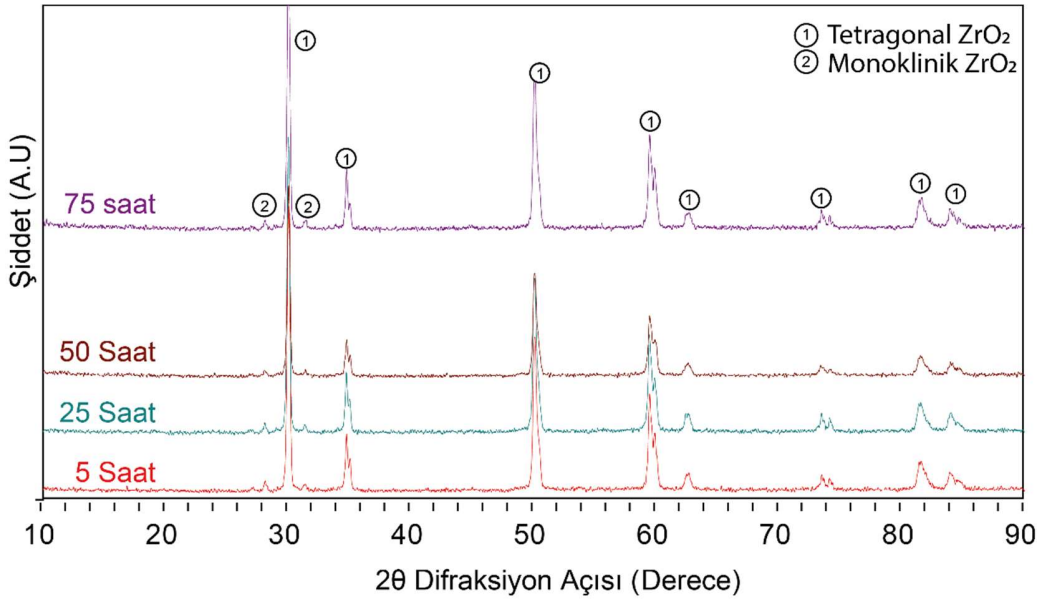


Şekil 5. 750 °C'de 5, 25, 50 Ve 75 Saat Oksidasyon Testi Sonrası YSZ İçerikli TBC Numunelerine Ait SEM Görüntüleri



Şekil 6. 750 °C'de 75 Saat Oksidasyon Testi Sonrası YSZ İçerikli TBC Numunesine Ait Elementel Haritalama Analiz Sonucu

Şekil 7'de oksidasyon testleri sonrası numunelerin XRD analizi sonuçları verilmektedir. İlk kaplama sonrasındaki yapı ile uyumlu olmakla beraber kaplama yapısında bir değişiklik gözlenmemiştir. Bu test sıcaklığının kaplama yapısında hem morfolojik hem de faz yapısına olumsuz bir etki oluşturmadığı görülmüştür.

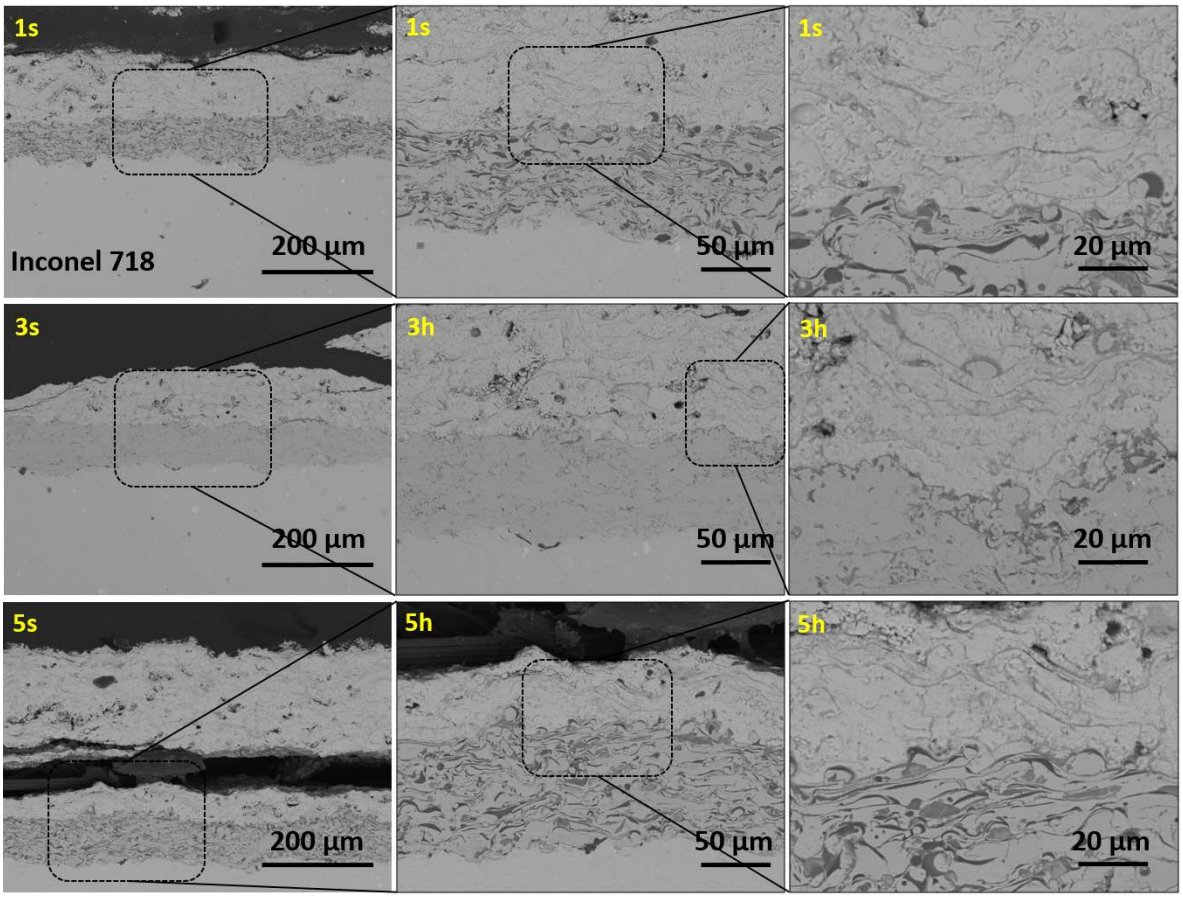


Şekil 7. YSZ İçerikli TBC Numunelerinin 700 °C'de Oksidasyon Testi Sonrası Elde Edilen XRD Analiz Sonuçları

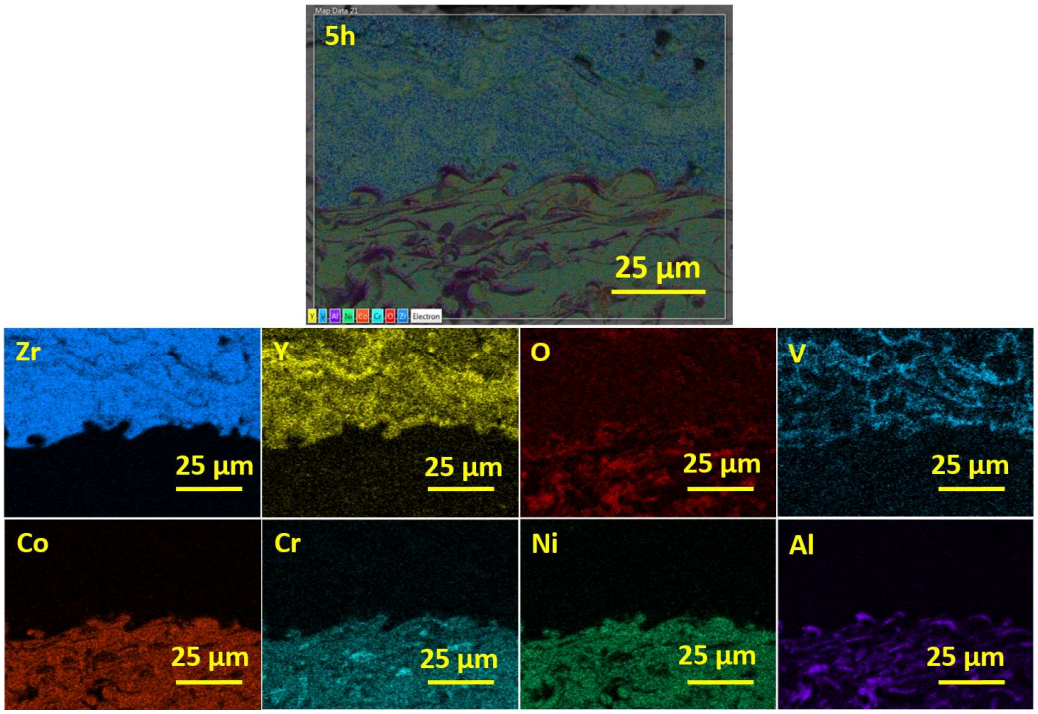
3.3. YSZ İçerikli TBC'lerin Sıcak Korozyon Hasar Davranışları

Şekil 8'de korozyon testleri sonrası numunelerin mikroyapıları verilmektedir. 1 saat test sonrası kaplama yapısında ciddi kusurlar gözlenmemişken, 3 saat sonrasında testlerde ara yüzey yapısında TGO oluşumu gözlenmektedir. 5 saat sonrası YSZ tabakasının kendi içerisinde ayrılma göstermiştir. Şekil 9'da verilen elementel dağılıma göre V elementinin YSZ tabaka içerisinde yayılım gösterdiği görülmektedir. Aynı zamanda V elementinin yoğun olduğu kısımlarda Y elementinin de yaygın olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum ZrO_2 içine yapılan Y_2O_3 ilavesi ile tetragonal faza sabitlenmiş ve ZrO_2 yapısında bulunan Y_2O_3 fazının kafes dışına çıktığını işaret eden bir bulgu olmaktadır. V elementinin bağ tabakada bulunmadığı herhangi bir reaksiyona girmediği anlaşılmaktadır. V elementinin dağılımı incelendiğinde orijinal kaplama yapısını oluşturan splat yapılarının sınırlarında daha yoğun olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu durum V elementinin difüzyonunun test sıcaklığında splat ara yüzeyinde daha kolay ilerlediği sonucunu çıkarmaktadır. Suspensiyon plazma sprey ile üretilmiş YSZ esaslı kaplamalara yapılan sıcak korozyon testlerinde V elementinin nüfuz etme mekanizması kaplama

morfolojisine göre incelenmiştir (Kumar et al. 2021). Verilen mekanizmaya göre yüksek poroziteye sahip kaplamalarda V nüfuziyetinin kolonsal büyümüş yapıların açıklılarında olduğu bulunmuştur.



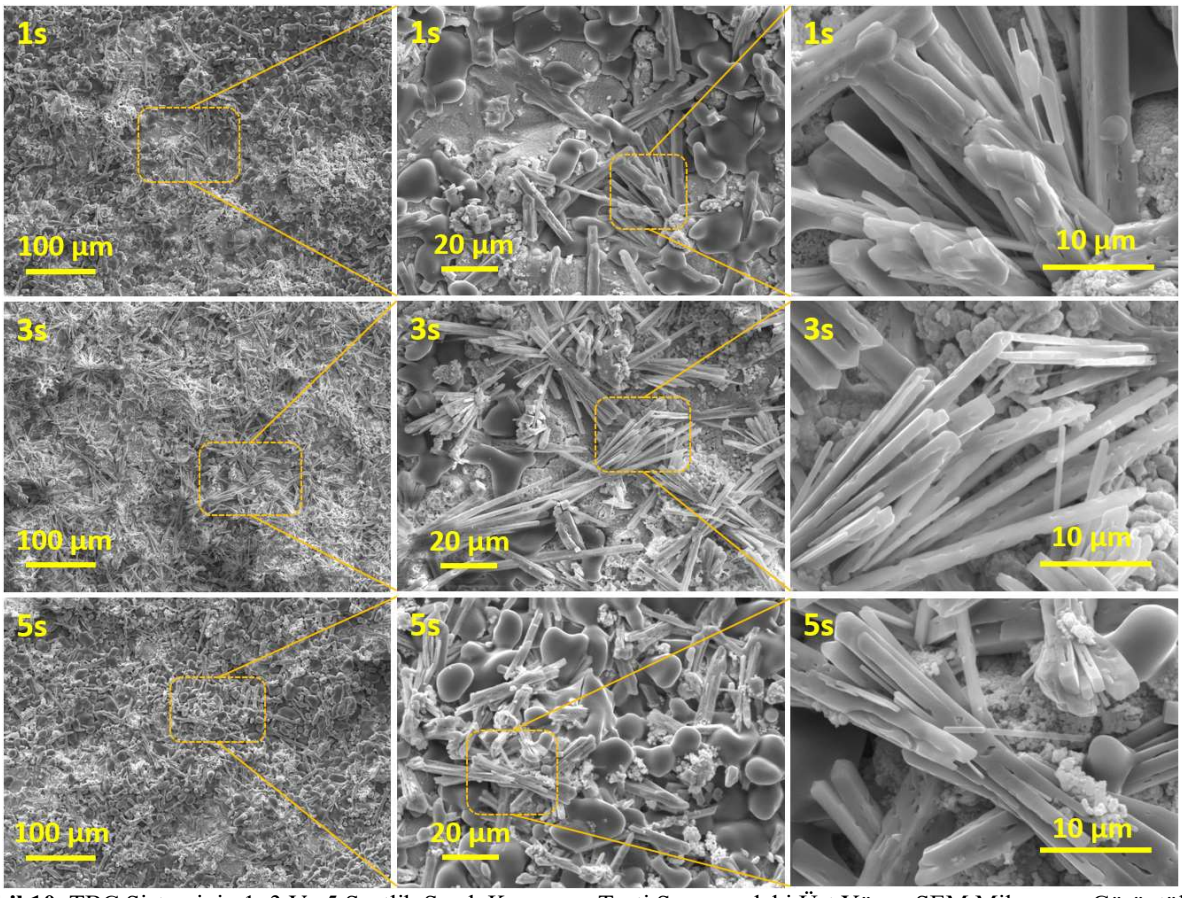
Şekil 8. TBC Sisteminin 1, 3 Ve 5 Saatlik Sıcak Korozyon Testi Sonrasındaki SEM Mikroyapı Görüntüleri



Şekil 9. TBC Sisteminin 5 Saatlik Sıcak Korozyon Testi Sonrasındaki Elementel Haritalama Analizi Görüntüleri

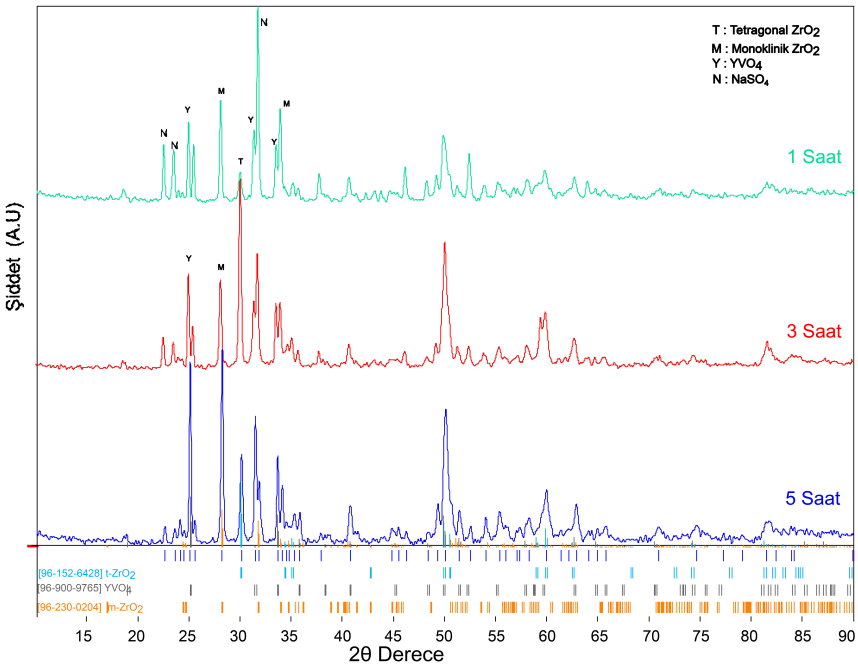
Korozyon testine tabi tutulmuş numunelerin üst yüzeylerinden alınan SEM görüntülerinde (Şekil 10), kaplama üst yüzeyinde iğnemsi yapıda oluşumların varlığı gözlenmektedir. Artan test süresi ile bu yapıların varlığının arttığı gözlenmiştir. V_2O_5 tuzu ile yapılan çeşitli testlerde benzer yapıların olduğu birçok yayında mevcuttur (Afrasiabi et al. 2008, Jones, 1997, Vakilifard et al. 2017). Na_3VO_4, $NaVO_3$ ve V_2O_5 tuzlarında artan V_2O_5 oranı ile asitlik değerinin arttığı bilinmektedir (Jones, 1997). Artan asitlik değeri ile reaksiyon sırasıyla Y_2O_3 ile ardından ZrO_2 arasında oluştuğu bilinmektedir. ZrO_2 yapısından bulunan Y_2O_3'ün reaksiyonu ise Denklem 1'e göre oluşmaktadır.

$$ZrO_2(Y_2O_3) + V_2O_5 \longrightarrow ZrO_{2(monoklinik)} + 2YVO_4 \qquad \text{Denklem 1}$$



Şekil 10. TBC Sisteminin 1, 3 Ve 5 Saatlik Sıcak Korozyon Testi Sonrasındaki Üst Yüzey SEM Mikroyapı Görüntüleri

Korozyon testi sonrası numunelere yapılan XRD analiz sonucu Şekil 11'de verilmektedir. Tespit edilen ilgili fazların COD veri tabanı numaraları ve fazların paternleri şekilde belirtilmektedir. Elde edilen sonuca göre kaplama yapısında tetragonal ZrO_2, monoklinik ZrO_2 ve YVO_4 fazlarından oluştuğu sonucu elde edilmiştir. Bunun yanı sıra artan test süresi ile YVO_4 miktarının arttığı görülmektedir. Ayrıca monoklinik ZrO_2 yapısının giderek azaldığı 28 derece civarındaki (100) pikinin şiddet değerinin artışından anlaşılmaktadır. Test süresince reaksiyon mekanizmasının Denklem 1'de verildiği üzere olduğu anlaşılmaktadır. Tetragonal ZrO_2 yapısındaki Y_2O_3'ün kafes dışına çıkarak YVO_4 fazını oluşturduğu ve monoklinik ZrO_2 fazına dönüştüğü görülmektedir. Aynı zamanda m-ZrO_2 fazının ise artan test süresi ile şiddetinin arttığı anlaşılmaktadır. 1 saatlik test sonrası gözlenen fazlar arasında önemli ölçüde $NaSO_4$ (NS) fazının varlığı görülmektedir. NS fazı artan süre ile azalarak yerini YVO_4 ve m-ZrO_2 fazına bırakmıştır. Ayrıca V_2O_5 fazına rastlanılmamıştır. Bu durumda korozyon reaksiyon mekanizması 750 °C sıcaklık altında NS fazının önemli etki göstermediği, V_2O_5 ile reaksiyonun daha hızlı gerçekleştiği anlaşılmıştır.



Şekil 11. TBC Sisteminin Sıcak Korozyon Testi Sonrası Farklı Zaman Süreçlerindeki XRD Analizi Sonuçları

4. Sonuçlar

Inconel 718 süper alaşım altlık malzeme üzerine atmosferik plazma sprey kaplama (APS) yöntemi kullanılarak CoNiCrAlY içerikli metalik ve YSZ içerikli seramik üst kaplamaların üretilmesi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. İzotermal oksidasyon testleri sonucunda gerçekleştirilen test sıcaklık aralığında metalik bağ ile seramik üst kaplama ara yüzeyinde TGO tabakasının yeterli düzeyde oluşmadığı ancak dâhili iç oksit yapılarının kaplama içerisinde oluşum gösterdiği belirlenmiştir. Sıcak korozyon testleri sonucunda ise kaplama yüzeyinde YVO_4 ve monoklinik zirkonya faz yapılarının oluşum gösterdiği görülmüştür. YSZ seramik kaplama üst yapısına sahip TBC sisteminde sıcak korozyon testleri sonucunda yapı içerisinde uzun çubuksu yapıların oluşum gösterdiği belirlenmiştir. Sıcak korozyon zaman süreci arttıkça oluşan çubuksu yapılarının boyutlarının değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen SEM elementel haritalama ve XRD analizleri neticesinde yüzeyde belirgin bir şekilde oluşum gösteren yapıların YVO_4 kristallerine ait olduğu anlaşılmıştır. TBC sisteminin mikroyapısal değişiminin oksidasyon ve sıcak korozyon süreçlerine göre değişim gösterdiği görülmüştür. Uygulanan test sıcaklığı ve zaman süreçlerinin oluşan hasarların ilerlemesinde etkili olan faktörler arasında yer aldığı görülmüştür. Diğer etki eden faktörleri ise TBC sistemini oluşturan altlık malzeme yapısı, bağ kaplama ve üst kaplama içerikleri, uygulanan sıcak korozyon ortamını oluşturan kimyasal bileşimlerin içerikleri ve oranları oluşturmaktadır. Bundan sonraki gerçekleştirilecek çalışmalarda TBC'lerin farklı sıcaklık ve zaman süreçlerinde gerçekleştirilecek oksidasyon testleri, farklı TBC sistemi kaplama içerik yapıları, sıcak korozyon testlerini oluşturan farklı kimyasal bileşimler ve bileşenlerin oranları üzerine yoğunlaşılacaktır.

Referanslar

Afrasiabi, A., Saremi, M., Kobayashi, A., (2008). A comparative study on hot corrosion resistance of three types of thermal barrier coatings: YSZ, YSZ+Al_2O_3 and YSZ/Al_2O_3. Mater. Sci. Eng. A 478, 264–269. doi: 10.1016/j.msea.2007.06.001

Brandon, J.R., Taylor, R., 1991. Phase stability of zirconia-based thermal barrier coatings part I. Zirconia-yttria alloys. Surf. Coat. Technol. 46, 75–90. doi:10.1016/0257-8972(91)90151-L

Brossmann, U., Würschum, R., Södervall, U., Schaefer, H.-E., (1999). Oxygen diffusion in ultrafine grained monoclinic ZrO_2. J. Appl. Phys. 85, 7646–7654. doi:10.1063/1.370567

Chen, W. R., Wu, X., Marple, B. R., Patnaik, P.C. (2006). The growth and influence of thermally grown oxide in a thermal barrier coating Surf. Coat. Technol., 201(3-4), 1074-1079. doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.01.023

Chen, W. R., Wu, X., Marple, B. R., Patnaik, P.C. (2005). Oxidation and crack nucleation/growth in an air-plasma-sprayed thermal barrier coating with NiCrAlY bond coat. Surf. Coat. Technol, 197(1), 109-115. doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.06.027

Darolia, R., Thermal barrier coatings technology: critical review, progress update, remaining challenges and prospects, International Materials Reviews, 58:6, 315-348, 2013. doi:10.1179/1743280413Y.0000000019.

Gorelov, V.P., (2019). High-Temperature Phase Transitions in ZrO_2. Phys. Solid State 61, 1288–1293. doi:10.1134/S1063783419070096

Guo, H., Khor, K.A., Boey, Y.C., Miao, X., (2003). Laminated and functionally graded hydroxyapatite/yttria stabilized tetragonal zirconia composites fabricated by spark plasma sintering. Biomaterials 24, 667–675. doi:10.1016/S0142-9612(02)00381-2

Jones, R.L., (1997). Some Aspects of the Hot Corrosion of Thermal Barrier Coatings. J. Therm. Spray Technol. 6, 77–84. doi:10.1007/BF02646315

Kim, D.J., Shin, I.H., Koo, J.M., Seok, C.S., Lee, T.W., (2010). Failure mechanisms of coin-type plasma-sprayed thermal barrier coatings with thermal fatigue. Surf. Coat. Technol, 205, S451-S458. doi:10.1016/j.surfcoat.2010.08.130

Kulkarni, A., Gutleber, J., Sampath, S., Goland, A., Lindquist, W.B., Herman, H., Allen, A.J., Dowd, B., (2004). Studies of the microstructure and properties of dense ceramic coatings produced by high-velocity oxygen-fuel combustion spraying. Mater. Sci. Eng. A 369, 124–137. doi:10.1016/j.msea.2003.10.295

Kumar, N., Mahade, S., Ganvir, A., Joshi, S., (2021). Understanding the influence of microstructure on hot corrosion and erosion behavior of suspension plasma sprayed thermal barrier coatings. Surf. Coat. Technol. 419, 127306. doi:10.1016/j.surfcoat.2021.127306
Lamuta, C., Di Girolamo, G., Pagnotta, L. (2015). Microstructural, mechanical and tribological properties of nanostructured YSZ coatings produced with different APS process parameters. Ceramics International, 41(7), 8904-8914. doi:10.1016/j.ceramint.2015.03.148

Liu, D., Seraffon, M., Flewitt, P.E., Simms, N.J., Nicholls, J.R., Rickerby, D.S., (2013). Effect of substrate curvature on residual stresses and failure modes of an air plasma sprayed thermal barrier coating system. Journal of the European Ceramic Society, 33(15-16), 3345-3357. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2013.05.018

Loganathan, A., Gandhi, A.S., (2012). Effect of phase transformations on the fracture toughness of t′ yttria stabilized zirconia. Mater. Sci. Eng. A 556, 927–935. doi:10.1016/j.msea.2012.07.095

Mahade, S., Jonnalagadda, K. P., Curry, N., Li, X. H., Björklund, S., Markocsan, N., Peng, R.L., (2017). Engineered architectures of gadolinium zirconate based thermal barrier coatings subjected to hot corrosion test. Surf. Coat. Technol, 328, 361-370. doi:10.1016/j.surfcoat.2017.09.005

Mehboob, G., Liu, M. J., Xu, T., Hussain, S., Mehboob, G., Tahir, A., (2020). A review on failure mechanism of thermal barrier coatings and strategies to extend their lifetime. Ceramics International, 46(7), 8497-8521. doi:10.1016/j.ceramint.2019.12.200

Mohammadi, M., Kobayashi, A., Javadpour, S., Jahromi, S.A.J., (2019). Evaluation of hot corrosion behaviors of Al_2O_3-YSZ composite TBC on gradient MCrAlY coatings in the presence of Na_2SO_4-$NaVO_3$ salt. Vacuum, 167, 547-553, 2019. doi:10.1016/j.vacuum.2018.04.042

Ozgurluk, Y., Doleker, K.M., Ozkan, D., Ahlatci, H., Karaoglanli, A.C., (2019). Cyclic hot corrosion failure behaviors of EB-PVD TBC systems in the presence of sulfate and vanadate molten salts. Coatings, 9(3), 166. doi:10.3390/coatings9030166

Özkan, D. (2022). MCrAlY İçerikli Bağ Kaplamaya Sahip Termal Bariyer Kaplamaların (TBCs) Mikroyapısal Özelliklerinin ve İzotermal Oksidasyon Davranışının İncelenmesi. Politeknik Dergisi, 25 (1) , 331-338. doi:10.2339/politeknik.885466

Parlakyigit, A.S., Ozkan, D., Oge, M., Ozgurluk, Y., Doleker, K.M., Gulmez, T., Karaoglanli, A.C., (2020). Formation and growth behavior of TGO layer in TBCs with HVOF sprayed NiCr bond coat. Emerging Materials Research, 9(2), 451-459.

Portinha, A., Teixeira, V., Carneiro, J., Martins, J., Costa, M.F., Vassen, R., Stoever, D., (2005). Characterization of thermal barrier coatings with a gradient in porosity. Surf. Coat. Technol. 195, 245–251. doi:10.1016/j.surfcoat.2004.07.094

Rabiei, A., Evans, A.G., (2000). Failure mechanisms associated with the thermally grown oxide in plasma-sprayed thermal barrier coatings. Acta Mater. 48, 3963–3976. doi:10.1016/S1359-6454(00)00171-3

Rahimi, J., Sigaroodi, M.R.J., Poursaeidi, E., (2022). Thermal shock resistance of thermal barrier coating with different bondcoat types and diffusion pre-coating. Ceramics International. doi:10.1016/j.ceramint.2022.09.172

Shen, Z., Liu, G., Zhang, R., Dai, J., He, L., Mu, R., (2022). Thermal property and failure behavior of LaSmZrO thermal barrier coatings by EB-PVD. Iscience, 25(4), 104106. doi:10.1016/j.isci.2022.104106

Shi, J., Zhang, T., Sun, B., Wang, B., Zhang, X., Song, L., (2020). Isothermal oxidation and TGO growth behavior of NiCoCrAlY-YSZ thermal barrier coatings on a Ni-based superalloy. Journal of Alloys and Compounds, 844, 156093. doi:10.1016/j.jallcom.2020.156093

Wei, ZY., Meng, GH., Chen, L., (2022). Progress in ceramic materials and structure design toward advanced thermal barrier coatings. J Adv Ceram 11, 985–1068. doi:10.1007/s40145-022-0581-7

Vaßen, R., Jarligo, M.O., Steinke, T., Mack, D. E., Stöver, D., (2010). Overview on advanced thermal barrier coatings Surf. Coat. Technol, 205(4), 938-942. doi:10.1016/j.surfcoat.2010.08.151

Vakilifard, H., Ghasemi, R., Rahimipour, M., (2017). Hot corrosion behaviour of plasma-sprayed functionally graded thermal barrier coatings in the presence of Na_2SO_4+V_2O_5 molten salt. Surf. Coat. Technol. 326, 238–246. doi:10.1016/j.surfcoat.2017.07.058

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

UMAGD, (2023) 15(2), 416-428.

10.29137/umagd.1241090

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

TBDY 2018 ile Tasarlanan Kompozit Binaların Ana ve Artçı Depremlerde Davranışı

Behaviour of Composite Buildings Designed with TBDY 2018 in Main and Aftershocks

Serkan ETLİ [1], Melek AKGÜL [2*]

[1]Munzur Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, 62000, Tunceli, TÜRKİYE
[2,] Munzur Üniversitesi, Tunceli MYO, 62000, Tunceli, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 23/01/2023* ***Kabul / Accepted**: 27/02/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 06/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: xx/xx/xxxx*

Özet

Çalışma kapsamında 5, 10, 15 ve 20 katlı moment aktaran kompozit çerçevelerden oluşan yapıların TBDY 2018 tasarım koşulları ile ZA grubu zeminler için tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan yapıların zaman tanım alanında dinamik analiz kullanılarak davranışları değerlendirilmiştir. Kullanılan depremler ana deprem ve artçı depremlerden oluşan seriler halinde seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar çatı katı yer değiştirmeleri, taban kesme oranları, katlar arası ötelenme ve taban ivmeleri açısından değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen yapıların söz konusu ana ve artçı depremler etkisi altında incelenen parametreler açısından yeterli bir davranış sergilediği ortaya koyulmuştur.

Anahtar Kelimeler

"Ana ve artçı depremler, Kompozit moment aktaran çerçeve, TBDY 2018, Zaman tanım alanında dinamik analiz"

Abstract

Within the scope of the study, the designs of the structures consisting of 5, 10, 15 and 20 story moment resisting composite frames were carried out for TBDY 2018 and ZA group soils. The behavior of the designed structures was evaluated by using dynamic analysis in the time history domain. The earthquakes used were selected in series consisting of the main earthquake and aftershocks. The results obtained were evaluated in terms of roof displacements, base shear coefficients, interstory drift and base accelerations. The structures examined within the scope of the study show excellent behavior under the influence of the main and aftershocks.

Key Words

"Main and aftershocks, Composite moment resisting frame, TBDY 2018, Dynamic analysis in time history"

***Sorumlu Yazar: melekakgul@munzur.edu.tr**

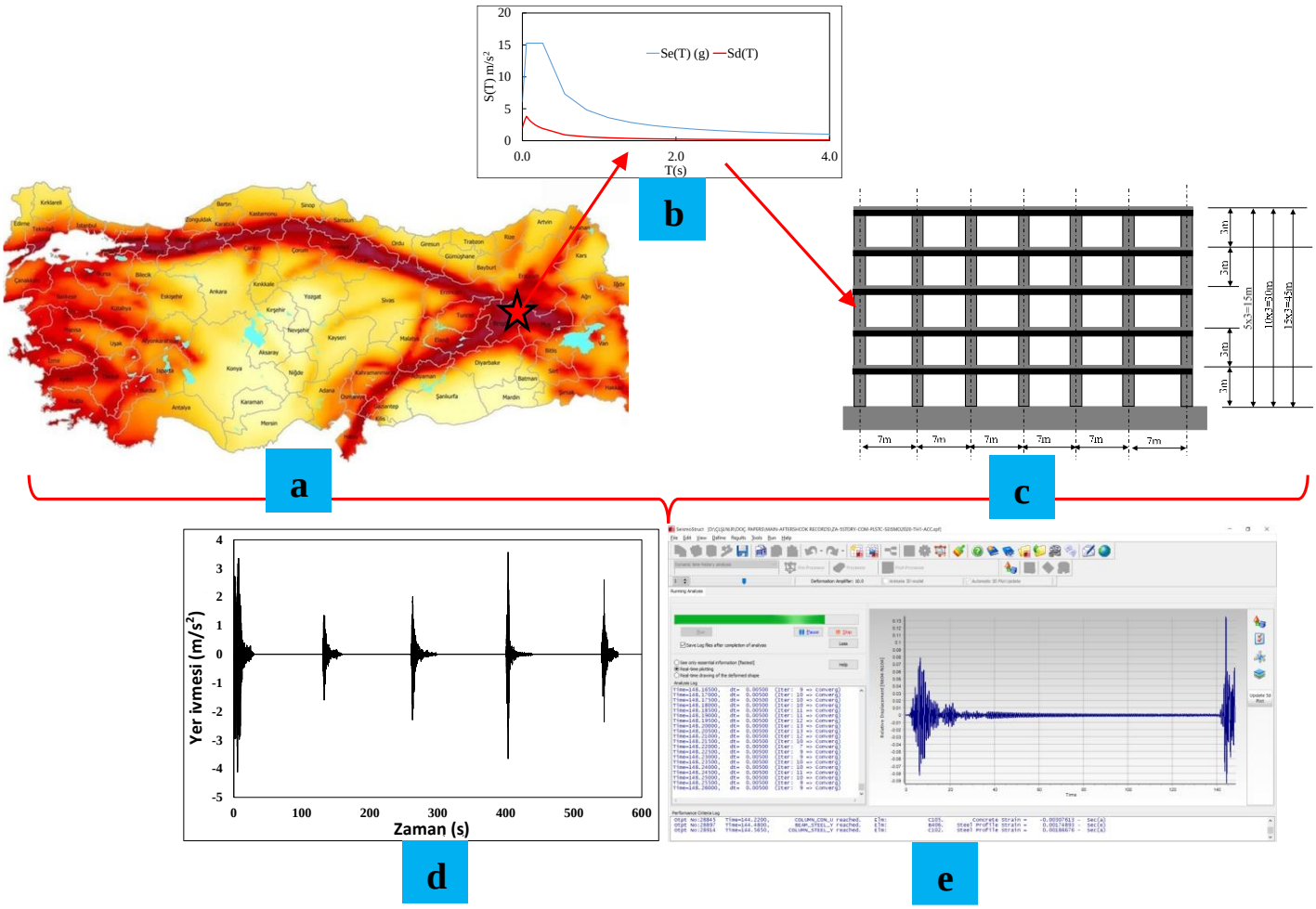
1. Giriş

Ana depremi takiben aynı fay düzleminde, ana deprem merkezine yakın olarak meydana gelen daha düşük şiddetteki depremlere artçı sarsıntılar denir. Ana depremden daha düşük şiddete sahip olmalarına rağmen, ana depremin hasar etkisine bağlı olarak taşıma gücü zayıflamış yapılarda çoğu zaman göçmeye neden olurlar (Coburn ve Spence, 2002). Artçı şokların yapılar üzerindeki yıpratıcı etkisi ve yapının davranışı hakkında yapılan çalışmalar depremlerin gündeme geldiği birçok ülkede önemli bir araştırma sorunsalıdır. Birçok fonksiyona bağlı olan bu araştırma konusu, tamamen açıklığa kavuşturulamamış kabul edilmektedir ve halen önemli bir inceleme konusudur. Depreme dayanıklı tasarım bağlamında ardışık depremlerin etkisi, yalnızca çerçeveli yapılar ve köprüler için değil; aynı zamanda anıtsal ve antik yapılar içinde hayati öneme sahiptir (Xie vd., 2012; Papaloizou vd., 2016). İtalya (Friuli, 1976; Umbria-Marche, 1997), Yunanistan (1986, 1988), Türkiye (1999) ve Meksika (1993, 1994, 1995) dahil olmak üzere dünyanın farklı noktalarında karşılaşılması muhtemel şiddette artçı şokların meydana geldiği sismik olay örneklerini içeren çalışmalar vardır (Li ve Ellingwood, 2007; Pirooz vd., 2021). Artçı şokların farklı taşıyıcı sistem ve tasarıma sahip yapılar üzerindeki etkisi betonarme (RC) çerçeveler (Jalayer vd., 2011; Raghunandan vd., 2012, Raghunandan vd., 2015; Hosseinpour ve Abdelnaby, 2017; Jalayer ve Ebrahimian, 2017), ahşap çerçeveler (Goda ve Salami, 2014), çelik çerçeveler (Ruiz-García vd., 2018) ve RC perde duvar çerçeveler (Jamnani vd., 2018) gibi alt fonksiyonlara bağlı olarak değerlendirilmiştir. Deprem sonrası yapıların hasar tespiti ve kullanılabilirlik karar durumu; bireysel ve bölgesel yapı hasar tahminine dayanır. Tüm bunların yansıra, bir ana ve artçı deprem dizisine maruz kalan binalarda meydana gelmesi muhtemel bölgesel hasarların tahminine ait kabul gören çözümler mevcut değildir.

Yapısal modelleme yetkinliğinin çok daha belirgin ilerlemeler kaydettiği günümüz teknolojilerinde, gerilmeler, yer değiştirmeler, sınır yükleri ve hasar mekanizmaları gibi kriterlere bağlı daha iyi tahminler veren analizler mümkündür (Hatzigeorgiou ve Liolios, 2010). Gelişen üretim teknolojileri ve yapı sistemi üretim teknikleri ile depremlerin dinamik etkileri karşısında yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip yapı tasarımları öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, çelik ve betonun üstün özellikleri bir araya getirilerek tasarlanan kompozit yapılar, tasarım aşamasında tasarımcıya etkin çözümler sunmaktadır. Beton yapılar masiftir ve bu nedenle daha fazla sismik ağırlık ve dolayısıyla daha az yanal yer değiştirme sergiler, çelik yapılar yapıya daha fazla yanal yer değiştirme ve süneklik katar, bu da beton/betonarme yapıların deprem ve rüzgâr gibi yan etkilere tepkisi ile kıyaslandığında daha üstündür. Beton ve çelikten oluşan kompozit yapı sistemleri ise hem çeliğin hem de betonun üstün özelliklerini kullanarak daha az maliyetle, daha hızlı imalat ve artan yangın direnci gibi önemli avantajlar sağlar. Bu nedenle, yapısal davranış, mukavemet ve yalıtım özellikleri göz önüne alındığında moment aktaran kompozit çerçeveler (MAKÇ) en ekonomik tasarım olarak kabul edilmektedir. Bu tür bir ekonomi, deprem yüklerinin etkisi altında hizmet ömrünü tamamlamakta olan binalarda önemlidir. Kompozit yapıların tasarımında çelik ve betonun birleşiminden kaynaklanan süneklik ve deprem yüklerine karşı enerji absorbe etme performansının yüksek olması, bu yapıların deprem riski fazla olan bölgelerde uygulanabilirliğini artırmaktadır. Moment aktaran çerçeve (MAÇ) olarak tasarlanan yapılarda, yanal deprem kuvvetlerine dayanım, esas olarak kiriş ve kolon elemanlarının eğilme dayanımları ve kapasitelerine bağlıdır. Bu tür yapıların tasarımı sırasında karşılaşılan en büyük zorluk kolon elemanlarının kompozit eleman olarak tasarlanmasıdır. Literatürde Eurocode (EN 1993-1-1, 2002; EN 1994-1-1, 2004; EN 1998-1-1, 2004; EN 1992-1-1, 2004) normları kullanılarak ZC sınıfı zeminlerde MAKÇ olarak tasarlanan çerçevelerin performansına yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Ayrıca çerçeveli düzenli-düzensiz yapılara ait davranışlar ve çelik çaprazlı sistemler de performansları açısından ZC sınıfı zeminlerde tasarım koşulları açısından incelenmiştir. Literatürde yer alan çalışmaların genelinde de ZC sınıfı zeminlerde, yüksek narinlik oranına (bir binanın yüksekliği ve genişliği arasındaki oran) sahip yapısal sistemler değerlendirilmiştir (Etli ve Güneyisi, 2020; Doğan ve Kalaylı, 2019; Etli ve Güneyisi, 2021; Etli ve Güneyisi, 2022). Ancak daha düşük narinlik oranına sahip yapıların zemine mesnetlenme durumunun ZC zemin sınıfından daha iyi zemin yapısına sahip zemin sınıflarında incelendiği çalışmalar sınırlıdır.

Bu çalışma kapsamında şiddetli deprem etkilerinin yer aldığı narinliği düşük yani daha masif yapıların değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında beton dolgulu çelik tüp (BDÇT) kolonlara ve kompozit kirişlere sahip 5 ila 20 katlı MAKÇ binalarının ana ve artçı depremler altındaki sismik davranışları incelenmiştir. Literatürde BDÇT ile tasarlanan yapılara ait analitik incelemeler araştırmacılar tarafından detaylı olarak sunulmuştur. Analitik ve deneysel modellerin karşılaştırmalı olarak incelenmesi araştırmacılar ve tasarımcılar açısından büyük bir önem arz etmektedir. BDÇT analitik modellemelerdeki yakınsama oranının doğrudan yapısal davranışı etkilemiş olduğu araştırmacılarca gösterilmiştir (Etli, 2021). Ayrıca BDTÇ elemanlarda beton çekirdek üretiminde geri dönüşüm malzemesi kullanılarak üretilen elemanların yapısal sistemdeki davranışları da incelenmiştir. Bu bağlamda literatürde yakın zamanda yapılan özellikle atık araç lastiği katkılı kendiliğinden yerleşen betonların mekanik özelliklerinin yansırsa üretilen elemanlarda boyut etkisinin çekirdek beton davranışına katkısının yer aldığı çalışmalar önem kazanmıştır (Akgül vd., 2020; Cemalgil ve Etli, 2020; Etli, 2021; Etli vd., 2018).

MAKÇ'ler, Kuzey Anadolu Fay (KAF) ile Doğu Anadolu Fay (DAF) hattının birleştiği Karlıova ilçe merkezinde inşa edileceği varsayılarak modellenmiştir (Şekil 1a). Yapıların tasarım ve analizinde SeismoStruct (SeismoSoft, 2018) yazılımı kullanılmıştır. Yapıların tasarım sınıflarına esas tasarım spektrumları belirlenirken ilgili lokasyondan alınan zemin ve deprem parametreleri ve sistemin yüksek süneklik sınıfı baz alınarak elde edilmiştir (Şekil 1b). Hesaplanan tasarım spektrumu ile ilgili yapıların taşıyıcı elemanlarının kesitleri Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) temel alınarak tamamlanmıştır (Şekil 1c). Literatürde yapıların esnek olmayan tepkilerinin elde edilmesinde yaygın olarak kullanılan zaman tanım alanında dinamik analizler tercih edilmiştir. Analizler ana deprem ve artçılarından oluşan seri depremler olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 1d). Ayrıca, MAKÇ yapılarının daha gerçekçi davranışlarını elde etmek için doğrusal olmayan malzeme ve modelleme teknikleri kullanılarak modelleme ve analizler tamamlanmıştır (Şekil 1e). Analiz esnasına ait SeismoStruct yazılımından elde edilen sonuçlar değerlendirilerek sonuçlar tartışılmıştır. MAKÇ yapıları için katlar arası ötelenme, taban kesme kuvvetleri ve eleman deformasyon durumları incelenmiştir. Ayrıca araştırma metodolojisinin detayı Şekil 1'de yer almaktadır.



Şekil 1. Çalışma metodolojisi **(a)**Türkiye deprem haritası; **(b)** Tasarım spektrumu örneği; **(c)**Tasarımı yapılan binaların yükseklik görünüşleri; **(d)** Ana ve Artçı Sarsıntı örneği; **(e)** SeismoStruct yazılımı analiz ara yüzü.

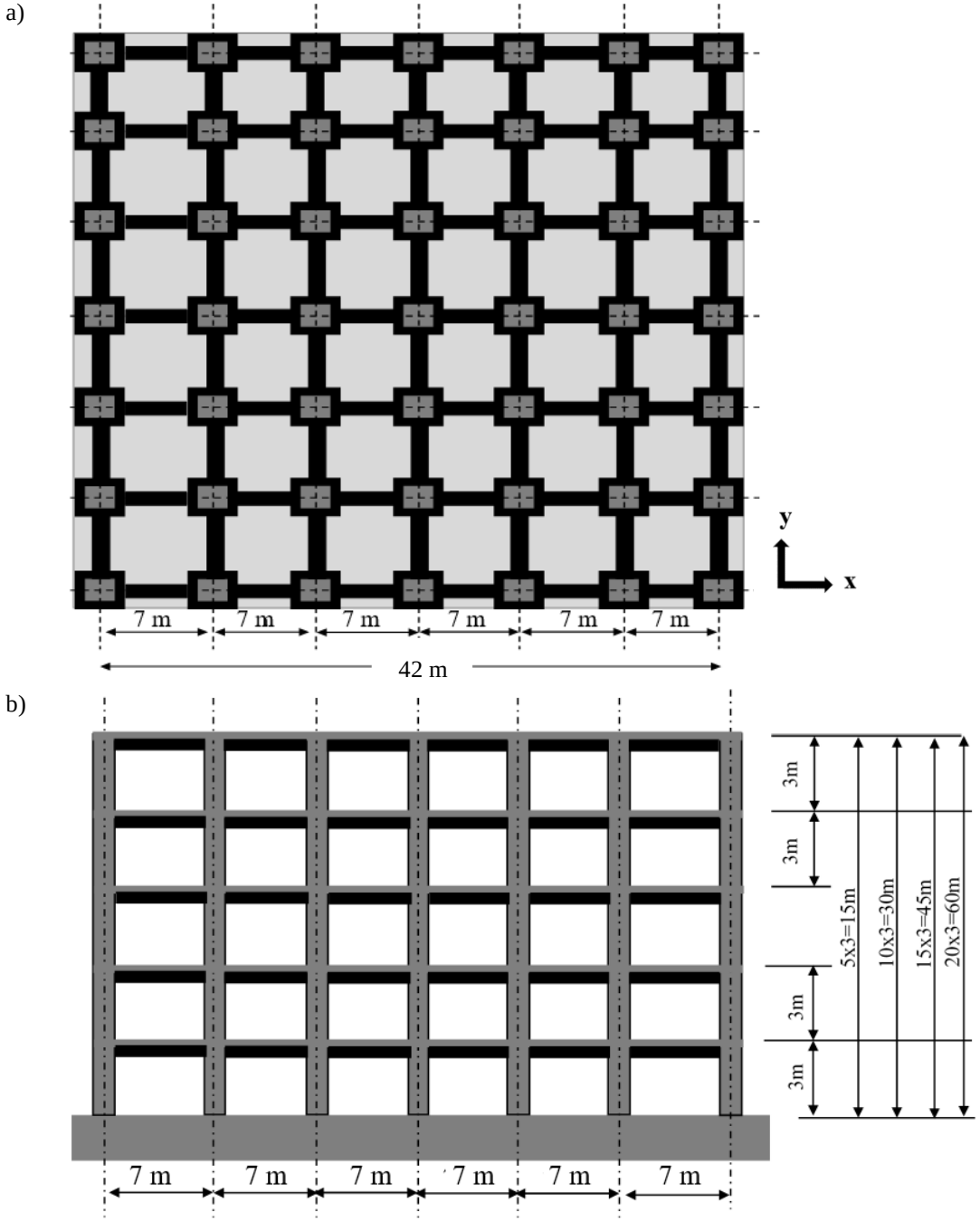
2. Materyal ve Metot

2.1. Yapısal Konfigürasyon ve Tasarım Prosedürleri

Çalışma kapsamında incelenen 5, 10, 15 ve 20 katlı kompozit çerçeveler, yüksek süneklikte ve TBDY 2018 temel alınarak sismik olarak tasarlanmıştır. Tüm çok katlı ve çok açıklıklı yapıların plan geometrileri aynı seçilmiştir. Tasarlanan yapıların plan ve cephe görünümleri Şekil 2'de verilmiştir. BDÇT kolonları planda x ve y doğrultusunda 7 m ara ile yerleştirilmiştir. Döşemelerdeki döşeme kalınlıkları, tasarım özelliklerine ve tasarım kodu gereksinimlerine göre boyutlandırılmıştır. BDÇT kompozit kolon elemanları için içi boş kare çelik profiller ve kompozit kirişler için I çelik profiller (IPE), MAKÇ'lerin tasarımında kullanılmak üzere Avrupalı çelik üreticilerinin kataloglarından seçilmiştir. Kompozit kirişlerin davranışının tasarım aşamasında elverişsiz koşullardan kaçınmak için, çelik kiriş ile betonarme döşeme arasında tam bir kesme etkileşimi olduğu varsayılarak tamamlanmıştır. Yapının tasarımında, döşeme ölü yükü döşeme ağırlığına ek olarak döşeme kaplamaları ve bölmeler için 2 kN/m^2 seçilirken hareketli yük 3 kN/m^2 olarak seçilmiştir. Yerçekimi yükleri altında yapılan analizler sonucunda, MAKÇ'ler, yeterli dayanıma sahip en kesit özellikleri ön tasarım olarak modellenmiştir. Daha sonra ön tasarımda elde edilen kesit özellikleri ile üretilen MAKÇ'ler TBDY 2018 koşullarında deprem yük etkileri açısından değerlendirilerek tasarımlara son şekli verilmiştir (Etli,2022). Kullanım amacı bakımından konut türü yapılar model olarak tasarlanmıştır. Yapı servis amacına uygun olarak gerekli tasarım parametreleri TBDY 2018'den alınmıştır. İlgili parametreler çalışma kapsamında detaylı olarak sunulmuştur. Ayrıca, MAKÇ'lerin modal analizi için tepki spektrumlarında Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2) ve interaktif deprem tehlike haritasından alınan konuma bağlı parametreler kullanılarak spektrumlar üretilmiştir. Zemin sınıfı olarak ZA sınıfı zemin kullanılmıştır. Ayrıca yapıların sünekliği de dikkate alınarak süneklik sınıfına uygun eleman kesitlerinin kullanılmasına özen gösterilmiştir. TBDY 2018'de kompozit kolonlu sistemlerde, çelik taşıyıcı sistemler için verilen Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı (R) ve Dayanım Fazlalığı Katsayısı (D) kullanılmıştır. "Süneklik düzeyi yüksek taşıyıcı sistem olarak modellenen çelik yapılarda deprem etkilerinin tamamının moment aktaran süneklik düzeyi yüksek çelik çerçevelerle karşılandığı durumlarda R ve D katsayısı sırasıyla 8 ve 3 olarak alınmaktadır" ibaresine dayanılarak binalar yüksek süneklilik düzeyine sahip MAKÇ tasarımlarında R ve D katsayısı sırasıyla 8 ve 3 olarak kabul edilmiştir.

2.2. Sayısal Modelleme

Bu çalışmada kullanılan kuvvetli yer hareketi veri tabanı sekiz gerçek sismik diziden oluşmaktadır. Bu sismik diziler Chalfant Valley (Temmuz 1986-2 olay), Coalinga (Temmuz 1983-2 olay), Imperial Valley (Ekim 1979-2 olay), Mammoth Lakes (Mayıs 1980-5 olay), Whittier Narrows (Ekim 1987–2 olay), Irpinia (Kasım 1980-2 olay) ve Chi-Chi (Eylül 1999-4 olay), depremleri olarak seçilmiştir. Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma (PEER (The Pacific Earthquake Engineering Research Center)) Merkezi'nin (PEER, 2014) kuvvetli yer hareket veri tabanından indirilen bu depremlerin tam listesi Tablo 1'de verilmiştir. PEER veri tabanındaki her ardışık yer hareketi kaydı, birbirini izleyen iki sismik olay arasında 100 s'ye eşit bir zaman aralığının uygulandığı tek bir yer hareketi kaydı (seri dizi) haline getirilerek kullanılmıştır (Şekil 3). Bu zaman aralığı sıfır ivme koordinatlarına sahiptir ve herhangi bir yapının sönümleme nedeniyle hareketini durdurmak için kesinlikle yeterli olduğu görülmüştür. SeismoStruct yazılımı, fiber elemanlarla modellenen kompozit kolon ve kiriş kesitleri ile tasarlanan MAKÇ'lerin doğrusal olmayan analizini yapmak için kullanılmıştır.



Şekil 2. Bina özellikleri **(a)** Kat planı; **(b)** Cephe görünüşü.

Tablo 1. Deprem kayıtlarının özellikleri.

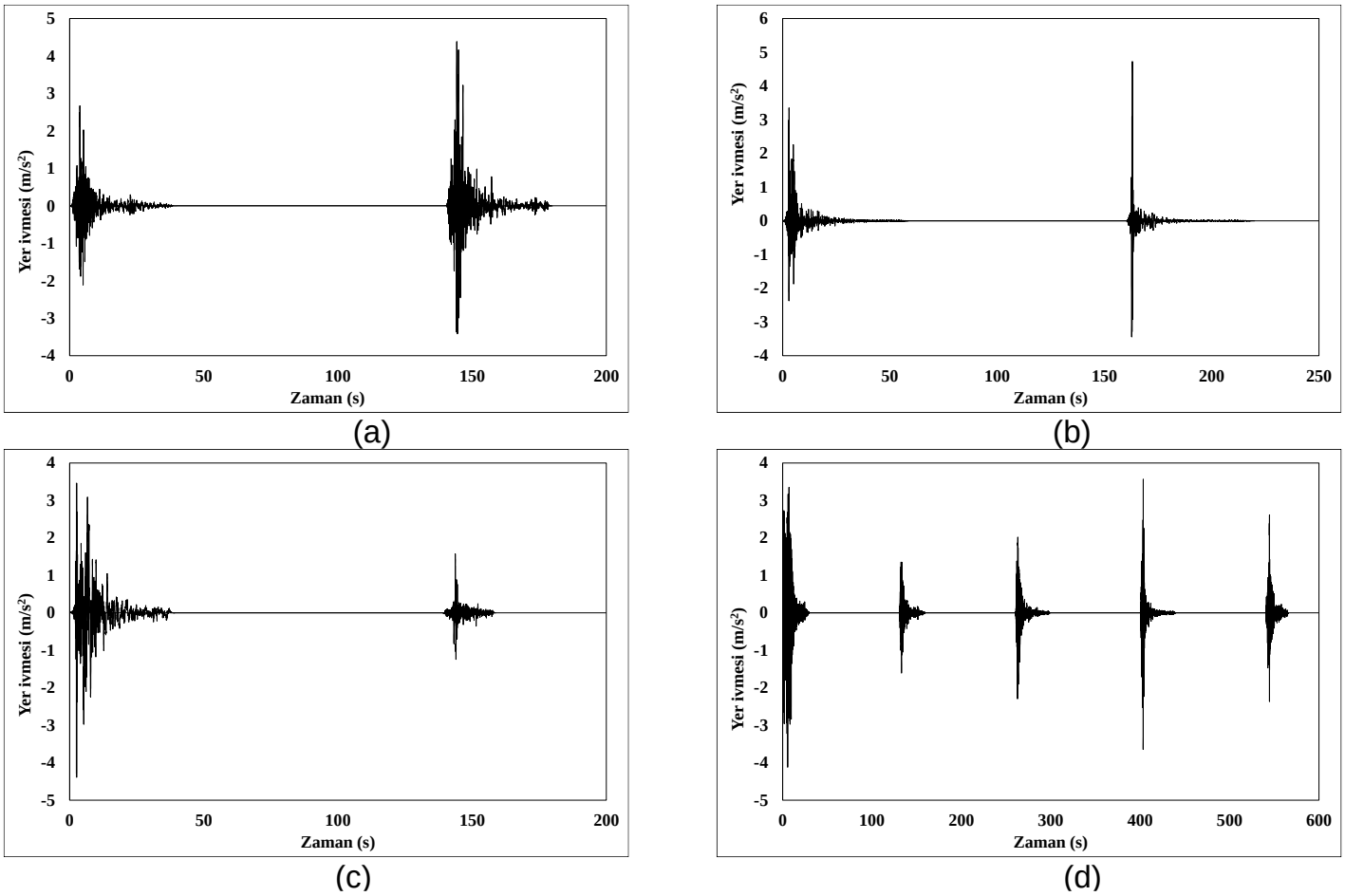
Kod	Kayıt Sırası	Olay	Yıl	Bileşen	İstasyon	PGA (g)	M	R_{jb} (km)	R_{rup} (km)
TH-1	547	Chalfant Valley-01	1986	270	Zack Brothers Ranch	0.272	5.77	6.07	6.39
	558	Chalfant Valley-02	1986			0.447	6.19	6.44	7.58
TH-2	547	Chalfant Valley-01	1986	360	Zack Brothers Ranch	0.236	5.77	6.07	6.39
	558	Chalfant Valley-02	1986			0.401	6.19	6.44	7.58
TH-3	406	Coalinga-05	1983	0	Coalinga-14th & Elm (Old CHP)	0.341	5.77	7.02	10.78
	418	Coalinga-07	1983			0.481	5.21	7.31	10.89
TH-4	406	Coalinga-05	1983	90	Coalinga-14th & Elm (Old CHP)	0.519	5.77	7.02	10.78
	418	Coalinga-07	1983			0.580	5.21	7.31	10.89
TH-5	181	Imperial Valley-06	1979	140	El Centro Array #6	0.447	6.53	0	1.35
	204	Imperial Valley-07	1979			0.160	5.01	7.4	10.37
TH-6	181	Imperial Valley-06	1979	230	El Centro Array #6	0.449	6.53	0	1.35
	204	Imperial Valley-07	1979			0.274	5.01	7.4	10.37
TH-7	230	Mammoth Lakes-01	1980	90	Convict Creek	0.419	6.06	1.1	6.63
	233	Mammoth Lakes-02	1980			0.163	5.69	2.91	9.46
	236	Mammoth Lakes-03	1980			0.233	5.91	2.67	12.43
	240	Mammoth Lakes-04	1980			0.371	5.7	1.37	5.32
	248	Mammoth Lakes-06	1980			0.266	5.94	6.44	12.39
TH-8	230	Mammoth Lakes-01	1980	90	Convict Creek	0.442	6.06	1.1	6.63
	233	Mammoth Lakes-02	1980			0.183	5.69	2.91	9.46
	236	Mammoth Lakes-03	1980			0.175	5.91	2.67	12.43
	240	Mammoth Lakes-04	1980			0.485	5.7	1.37	5.32
	248	Mammoth Lakes-06	1980			0.314	5.94	6.44	12.39
TH-9	691	Whittier Narrows-01	1987	270	San Marino-SW Academy	0.147	5.99	1.57	15.94
	716	Whittier Narrows-02	1987			0.138	5.27	4.42	12
TH-10	691	Whittier Narrows-01	1987	360	San Marino-SW Academy	0.194	5.99	1.57	15.94
	716	Whittier Narrows-02	1987			0.206	5.27	4.42	12
TH-11	291	Irpinia, Italy-01	1980	0	Rionero In Vulture	0.096	6.9	27.49	30.07
	302	Irpinia, Italy-02	1980			0.099	6.2	22.68	22.69
TH-12	291	Irpinia, Italy-01	1980	270	Rionero In Vulture	0.099	6.9	27.49	30.07
	302	Irpinia, Italy-02	1980			0.096	6.2	22.68	22.69
TH-13	1512	Chi-Chi, Taiwan	1999	E	TCU078	0.447	7.62	0	8.2
	2390	Chi-Chi, Taiwan-02	1999			0.052	5.9	13.94	15.36
	2628	Chi-Chi, Taiwan-03	1999			0.448	6.2	0	7.62
	3473	Chi-Chi, Taiwan-06	1999			0.266	6.3	5.72	11.52
TH-14	1512	Chi-Chi, Taiwan	1999	N	TCU078	0.310	7.62	0	8.2
	2390	Chi-Chi, Taiwan-02	1999			0.042	5.9	13.94	15.36
	2628	Chi-Chi, Taiwan-03	1999			0.271	6.2	0	7.62
	3473	Chi-Chi, Taiwan-06	1999			0.387	6.3	5.72	11.52

TH-: *Deprem kaydı*
PGA: *Maksimum yer ivmelenmesi*
M: *Moment magnitüd değeri*
Rjb (km): *Joyner-Boore mesafe birimi*
Rrup (km): *Kırılma düzleminde en yakın noktaya olan eğik mesafe*

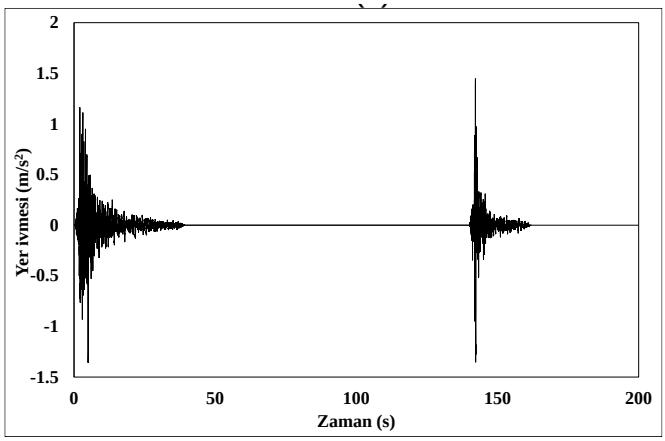
Çalışmanın analiz sürecinde, kompozit kiriş elemanlarda çelik ve betonarme döşeme arasındaki kesme bağlantıları, benzer çalışmalarda olduğu gibi, tam etkileşimli olarak modellenme varsayımına dayanır (Elghazouli vd., 2008). Ayrıca, çelik kirişin ağırlık merkezi ile beton döşemenin ağırlık merkezi arasındaki fark dikkate alınarak kompozit kiriş çerçeve modeli kullanılmıştır.

Kompozit kirişlerin modellenmesine dayalı literatür çalışmalarında kullanılan efektif döşeme genişliği teorik modelleme ve deneysel çalışma verilerinin karşılaştırılması esasına dayanır (Andre Plumier, 2001; Castro vd., 2007). Bu çalışmalara göre; etkin döşeme

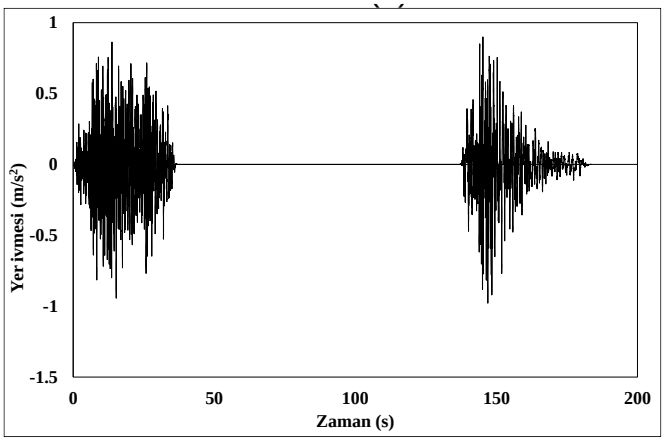
genişliğine bağlı elde edilen teorik modellerin kabul edilebilir doğruluk düzeyinde olduğu ve davranışı yeterince yansıttığı vurgulanmıştır (Andre Plumier, 2001; Castro vd., 2007). Eleman modellerinde kullanılan malzemelerin çelik elastisite modülü (*Es*), poisson oranı (υ) ve sertleşme katsayısı (μ) değerleri sırasıyla 210×10^3 N/mm^2, 0.3 ve 0.005 olarak alınmıştır. Tasarımda kullanılan malzeme sınıfları ekonomik ve kapsamlı çalışmalarda fazlaca tercih imkanı bulmasına bağlı olarak; çelik elemanlar için S235 (St 37), beton ise C30 olarak seçilmiştir. (Etli, 2021; Etli ve Güneyisi, 2020; Etli ve Güneyisi, 2021; Etli ve Güneyisi , 2022; Hauke, 2008). Ayrıca 5, 10, 15 ve 20 katlı binalarda kullanılan kolon kesitleri [(*bxt*), (kesit ebatı x et kalınlıkları)] sırasıyla 450x12 mm, 500x32 mm, 600x40 mm ve 700x50 mm olarak detaylandırılmıştır. Tüm bina ve katlarda ise kompozit kirişlerde IPE360 kesiti ile 150 mm döşeme kalınlığı hesaplanmıştır. Ayrıca modelleme ile deneysel çalışmalar arasındaki yakınsama daha önce değerlendirilmiştir (Etli, 2021). Teorik ile deneysel modeller arasında genele bakıldığında en yüksek oranda yakınsamaya sahip çift doğrusal (bilinear) çelik malzeme modeli kullanılmıştır (Etli, 2021). Kullanılan deprem kayıtlarının bileşenleri birleştirilmiştir. Her depremin ana ve artçı olmak üzere serileri birleştirilmiştir. Toplamda 7x2=14 adet ana ve artçı depremden oluşan seri kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan ana ve artçı kayıtlarına ilişkin örnekler Şekil 3'te gösterilmiştir.



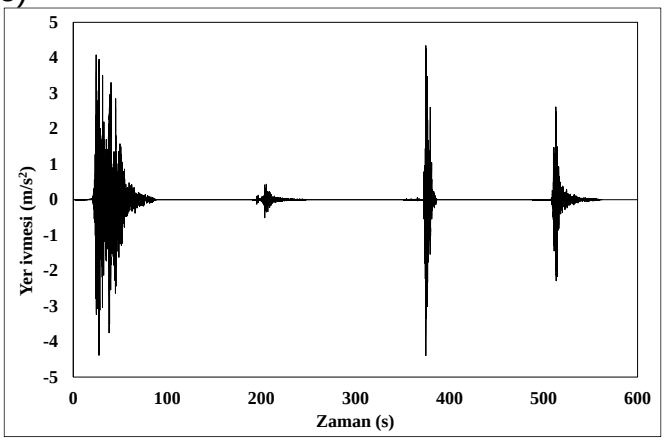
Şekil 3. Örnek ana ve artçı deprem kayıtları senkronizasyonu **(a)** Chalfant Valley; **(b)** Coalinga; (**c)** Imperial Valley; **(d)** Mammoth Lakes; **(e)** Whittier Narrows; **(f)** Irpinia, Italy; **(g)** Chi-Chi, Taiwan.



(e)



(f)

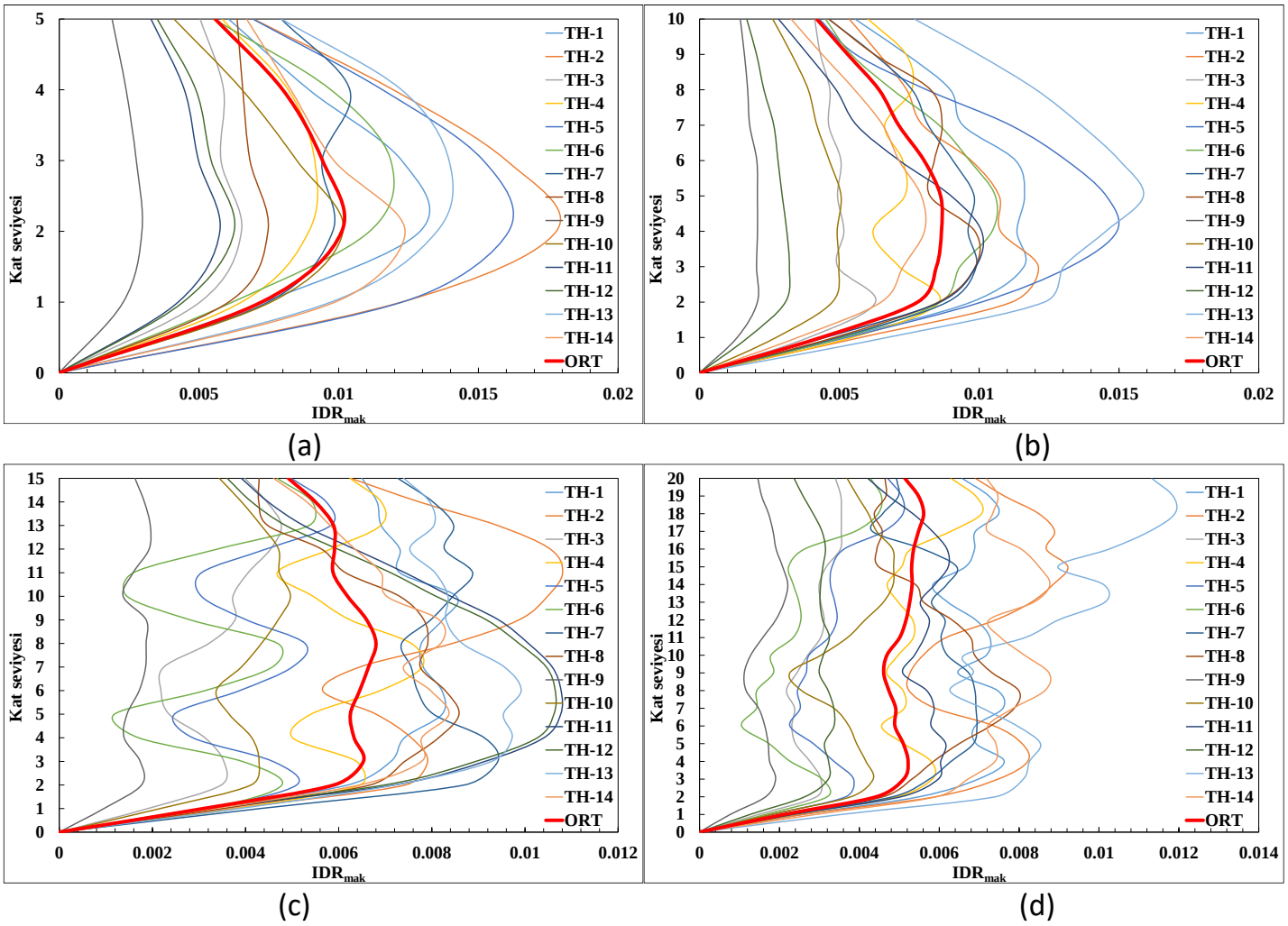


(g)

Şekil 3. (Devamı) Örnek ana ve artçı deprem kayıtları senkronizasyonu **(a)** Chalfant Valley; **(b)** Coalinga; (**c)** Imperial Valley; **(d)** Mammoth Lakes; **(e)** Whittier Narrows; **(f)** Irpinia, Italy; **(g)** Chi-Chi, Taiwan.

3. Bulgular ve Tartışma

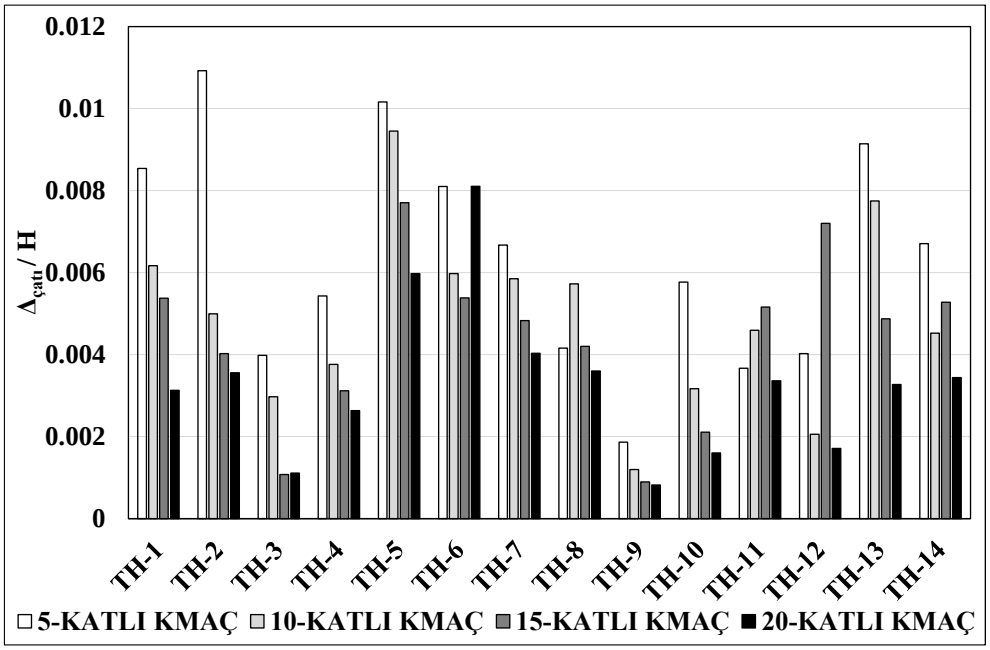
Yapıların performans analizlerinde önemli bir parametre olan katlar arası göreli ötelenme değerine (IDR) ait veriler çalışma kapsamında incelenmiştir. Ana ve artçı depremler sonrasında yapıda katlar arasında oluşan maksimum *IDR* değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Şekil 4'te gösterilmiştir. Yatay eksen kat deplasmanını ve düşey eksen ise kat seviyesi gösterecek şekilde verilmiştir. Depremlere ilişkin isimlerde kısaltma olarak "*TH-X*" sembolü kullanılmıştır. *TH* sembolü deprem kaydını nitelendirmiş ve sonrasında kullanılan "*X*" ise kayıt numarasını sembolize etmektedir. İlgili detaylar Tablo 1'de verilmiştir. Deprem kayıtlarının bileşenleri ayrı ayrı birleştirilmiştir. Seçilen çerçevelerden elde edilen ana ve artçı depremler x-x doğrultusunda *TH-1*'den *TH-14*'e kadar uygulanarak sonuçlar detaylandırılmıştır.



Şekil 4. Binaların *TH* sonuçları için *IDR* maksimum değerleri. **(a)** 5; **(b)** 10; **(c)** 15; **(d)** 20 katlı MAKÇ.

3.1. Çatı Katı Ötelenme Oranları

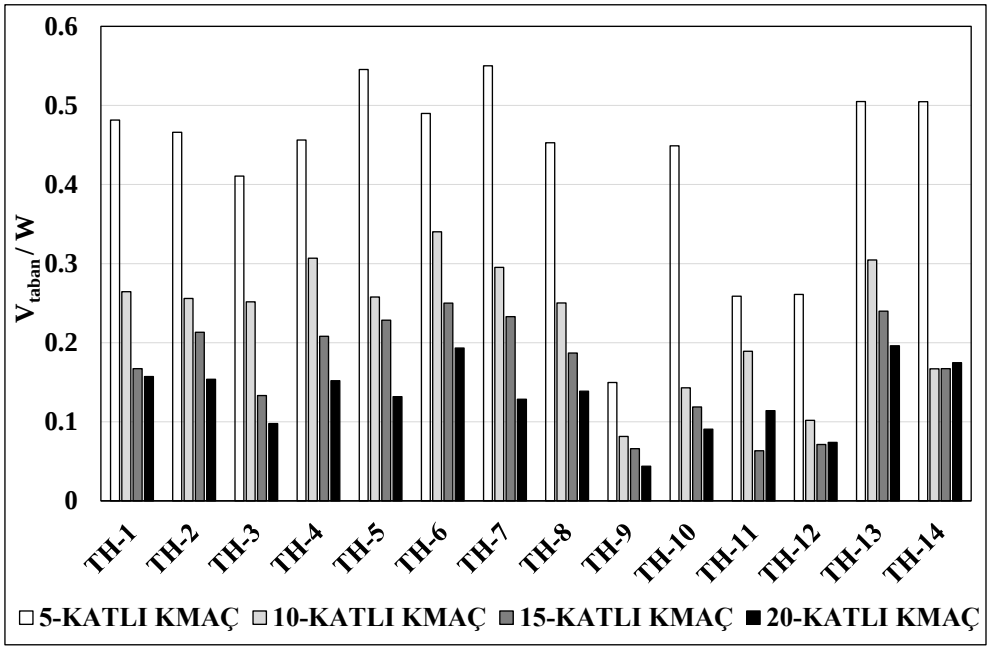
Çalışma kapsamında elde edilen çatı katı yatay deplasman değerlerinin toplam yapı yüksekliğine oranı ($\Delta_{çatı}/H$) grafiklerde her ana deprem ve artçı deprem senkronizasyonu için *TH-1*'den *TH-14*'e kadar değerlendirilmiş ve Şekil 5'te sunulmuştur. Ortalama $\Delta_{çatı}/H$ değeri 16 deprem durumu için sayısal ortalama olarak, kat bazında elde edilmiş ve Şekil 4'te sunulan grafikte "*ORT*" olarak verilmiştir. Literatürde yer alan benzer çalışmalarda olduğu üzere; yapısal performansların elde edilmesi esnasında enerji sönümleme kapasitesini temel alan parametre olarak kabul edilen $\Delta_{çatı}/H$ oranı bu çalışma kapsamında da değerlendirilmiştir (Etli ve Güneyisi, 2020, 2021, 2022). Elde edilen veriler incelendiğinde 5-MAKÇ için $\Delta_{çatı}/H$ sonuçları 0.00186 ile 0.0109 arasında değişmekte iken ortalama $\Delta_{çatı}/H$ değeri 0.00637 olarak elde edilmiştir. $\Delta_{çatı}/H$ değerlerinin değişim aralığı 10- MAKÇ için 5- MAKÇ'a göre alt ve üst limitlerde sırasıyla %36 ve %13 azalma ile elde edilmiştir. Diğer taraftan bu yapıda ortalama $\Delta_{çatı}/H$ değeri yine 5- MAKÇ'a göre %23.5 oranında azalmaktadır. 15- MAKÇ ve 20- MAKÇ'da ise $\Delta_{çatı}/H$ değeri 5- MAKÇ'a göre ortalama alt ve üst $\Delta_{çatı}/H$ limit değerleri için sırasıyla %54 ve %28 azalmaktadır. Diğer taraftan, 15- MAKÇ ve 20- MAKÇ için ortalama $\Delta_{çatı}/H$ değeri sıralıyla %31 ve %48 azalmıştır (Şekil 5). Literatürde yer alan diğer çalışmalarda (Etli ve Güneyisi, 2020; Etli ve Güneyisi, 2021; Etli ve Güneyisi, 2022) elde edilen performans eğrilerine bakıldığında $\Delta_{çatı}/H$ değeri ortalama 0.01 değerine ulaştığında taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Yapısal sistemlerin tasarımında özellikle eşdeğer deprem yükü yöntemi gibi yöntemlerde doğal titreşim periyotları önemli bir yere sahiptir. Elde edilen tasarım spektrumlarından alınan ivme değerleri hesaplanan doğal titreşim periyodu kullanılarak elde edilmektedir. Elastik hesaplarda yapısal sistemde yer alan elemanların elastik düzeyde yaptığı kabul edilen davranış, bu tür yaklaşıma uygun olabilir. Diğer taraftan, şiddetli depremler esnasında ya da sonrasında elemanlarda meydana gelen plastik deformasyonlar bu davranıştan dolayısıyla elastik tasarım yönteminden uzaklaşmaya neden olabilmektedir. Bu durum özellikle şiddetli depremlerde etkin olarak ortaya çıkabilir çünkü sistemde yoğun plastik deformasyonlar oluşma ihtimali çok yüksektir. Bu değerlendirmeden yola çıkarak bakıldığında Şekil 5'te TH-6 için 20 katlı binanın, TH-8 için 10 katlı binanın, TH-11 için 10 ve 15 katlı binaların, TH-12 için 15 katlı binanın çatı katı ötelenme oranlarının maksimum değeri 5 katlı binadan daha yüksek olarak hesaplandığı görülmektedir. 5-kattan yüksek binaların diğerlerine göre daha düşük doğal titreşim periyoduna sahip olduğu bilinmektedir. Sonuç olarak SeismoStruct yazılımında kullanılan plastik deformasyonların dikkate alındığı bu analizlerde benzer sonuçların öne çıktığı görülmektedir. Bu durum plastikleşen eleman davranışlarının özellikle şiddetli depremlerde egemen davranış olabileceği ve sistem davranışına hakimiyetini desteklemektedir.



Şekil 5. Binaların *TH* sonuçları için çatı katı ötelenme oranları maksimum değerleri

3.2. Taban Kesme Kuvveti

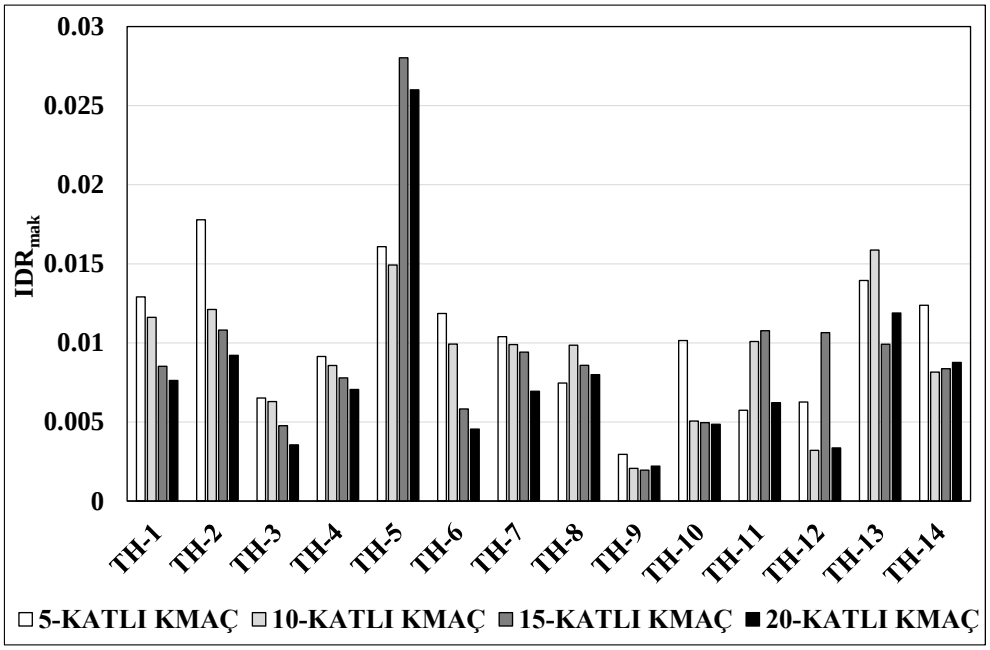
Literatürde yer alan çalışmalarda yapısal performansların elde edilmesi esnasında enerji sönümleme kapasitesini temel alan diğer bir parametre olan taban kesme kuvveti değerlerinin yapı ağırlığına oranları (V_{taban}/W) bu çalışma kapsamında da değerlendirilmiştir (Etli ve Güneyisi, 2020; Etli ve Güneyisi, 2021; Etli ve Güneyisi, 2022). Çalışma kapsamında elde edilen ana ve artçı depremler etkisi altında MAKÇ'lerin V_{taban}/W incelenmiştir. V_{taban}/W değerlerinin grafiklerde her ana deprem ve artçı deprem senkronizasyonu için *TH-1*'den *TH-14*'e kadar Şekil 6'da sunulmuştur. Ana deprem ve artçı deprem senkronizasyonu sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde; 5-MAKÇ için V_{taban}/W sonuçlarının değişim aralığı 0.15 ile 0.55'tir. Ayrıca V_{taban}/W için ortalama değer 0.43 olarak elde edilmiştir. 10-MAKÇ de ise V_{taban}/W değerlerinin değişim aralık değerleri 5-MAKÇ'a göre alt ve üst limitler için sırasıyla %45 ve %38 oranında azalmaktadır. Diğer taraftan ortalama V_{taban}/W değeri 5-MAKÇ'a göre %46 azalma ile kaydedilmiştir. 15-MAKÇ için V_{taban}/W değeri 5-MAKÇ yapıya göre ortalama alt ve üst V_{taban}/W limit değerleri için sırasıyla %58 ve %55 azalmaktadır. Diğer taraftan, 20-MAKÇ'da V_{taban}/W değeri alt ve üst limit değerleri sıralıyla %71 ve %64 azalmıştır (Şekil-6). 10-MAKÇ, 15-MAKÇ ve 20-MAKÇ için ortalama V_{taban}/W değerleri 5-MAKÇ'a göre sırasıyla %46, %61 ve %69 azalma ile kaydedilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Binaların *TH* sonuçları için taban kesme katsayıları maksimum değerleri.

3.3. Katlar Arası Göreli Ötelenme Oranları (IDR)

Ana ve artçı depremler etkisi altında MAKÇ'lerin katlar arası göreli ötelenme oranları (IDR (interstory drift ratio)) çalışma kapsamında incelenmiştir. *IDR* değerlerinin katlar arasındaki değişim kat seviyeleri üzerinde grafiklerde her ana deprem ve artçı deprem senkronizasyonu için *TH-1*'den *TH-14*'e kadar Şekil 7'de sunulmuştur. *IDR* değeri, literatürde yer alan çalışmalarda yapısal performans seviyelerinin belirlenmesi için (Etli ve Güneyisi, 2020; Etli ve Güneyisi, 2021; Etli ve Güneyisi, 2022) kullanılırken ulusal ve uluslararası standartlarda (EN 1993-1-1, 2002; EN 1994-1-1, 2004; EN 1998-1-1, 2004; EN1992-1-1, 2004; TBDY, 2018) yapısal hasar seviyesinin de belirlemesi amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 7. Binaların *TH* sonuçları için IDR_{mak} değerleri.

Yapıların servis ömürlerine devamlılığı açısından sınırları genellikle bir binanın karşılık gelen yük seviyelerinde performansının bir ölçüsü olarak tanımlanmıştır (FEMA-750, 2009). Uluslararası standartlarda genel bir kabul ile dört bina performansı seviyesi vardır. Bunlar; kesintisiz kullanım; sınırlı hasar; can güvenliği seviyesi ve göçme öncesi seviyesidir (ASCE-41-17, 2017; ATC-58-2, 2017; FEMA-750, 2009). Çok düşük şiddetli depremler sonrası bir çok yapı kesintisiz kullanım performans limitlerini karşılayabilirken bu limitlerin aşıldığı durumlarda söz konusu olabilir (El-Metwally ve Sheta, 2017).

5-MAKÇ için ana deprem ve artçı deprem senkronizasyonu sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde IDR_{mak} sonuçlarının değişim aralığı 0.003 ile 0.018 arasında değişmiştir. 5-MAKÇ için IDR_{mak} için ortalama değer 0.010 olarak elde edilmektedir. 10-MAKÇ için IDR_{mak} değerlerinin değişimi 5-MAKÇ'a göre alt ve üst limitler için incelendiğinde sırasıyla %30 ve %11 oranında azalmaktadır. 15-MAKÇ için IDR_{mak} değeri 5-MAKÇ'a göre alt limit değerinde %33 oranında azalma ile; üst limit değerlerinde %58 oranında bir artış ile kaydedilmiştir. Çalışma verileri ışığında 20-MAKÇ için IDR_{mak} alt limit değerinde 5-MAKÇ'a göre %25 azalma ve üst limit değerinde %46 artış söz konusudur. 10-MAKÇ, 15-MAKÇ ve 20-MAKÇ için ortalama IDR_{mak} değerleri 5-MAKÇ'a göre sırasıyla %11, %9 ve %23 oranında azalma ile edilmiştir (Şekil 7). Diğer taraftan, incelenen yapısal sistemlerde özellikle çok katlı yapılarda alt katlarda meydana gelen plastik deformasyonların ara katlarda oluşan göreli kat ötelenmelerini arttırabileceği öngörülmektedir. Bu açıdan bakıldığında Şekil 7'de TH-5 için 15 ve 20 katlı binalarda diğerlerinden farklı olarak göreli kat ötelenmesi daha yüksek gerçekleşmesinde ana etken olabilir. Dahası, önceki çalışmalar değerlendirildiğinde literatürde yüksek mod katkılarının yüksek yapılarda bu tür etkilerinin olabileceği de gösterilmektedir (Vamvatsikos ve Cornell, 2005; Castro vd., 2008; Ferraioli vd., 2014)

4. Sonuçlar

Bu çalışmanın analiz sonuçlarına göre aşağıdaki veriler elde edilmiştir;

- MAKÇ ile tasarlanan binalar için ortalama $\Delta_{çatı}/H$ sonuçlarına göre yapıların hemen hepsi göçme durumuna ulaşmadan yeterli miktarda enerji sönümleyebilmiştir.
- Ana ve artçı depremlerden elde edilen 5, 10, 15 ve 20 katlı MAKÇ'ler için V_{taban}/W faktörlerinin değerleri artan yapı kat adedi ile azalmaktadır. Bu, özellikle çok katlı çerçeve yapılarının daha yüksek mod etkisine duyarlılığından kaynaklanmaktadır.
- *IDR* ortalama değeri tüm yapılar için genelde %1 değerinden küçük olmakla birlikte, sonuç olarak hemen kullanım performans seviyesini sağlamaktadırlar. Nadir olmakla birlikte sadece *TH-5* için yapı kapasitesini zorlamıştır.
- MAKÇ sistemlerin çalışma kapsamında incelenen tarihi olarak şiddetli ana ve artçı depremlerden oluşan serilerde dahi neredeyse sınırlı hasar durumu ile depremleri atlatabileceği öngörülmüştür.

- Özellikle çerçeve sistemlerde normal kat yüksekliğin iki katından daha uzun kiriş düzenlemelerinde eleman kesitlerindeki oluşacak plastik deformasyonlar baskın hale gelebilmektedir.
- Elastik tasarım sonrası yapılacak olan performans analizleri (statik itme gibi) olası limit durumların belirlenmesinde faydalı olacaktır.
- Yüksek katlı yapılarda tasarımcının kesit hesaplarında bir miktar daha esnek davranması tekrarlı yükler altındaki davranışa pozitif etkide bulunabilir.

Kısaltmalar

BDÇT:	Beton dolgulu çelik tüp
bxt:	Kolon kesiti
D:	Dayanım Fazlalığı Katsayısı
DAF:	Doğu Anadolu Fay
DD-2:	Düzeyi-2
Es:	Çelik elastisite modülü
IDR:	Katlar arası göreli ötelenme değeri
$IDR_{mak:}$	Katlar arası maksimum göreli ötelenme değeri
IPE:	I çelik profil
KAF:	Kuzey Anadolu Fay
M:	Moment magnitüd değeri
MAÇ:	Moment aktaran çerçeve
MAKÇ:	Moment aktaran kompozit çerçeve
PGA:	Maksimum yer ivmelenmesi
R:	Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı
RC:	Betonarme
R_{jb} :	Joyner-Boore mesafe (km)
R_{rup} :	Kırılma düzleminde en yakın noktaya olan eğik mesafe (km)
TBDY 2018:	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TH:	Deprem kaydı
υ :	Poisson oranı
V_{taban}/W :	Taban kesme kuvveti değerlerinin yapı ağırlığına oranı
$\Delta_{çatı}/H$:	Çatı katı yatay deplasman değerlerinin toplam yapı yüksekliğine oranı
μ:	Sertleşme katsayısı

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazar bu çalışmasında herhangi bir şekilde çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

ARAŞTIRMA VE YAYIN ETİĞİ BEYANI

Yazar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder.

KAYNAKLAR

Akgül, M., Doğan, O., Etli, S. (2020). Investigation of Mechanical Properties of Granulated Waste Rubber Aggregates Substituted Self-Compacting Concrete Mortar Produced with Different Cement. Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi, 12(2), 787-798. https://doi.org/10.29137/umagd.734614

ASCE-41-17. (2017). Seismic rehabilitation of existing buildings. ASCE Standard, 41–6. https://doi.org/10.1201/9781439804810-c7

ATC-58-2. (2017). ATC-58-2: Probabilistic Performance-based Seismic Assessment and Design Guidelines. SEAOC Convention Proceedings, 1–10.

Castro, J. M., Elghazouli, A. Y., Izzuddin, B. A. (2007). Assessment of effective slab widths in composite beams. Journal of Constructional Steel Research, 63(10), 1317–1327. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.11.018

Castro, J.M., Elghazouli, A.Y., Izzuddin, B.A., (2008). Performance assessment of composite moment-resisting frames. 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China.

Cemalgil, S., Etli, S. (2020). Effects of Specimen Size on The Compressive Strength of Rubber Modified Self-Compacting Concrete. International Journal of Pure and Applied Sciences, 6(2), 118-129. https://doi.org/10.29132/ijpas.789480

Coburn, A., Spence, R., (2002). Earthquake Protection, John Wiley&Sons, England.

Doğan, O., Kalaylı, M.A. (2019). Binalarda Yükseklik/Genişlik Oranı Ve Zemin Yatak Katsayısına Bağlı Devrilme Analizi. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5 (3), 300-314.

Elghazouli, A. Y. Y., Castro, J. M. M., Izzuddin, B. A. A. (2008). Seismic performance of composite moment-resisting frames. Engineering Structures, 30(7), 1802-1819. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.12.004

El-Metwally, S. E., Sheta, A. M. (2017). Performance Based Design of Steel Frames via Practical Advanced Analysis. 2017 International Annual Conference of the American Society for Engineering Management.

EN 1993-1-1. (2002). Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, 3(BS EN 1993-1-1:2005). https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

EN 1994-1-1. (2004). Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, 3(February), 33–38. https://doi.org/10.1002/14651858.CD009305.pub2

EN 1998-1-1. (2004). Eurocode 8 :Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee for Normalization, Brussels, 2005. https://doi.org/[Authority: The European Union per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]

EN 1992-1-1. (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1–1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, 1(Brussels, Belgium), 225. https://doi.org/978 0 580 73752 7

Etli, S. (2021). Analytical Evaluation of Behavior of Composite Columns Under Axial Load. International Journal of Pure and Applied Sciences, 7(3), 526-536. https://doi.org/10.29132/ijpas.991166

Etli, S., Güneyisi, E. M. (2020). Seismic performance evaluation of regular and irregular composite moment resisting frames. Latin American Journal of Solids and Structures, 17(7), 1-22. https://doi.org/10.1590/1679-78255969

Etli, S., Güneyisi, E. M. (2021). Assessment of Seismic Behavior Factor of Code-Designed Steel–Concrete Composite Buildings. Arabian Journal for Science and Engineering, 46(5), 4271-4292. https://doi.org/10.1007/s13369-020-04913-9

Etli, S., Güneyisi, E. M. (2022). Effect of nonlinear modeling approaches used for composite elements on seismic behavior of composite framed buildings. Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences, 47(2). https://doi.org/10.1007/s12046-022-01871-w

Etli, S., (2022). Parametrıc Analysıs Of The Performance Of Steel-Concrete Composıte Structures Desıgned Wıth TBDY 2018. International Journal of Innovative Engineering Applications, 6(1), https://doi.org/10.46460/ijiea.1029942

Etli, S., Cemalgil, S., Onat, O. (2018). Mid-Temperature Thermal Effects on Properties of Mortar Produced with Waste Rubber as Fine Aggregate. International Journal of Pure and Applied Sciences, 4(1), 10-22. https://doi.org/10.29132/ijpas.341413

FEMA-750. (2009). Nehrp Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. NEHRP Seismic Design Technical Brief, 2, 37. http://www.nehrp.nist.gov/pdf/nistgcr9-917-3.pdf

Ferraioli, M., Lavino, A., Mandara, A., (2014). Behaviour factor of code-designed steel moment-resisting frames. International Journal of Steel Structures 14,243-254.

Goda, K., Salami, M. R. (2014). Inelastic seismic demand estimation of wood-frame houses subjected to mainshock-aftershock sequences. Bulletin of Earthquake Engineering, 12(2), 855–874. https://doi.org/10.1007/s10518-013-9534-4

Hatzigeorgiou, G. D., Liolios, A. A. (2010). Nonlinear behaviour of RC frames under repeated strong ground motions. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30(10), 1010–1025. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.04.013

Hauke, B. (2008). Economic Application of Composite Beams With Moderate High Strength Materials. In 5th European Conference on Steel and Composite Structures, September, 3-5, September 2008, Graz, Austria

Hosseinpour, F., Abdelnaby, A. E. (2017). Effect of different aspects of multiple earthquakes on the nonlinear behavior of RC structures. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 92, 706-725. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.11.006

Jalayer, F., Ebrahimian, H. (2017). Seismic risk assessment considering cumulative damage due to aftershocks. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 46(3), 369-389. https://doi.org/10.1002/eqe.2792

Jalayer, F., Asprone, D., Prota, A., Manfredi, G. (2011). A decision support system for post-earthquake reliability assessment of structures subjected to aftershocks: An application to L'Aquila earthquake, 2009. Bulletin of Earthquake Engineering, 9(4), 997-1014. https://doi.org/10.1007/s10518-010-9230-6

Jamnani, H. H., Amiri, J. V., Rajabnejad, H. (2018). Energy distribution in RC shear wall-frame structures subject to repeated earthquakes. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 107, 116-128. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.01.010

Li, Q., Ellingwood, B. R. (2007). Performance evaluation and damage assessment of steel frame buildings under main shock-aftershock earthquake sequences. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 36(3), 405-427. https://doi.org/10.1002/eqe.667

Papaloizou, L., Polycarpou, P., Komodromos, P., Hatzigeorgiou, G. D., Beskos, D. E. (2016). Two-dimensional numerical investigation of the effects of multiple sequential earthquake excitations on ancient multidrum columns. Earthquake and Structures, 10(3), 495-521. https://doi.org/10.12989/eas.2016.10.3.495

PEER. (2014). Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). Pacific Earthquake Engineering Research Center. https://ngawest2.berkeley.edu

Pirooz, R. M., Habashi, S., Massumi, A. (2021). Required time gap between mainshock and aftershock for dynamic analysis of structures. Bulletin of Earthquake Engineering, 19(6), 2643-2670. https://doi.org/10.1007/s10518-021-01087-z

Plumier, A., Doneux, C., Sanchez-Ricart L., Agatino, R., Plumier, C., Elnashai, A.S.E., Tsujii, M., Pinho, R., Bouwkamp, J., Parung, H., Broderick, B., Elghazouli, A., Cosenza, E., Manfredi, G. (2001). Seismic Behaviour and Design of Composite Steel Concrete Structures. Ecoest & Icons, Report No, 198. https://doi.org/10.13140/2.1.1951.1361

Raghunandan, M, Liel, A. B., Ryu, H., Luco, N., Uma, S. R. (2012). Aftershock Fragility Curves and Tagging Assessments for a Mainshock-Damaged Building. In Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering - WCEE, 10.

Raghunandan, Meera, Liel, A. B., Luco, N. (2015). Aftershock collapse vulnerability assessment of reinforced concrete frame structures. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 44(3), 419-439. https://doi.org/10.1002/eqe.2478

Ruiz-García, J., Yaghmaei-Sabegh, S., Bojórquez, E. (2018). Three-dimensional response of steel moment-resisting buildings under seismic sequences. Engineering Structures, 175, 399-414. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.050

SeismoSoft. (2018). SeismoStruct: A computer software for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures. www.seismosoft.com

TBDY. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. 416. http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1.pdf

Vamvatsikos, D., Cornell, C.A., (2005). Direct estimation of the seismic demand and capacity of MDOF systems through Incremental Dynamic Analysis of an SDOF approximation. Journal of Structural Engineering, 131, 589-599.

Xie, X., Lin, G., Duan, Y. F., Zhao, J. L., Wang, R. Z. (2012). Seismic damage of long span steel tower suspension bridge considering strong aftershocks. Earthquake and Structures, 3(5), 767-781. https://doi.org/10.12989/eas.2012.3.5.767

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

UMAGD, (2023) 15(2), 429-445.

10.29137/umagd.1239742

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

İnşaat Mühendisliği Deneysel ve Analitik Tasarımlarında Taguchi Yönteminin Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Investigation of Usability of Taguchi Method in Civil Engineering Experimental and Analytical Designs

Kemal Uray[1] *, Mustafa Koçer[2], Esra Uray[3], Hicran Açıkel[1]

[1]*Necmettin Erbakan Üniveristesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE*
[2]*Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE*
[3]K.T.O Karatay Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

***Başvuru/Received**: 20/01/2023* ***Kabul / Accepted**: 05/03/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 15/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 15/06/2023*

Öz

Yapıların tasarımı, inşası, işletilmesi ve bakımı gibi konularda çalışmalar yapan bir mühendislik dalı olan inşaat mühendisliğinde deneysel çalışmalar, yapı malzemelerinin ve taşıyıcı sistemlerinin yük-deformasyon davranışının gözlemlenmesi ve yapılan imalatların kontrol edilmesi gibi birçok problemde vazgeçilmez çözümler üretmektedir. İnşaat mühendisliği alanında özellikle beton üretiminde ve zemin iyileştirme çalışmalarında yoğun olarak kullanılan çimentonun üretiminde önemli ölçüde CO_2 gazı salmaktadır. Bu malzemenin optimum miktarının belirlenerek daha az kullanılması, sürdürülebilir ve çevre dostu olması açısından çözülmesi gereken önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Uçucu kül, silis dumanı ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu gibi atık malzemelerin ikamesiyle çimento miktarı azaltılabilmekle birlikte bu atık malzemelerin optimum değerleri önemli olmaktadır. Öte yandan istatistiksel tabanlı deneysel tasarım yöntemleri, deneysel çalışmaların optimum değerinin tasarımdan etkilenen parametreler dikkate alınarak araştırılmasını gerektirdiği için yaygın olarak kullanılmaktadır. İstatistik tabanlı deney tasarım yöntemlerin kullanılması ile basınç dayanımı, geçirgenlik gibi hedef değeri etkileyen faktörlerin yorumlanması ve bu faktörlerin optimum değerlerinin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Genichi Taguchi tarafından geliştirilen yöntem sayesinde zamandan, iş gücünden, maliyetten ve enerjiden tasarruf sağlanarak güvenilir sonuçlar elde edilmekle birlikte sonuç üzerinde etkili parametrelerin etkisi ve optimum değerleri güvenilir bir şekilde elde edilebilmektedir. Bu çalışmada inşaat mühendisliğinin deneysel çalışmalarının yoğun olarak bulunduğu yapı malzemesi ve geoteknik alanında Taguchi yönteminin kullanım alanlarına dair geniş kapsamlı literatür incelemesi verilmiş ve özellikle son yıllarda yöntemin yaygın bir şekilde istatistik deney tasarım yöntemi olarak kullanıldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

"Beton tasarımı, Geoteknik tasarım, Analitik Tasarım, Deney Tasarımı, Optimizasyon, Taguchi Yöntemi"

Abstract

Experimental studies in civil engineering, an engineering branch that studies the design, construction, operation, and maintenance of buildings, produce indispensable solutions to many problems such as observing the load-deformation behavior of building materials and bearing systems and controlling the productions. It releases a significant amount of CO2 gas in the production of cement, which is used extensively in the field of civil engineering, especially in concrete production and soil improvement works. Determining the optimum amount of this material and using it less is an important problem to be solved in terms of being sustainable and environmentally friendly. Although the amount of cement can be reduced by substituting waste materials such as fly ash, silica fume, and ground blast furnace slag, the optimum values of these waste materials are important. On the other hand, statistical-based experimental design methods have been commonly utilized because it requires the investigation of the optimum value of experimental studies by considering parameters affected by design. By using statistical-based experimental design methods, it is possible to interpret the factors affecting the target value such as compressive strength and permeability, and to obtain the optimum values of these factors. Thanks to the method developed by Genichi Taguchi, reliable results are obtained by saving time, labor, cost, and energy, and the effect and optimum values of the parameters that affect the result can be obtained reliably. In this study, a comprehensive literature review has been submitted on the areas of use of the Taguchi method in the field of building materials and geotechnical, where experimental studies of civil engineering are intense, and it has been seen that the method has been widely used as a statistical experimental design method, especially in recent years.

Key Words

"Concrete Design, Geotechnical Design, Analytical Design, Design of Experiment, Optimization, Taguchi Method"

***Sorumlu Yazar:** kemaluray@tcdd.gov.tr*

1. Giriş

Deney, çok eski zamanlarda temelleri atılan fizik, kimya ve matematik gibi temel bilimlerine dayanan ve mühendislik problemlerin çözümünde vazgeçilmez bir unsur olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca, deney ortaya atılan hipotezlerin kabul ya da reddedilmesinde ve doğruluklarının kontrolünde temel rol oynamaktadır. Deney tasarımı, problemin çözümünde çoklu değişkenlerin etkisini incelemek açısından etkili bir araç olup (Bowden vd., 2019), mühendislik, hizmet ve imalat sanayinde deney performansını iyileştirmede kullanılmaktadır (Zahraee vd., 2013). İnşaat mühendisliğinde deneysel çalışmaların yoğun olarak yapıldığı yapı malzemesi ve geoteknik alanında istatistik tabanlı deney tasarım yöntemlerini ön plana çıkarmaktadır. İstatistik tabanlı deney tasarım yöntemleri, bilimsel deneylerin tasarlanması ve yürütülmesinde istatistiksel metotların kullanıldığı bir dizi yöntemdir. Bu yöntemler, deneylerin verimliliğini ve güvenilirliğini arttırmak için kullanılır ve deney sonuçlarının daha doğru bir şekilde yorumlanmasını sağlar. Full faktöriyel tasarım, kesirli faktöriyel tasarım ve Taguchi metodu istatistik tabanlı deney tasarım yöntemleridir (Aksu, 2019). Full faktöriyel tasarım, tüm faktörlerin tüm seviyelerinin tam kombinasyonunu test etmek için kullanılan bir deney tasarımı olarak tanımlanmaktadır. Kesikli faktöriyel tasarım, tam faktöriyel tasarımların yarısı veya daha azı kadar deney sayısı ile uygulanması sebebiyle daha az zaman ve maliyet gerektirmesine rağmen bazı faktörler arası etkileşimler incelenememekte ve daha az bilgi sağladığından, deney sonuçlarının yorumlanması ve istatistiksel analizi daha karmaşık hale gelebilmektedir. İstatistiksel deney tasarım yöntemleri arasında avantaj sağlayan Taguchi metodu, üretimde kaliteyi arttırarak yüksek kaliteli ve düşük maliyetli ürünlerin elde edilmesi amacıyla Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiş bir optimizasyon metodudur. Metot, farklı faktör ve seviyesinin tekrarlamadığı ve farklı faktör ve seviyelerinin dikkate alındığı tasarım matrisleri ile sayısı azaltmış deney sonuçlarının yorumlanması imkânı vermektedir. Ayrıca Taguchi metodu faktörler arasında etkileşimi grafiksel olarak gösteren ve optimum parametreleri hedef değer ile tahmin eden güçlü ve güvenilir bir yöntemdir.

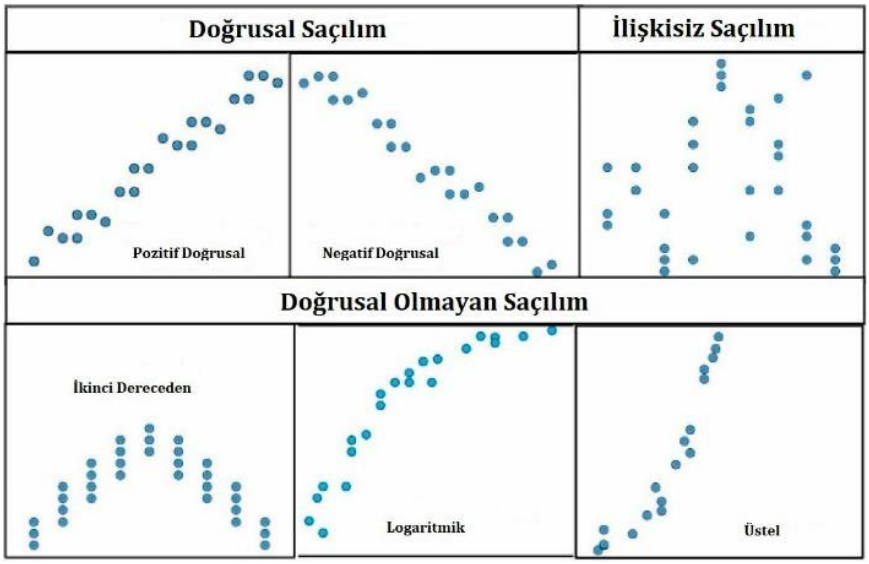
Geleneksel olarak, birden çok parametrenin olduğu deneysel çalışmalarda, her seferinde bir parametrenin sabit tutulduğu ya da değiştirildiği yaklaşım benimsenerek parametre etkisi tespit edilmeye çalışılır. Deneyler diğer parametreler sabit alınırken tek bir parametrenin değiştirilmesiyle yapılır. Bu durum, her değişken için tekrarlanarak parametre etkisi belirlenene, basit ve doğru sonuçlar elde edilene kadar devam ettirilir. Bir deneydeki tüm faktör seviyelerinin tam kombinasyonunu test etmek için kullanılan bir istatistiksel deney tasarımı olan tam faktöriyel yöntemler; çok fazla zaman, kaynak ve işgücünü gerektirdiğinden dolayı büyük miktarlarda numune sayısı ve yoğun deneysel çalışmayı ortaya çıkarmaktadır (Dejaegher & Vander Heyden, 2011). Genelde bu tür çalışmalarda tek bir yanıt veren değişkene odaklanılırken, diğer parametrelerin birbirleriyle olan potansiyel ilişkisi göz ardı edilir (Wu vd., 2010). Birçok parametrenin etkin olduğu tasarımlarda tüm önemli parametrelerin etkisini dikkate almak için çok sayıda numune üretilmesi gerekecektir. Genel olarak, r parametre sayısı ve n parametre seviyesi için tüm kombinasyonların sayısı n^r ile ifade edilir. Örneğin 5 parametrenin ve bu parametrelerin 6 seviyesinin göz önünde bulundurulduğu deneysel bir çalışmada tüm parametrelerin seçilen farklı seviyelerine göre etkisinin görülmesi için 7.776 (6^5) veri gerekli olmaktadır. Laboratuvar koşullarında bu çalışmanın yapılması, pratik olmayan, zaman alıcı ve yüksek maliyetli bir iştir. Bu nedenle deney tasarım yöntemi çalışmalarda veri toplama ve analiz sürecini optimize etmek için seçilmektedir. Deney tasarımı, her bir değişkenin çalışılan bağımlı değişkenler üzerindeki etkisini açıklayarak doğru istatistiksel tahmin gerçekleştirmek için gereken örnek sayısını azaltarak optimize etmeyi mümkün kılmaktadır. Ancak deney tasarımı esnekliği sebebiyle, özellikle alan hakkında yeterli bilgiye sahip olmayan ve uygulama metodolojisinden yoksun araştırmacılar için sorun teşkil edebilmektedir (Tanco vd., 2008). Deney tasarımının beton malzemeleri çalışmalarında ve birçok parametrenin etkili olduğu analitik problemlerde kullanımı son yıllarda giderek artış göstermiştir. Deney tasarımının yapıldığı çalışmalar beton mukavemet tahmininden beton karışım tasarımına kadar geniş geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Bu bağlamda, deney sonuçlarına göre oluşturulan dağılım grafiği ile basit doğrusal regresyon analizi yaygın olarak kullanılan bir diğer yöntemdir.

Beton özelliklerinin iyileştirilmesinde çimentonun yerine ikame edilerek kullanılan ve genellikle kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan yapay mineral katkılar (puzolanlar) sanayinin atık ürünleri olarak açığa çıkmaktadır. Bu malzemelerin beton yapımında kullanılması çimento üretiminden kaynaklı çevre kirliliğinin azaltılması açısından küresel ısınmanın etkilerini önemli ölçüde hissettiğimiz günümüz dünyasında çok önemlidir. Mineral katkılar betonda, çimentonun hidratasyon ürünleri ile tepkimeye girerek bağlayıcılık özelliği kazanmaktadırlar. Ancak betonun hedef deney performansına ve elde edilmek istenilen beton özelliğine göre içeriğindeki malzeme bileşenlerinin optimizasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü silis dumanının fazla kullanılması su gereksinimini artıracağından taze betonun işlenebilirliğini azaltan bir durumdur. Diğer yandan beton karışımında mineral katkı içeriğinin çok fazla olması dayanımda olumsuzluklara neden olabilmektedir. Yine su/bağlayıcı oranının yüksek olması durabilite açısından birçok olumsuzluğa sebep olmaktadır. Bu sebeple sürdürülebilir beton üretiminde betondan istenilen mekanik, reolojik ve dayanıklılık özellikleri açısından hedeflerin hızlı, kolay ve ekonomik olarak yakalanması yönüyle istatistiksel deney tasarımı, parametrelerin tek başına ve birbirleriyle olan etkisini yansıtmada çok önemli olmaktadır. Ayrıca deney tasarım yöntemleri sayesinde, az sayıda deney yapılarak hedef deneyin ara değerler için tahmini de yapılabilmektedir. Diğer yandan parametrelerin ara değerleri için varyans ve regresyon analizleri yapılarak matematik modeller çıkarılabilmektedir. Çok sayıda değişkenin bulunduğu, bilgisayar destekli ve yazılımların kullanıldığı birçok mühendislik probleminde parametre optimizasyonunun yapılması çok önemlidir. Bu sayede etkili parametreler üzerinde daha fazla yoğunlaşılacak ve tasarımlarda daha çok bu parametrelerin dikkate alınması sağlanacaktır. Diğer yandan tasarımlarda en etkili parametrelerin göz önüne alındığı yüksek doğruluk oranlı matematik modeller elde edilebilmektedir. Elde edilen bu modeller sayesinde hedef tasarım için hızlı ve güvenli bir şekilde sonuç elde etmek mümkün olmaktadır. Zaman, enerji ve ekonominin oldukça önemli hale geldiği günümüz dünyasında bahsedilen hederlerin karşılanması ve karmaşık mühendislik problemlerinde parametrik etkinin incelenerek optimum tasarımların elde edilmesinde istatistik tabanlı Taguchi Metodu' nun kullanımı ön plana çıkarmaktadır. Bu çalışmanın amacı inşaat mühendisliği deneysel ve analitik çalışmalarında istatistiksel tabanlı bir yöntem

olan Taguchi metodunun kullanılabilirliğinin araştırılmasına dair bir inceleme sunmaktır. Aynı zamanda bu çalışma; özellikle iş yükünün, zaman kaybının ve maliyetin yüksek olduğu deneysel çalışmalarda kolaylık sağlanması fikrinden dolayı önemli olduğu düşünüldüğünde araştırmacılara faklı bir bakış açısı oluşturacaktır. Bu çalışmada; özellikle yapı malzemesi alanında kullanılan birçok parametrenin, yöntem kullanılarak optimizasyonunun nasıl yapıldığına dair kapsamlı literatür incelemesi sunulmuştur. Bunun da ilerleyen zamanlarda yöntemi kullanmak isteyen araştırmacılar için yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

2. Regresyon Analizi Konsepti

Regresyon analizi, bir bağımlı değişken ile birden çok bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi belirlemek için yaygın olarak kullanılan temel istatistiksel bir yöntemdir. Basit doğrusal regresyon birbiriyle doğrusal ilişkisi olan değişkenler hakkında bize bilgi vermektedir. Basit ve temel bilgisayar yazılımları sayesinde araştırmacılar değişkenlerin birbirleriyle olan ilişkilerini kolay bir şekilde inceleyebilirler. Bu ilişki genellikle grafiksel gösterimler aracılığıyla sağlanmaktadır. Grafiksel gösterimlerde değişkenler arasında doğrusal bir ilişki varsa çizgi boyunca saçılım gözlenirken, doğrusal olmayan bir ilişki söz konusu ise saçılım genellikle bir eğri üzerinde oluşmaktadır. Ancak saçılımlar herhangi bir örüntü oluşturmuyorsa değişkenlerin birbirinden bağımsız olduğu anlaşılmaktadır. Genel olarak oluşan saçılımlar Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Saçılım Grafikleri Genel Görünümü (Chong vd., 2021).

Değişkenler arasındaki doğrusal ilişkiyi test etmek için en temel regresyon şekli kullanılırken doğrusal olmayan ilişkilerde değişkenler arasında çoklu regresyon yapılarak geçiş sağlanabilmektedir. Bu sayede bir bağımsız değişken ele alınarak regresyon kolaylaştırıp çok yönlü hale getirilmektedir. Bundan dolayı regresyon analizleri mühendislik alanında çalışan araştırmacılar için popüler olmaktadır. Tablo 1'de regresyon tipleri için tek bir değişkene indirgenmiş dönüşümler gösterilmektedir.

Tablo 1. Farklı Durumlar İçin Regresyon İfadesi (Chong vd., 2021)

Regresyon tipi	Eşitlik	Bağımlı değişken	Bağımsız değişken
Doğrusal	$y = mx + c$	y	x
İkinci dereceden polinom	$y = Ax^2 + Bx + C$	y	x, x^2
Üstel	$y = Ae^x$	$ln\,(y)$	x
Logaritmik	$y = Ax^b$	$ln\,(y)$	$ln\,(x)$

Regresyon analizinin farklı çeşitleri beton tasarımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Regresyon analizi deneysel çalışmalarda değişkenler arasındaki ilişkiyi basit ve anlaşılır bir şekilde tahmin etmek amacıyla tercih edilmektedir. Birden fazla bağımlı ya da bağımsız değişken içermeyen ve bir korelasyon ifadesi gerektiren çalışmalarda büyük oranda regresyon analizleri kullanılmaktadır. Buna göre regresyon analizlerinin yapıldığı bazı çalışmalar ve tahmin oranları Tablo 2'de verilmiştir. Regresyon değerinin 1'e yakınsaması, bağımlı ve bağımsız değişkenlerin arasında yüksek korelasyon olduğunun bir göstergesidir.

Tablo 2. Literatürde Yapılmış Bazı Regresyon Analizi Tahmin Değerleri

Araştırmacı-Yıl	Bağımlı Değişken	Metodoloji	R^2
Yeh (1998)	Beton Basınç Dayanımı	Doğrusal Regresyon	0.463- 0.588
Ramana vd. (2013)	Beton Basınç Dayanımı	Doğrusal Regresyon	0.98-1.00
Chithra vd. (2016)	Beton Basınç Dayanımı	Doğrusal Regresyon	0.63-0.67
Kocáb vd. (2019)	Beton Basınç Dayanımı	Doğrusal Regresyon	0.878-0.963
Olonade vd. (2017)	Beton Basınç Dayanımı	Doğrusal Regresyon	0.87-0.98
Zain ve Abd (2009)	Beton Basınç Dayanımı	Logaritmik Regresyon	1.00
Jin vd. (2018)	Beton Basınç Dayanımı (3gün)	Logaritmik Regresyon	0.843
	Beton Basınç Dayanımı (7gün)		0.873
	Beton Basınç Dayanımı (28gün)		0.895
	Beton Basınç Dayanımı (90gün)		0.873

3. Taguchi Metodu

Japon bilim insanı Genichi Taguchi (Taguchi vd.,1989 ; Taguchi ve Phadke 1986) tarafından geliştirilmiş Taguchi yöntemi ve deneme-yanılma yöntemine bağlı geleneksel deney tasarımı yerine araştırma maliyetini azaltan, zaman ve enerjiden kazanç sağlayan kaliteyi arttırmaya odaklı alternatif bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Geleneksel deney tasarımı tam faktöriyel bir yöntemdir. Bundan dolayı her biri n tane parametre seviyesine bağlı r tane parametrenin hedef değer üzerinde etkisinin araştırılacağı bir deneysel çalışmada her seferinde bir parametre için değişiklik yapılarak toplamda n^r sayıda kombinasyon için deneyin tekrarlanması gerekmektedir. Bu durum özellikle klasik regresyon veya multi doğrusal regresyon (MLR) yöntemini kullanan birçok deney için geçerlidir. Yapılacak deney sayısını azaltması amacıyla araştırmacılar tarafından bazı kesirli faktöriyel yöntemler bulunmuştur (Chong vd., 2021). Taguchi yöntemi, Latin kareler serisine dayalı olan ortogonal dizi kullanılarak deney sayısı azaltılabilmektedir. Araştırmada dikkate alınacak parametre ve parametre seviyesi durumuna göre uygun ortogonal dizi seçilimi yapıldıktan sonra deney tasarım tabloları elde edilmektedir. Ortogonal dizinin altında yatan temel ilke, bazı karmaşıklıklar içerse de yöntemin kullanımına dair temel bir anlayışa sahip araştırmacıların parametre ve seviyelerine bağlı olarak önceden hazırlanmış ortogonal dizi tablolarını kullanmaları yeterli olmaktadır (Ross, 1988). Buna göre parametre ve seviyelere göre Taguchi tarafından önerilen çeşitli ortogonal diziler düzenlenmiş olarak Tablo 3'te (Cimbala, 2014; Uray vd., 2022) ve tam faktöriyel ve Taguchi deney sayıları ile birlikte gösterimi Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 3. Parametre ve Seviyeler İçin Ortogonal Dizi Seçim Tablosu

Ld	L4	L4	L8	L8	L9	L9	L9	L18	L16	L16	L16	L16	L25	L25	L25
d	4	4	8	8	9	9	9	18	16	16	16	16	25	25	25
r	2	2	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4
n	2	3	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5

Tablo 4. Çalışmalarda En Çok Kullanılan Taguchi Ortogonal Diziler

Ortogonal Dizi	Parametre/Seviye (r/n)	Tam Faktöriyel Kombinasyon Sayısı	Taguchi Kombinasyon Sayısı
L4	3/2	8	4
L16	5/4	1024	16
L9	4/3	81	9
L25	5/4	625	25
L8	2/7	128	8

Tablo 5. L4 Ortogonal Dizi Tablosu

Sıra No	Parametreler		
(L4)	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

A1 ifadesinin, A parametresinin 1. seviyesini ve C2 ifadesinin C parametresinin 2. Seviye değeri olarak gösterildiği Taguchi L4 ortogonal dizi Tablo 5'te verilmiştir. Literatürde yapılmış olan çalışmaları parametre sayısı, parametre seviye sayısı, kullanılan ortogonal dizi ve hedef performans değerine göre düzenlenmiş çizelgesi Tablo 6' da verilmiştir.

Tablo 6. Literatürde Taguchi Metodu Kullanılarak Yapılmış Çalışmalar

Araştırmacı-Yıl	Parametre /Seviye	Ortogonal Dizi	Hedef performans değeri
Uysal (2012)	4/3	L16	Basınç Dayanımı
Kate vd. (2021)	4/3	L16	Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı, Çekme Dayanımı
Warda vd. (2020)	6/3	L27	Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı, Çekme Dayanımı
Sevinç vd. (2017)	5/4	L16	Basınç Dayanımı, Su Emme Değeri, Çekme Dayanımı, Aşınma Direnci
Hınıslıoğlu & Bayrak (2004)	4/4	L16	Eğilme Dayanımı
Uysal vd. (2019)	3/3	L9	Donma-Çözünme Direnci, Kılcal Su Emme Değeri, Klorid İyonu Geçirimlilik Direnci, Eğilme Dayanımı
Sabarish & Paul (2020)	4/3	L9	Basınç Dayanımı
Sahoo vd. (2016)	3/4	L9	Basınç Dayanımı, Beton Kütle Kaybı
Tang vd. (2022)	4/3	L9	Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı, Çekme Dayanımı
Karthik & Mohan (2021)	4/4	L16	Basınç Dayanımı
Anand vd. (2021)	7/3	L36	Basınç Dayanımı
Amer vd. (2021)	4/3	L9	Basınç Dayanımı, Slump Testi
Tanyıldızı (2021)	3/3	L9	Beton Basınç Dayanımı, Ultrasonik Darbe Hızı
Ramasamy vd. (2020)	3/3	L9	Basınç Dayanımı, Kayma Dayanımı, Çekme Dayanımı
De Side vd. (2020)	3/3	L9	Basınç Dayanımı
Tabatabaeian vd. (2018)	3/3	L9	Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı, Çekme Dayanımı, Elektriksel Direnç, Ultrases Geçiş Hızı
Lee & Shin (2019)	6/3	L18	Basınç Dayanımı, Slump Testi, Çekme Dayanımı
Dave vd. (2021)	4/3	L9	Basınç Dayanımı, Slump Testi, Su Emme Deneyi, Hızlandırılmış Korozyon Deneyi
Alighardashi vd. (2019)	3/3	L9	Basınç Dayanımı, Su Emme Deneyi, Boşluk Oranı Tayini, Sertleşmiş Beton Birim Ağırlığı
Gao vd. (2021)	4/4	L16	Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı, Çekme Dayanımı, Slump Testi, Su Emme Deneyi
Olivia & Nikraz (2012)	4/3	L9	Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı, Hızlandırılmış Korozyon Deneyi
Sharifi vd. (2020)	6/3	L18	Basınç Dayanımı, Çekme Dayanımı, Slump Testi

Birçok araştırmacı tarafından sanayi, gıda, tarım, üretim ve mühendislik gibi birçok alanda Taguchi yöntemi kullanılmaktadır. Aynı zamanda bir optimizasyon yöntemi olduğu için farklı parametre ve seviyelerinin bulunduğu beton malzemesinin üretiminde bileşenlerin optimum değerlerini istatistiksel olarak belirlemektedir. Taguchi yöntemi birçok parametre ve parametre seviyesinin bulunduğu karmaşık karışım tasarımlarında optimum değeri ve parametrelerin hedef değer üzerine etkisini veren bir yöntemdir. Az sayıda deney yapılarak birçok parametrenin etkisi ve parametrelerin etkileşimi belirlenebildiği (Roy, 2010) bu yöntemin uygulanmasında performans kriteri olarak Sinyal/Gürültü (S/N) oranları kullanılmaktadır. Burada sinyal faktörü olarak tanımlanan S sistemin kalite değerini ifade ederken, N değeri ise sistemin sonucuna olumsuz etki eden ve deney tasarımına katılmayan faktörleri ifade eden gürültüye karşılık gelmektedir (Serencam & Uçurum, 2019). Deneylerde istenilen hedef durum için performans karakteristiklerinin bir ifadesi olan S/N oranı değerleri; en küçük-en iyi, hedef değer en iyi veya en büyük-en iyi durumlarına göre belirlenmekte olup sırasıyla Denklem 1-3'te verilmiştir. Örneğin uygulanan deneyler basınç dayanımı için ise S/N oranı en büyük-en iyi olarak seçilmekte, beton kütle kaybı ya da geçirimlilik katsayısı için ise S/N oranı en küçük-en iyi olarak seçilmektedir. Deneyler bir hedefe yönelik uygulanıyorsa bu sefer hedefe en yakın S/N oranı için hedef değer-en iyi durumu seçilmektedir (Hinislioğlu & Bayrak, 2004). Taguchi yönteminde parametre etkilerini daha net belirlemek için deney tekrarı mümkün olduğunca fazla olmalıdır. Ancak; literatürde yaygın olarak kullanılan tekrar sayısı 3 olarak göze çarpmaktadır. Yapılan performans deneylerinde bu 3 deney tekrarının ortalaması alınarak, Taguchi analizleri yapılmaktadır. Yöntemin güvenilirliği, önerdiği parametre seviyeleri doğrultusunda doğrulama deneyleri yapılarak test edilmektedir.

$$S/_N = -10\log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum^{n} Y_i^2\right) \quad (1)$$

$$S/_N = -10\log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum^{n} \frac{Y_{ort}}{\sigma^2}\right) \quad (2)$$

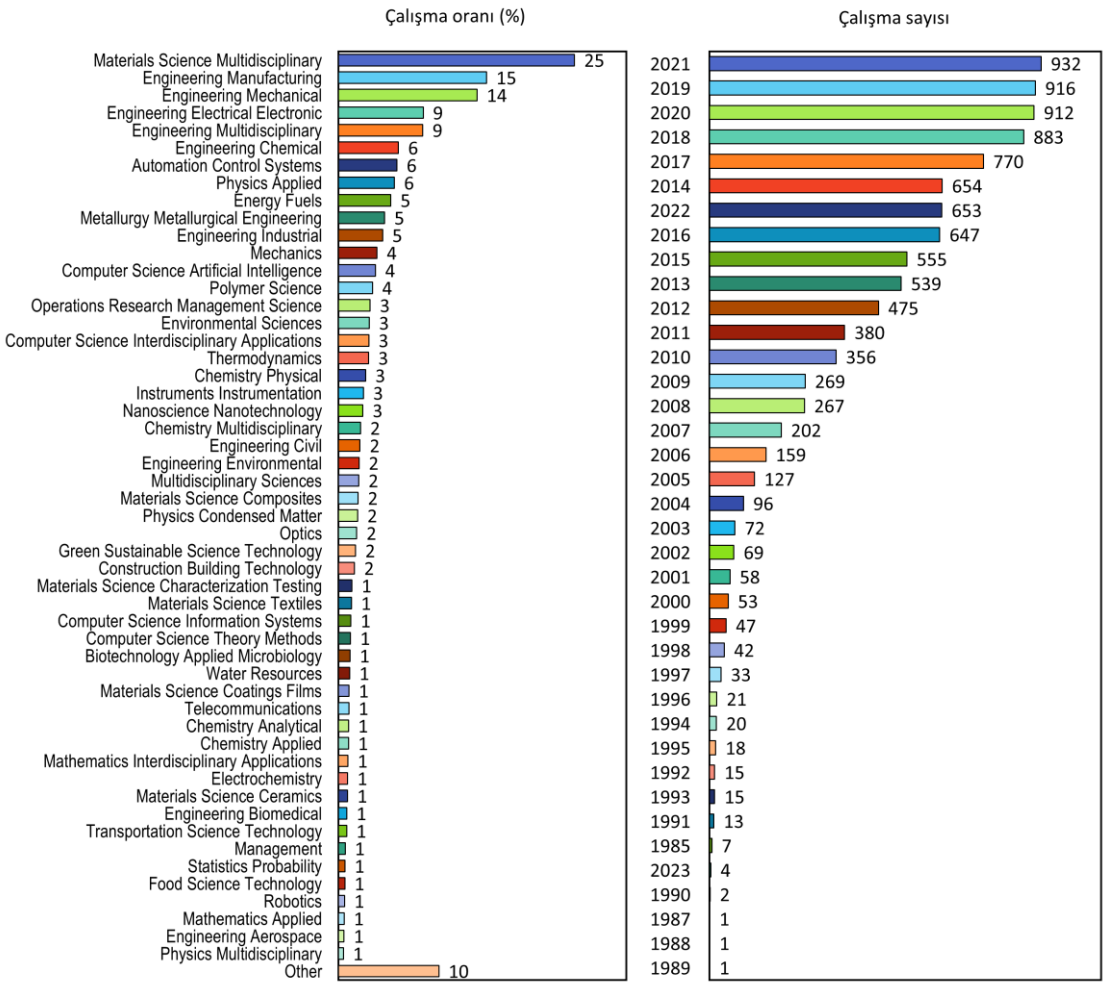
$$S/_N = -10\log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum^{n} \frac{1}{Y_i^2}\right) \quad (3)$$

Denklemlerde, S/N oranı istatistiksel performansı, n deney tekrarı sayısını, Y_i, i. deneyin performans değerini, Y_{ort} ve σ ise deney performans değerlerinin aritmetik ve standart sapma değerini göstermektedir.

4. İnşaat Mühendisliğinde Taguchi Yöntemi Uygulamaları

Taguchi metodu, mühendisliğin birçok alanında uygulanan istatistiksel deneysel tasarıma imkân sağlayan bir metottur. Özellikle son yıllarda inşaat mühendisliği deneysel ve analitik çalışmalarında da yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Taguchi yöntemi kullanılarak, çeşitli parametrelerin yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımına olan etkisi L16-L9 ortogonal diziler kullanılarak araştırılmıştır (Kate vd., 2021; Ramasamy vd., 2020; Sharifi vd., 2020; Uysal, 2012; Warda vd., 2020). Farklı mineral katkıların kullanıldığı karışımların mühendislik özellikleri L16 ortogonal dizi kullanılarak araştırılmıştır (Sevinç vd., 2017). Geçirimli betonlarda silis dumanı ve uçucu kül katkılarının eğilme dayanımına etkisi L16 ortogonal dizi kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır (Alighardashi vd., 2019; Hinislioğlu & Bayrak, 2004). Başka bir çalışmada betonda uçucu kül kullanımının betonun durabilite özelliklerine etkisi L9 ortogonal dizi kullanılarak araştırılmıştır (Uysal vd., 2019). Yöresel fiber malzemenin ve uçucu kül kullanımının betonun basınç dayanımına etkisi L9 ortogonal dizi kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır (Sabarish & Paul, 2020). Diğer bir çalışmada, agresif ortam koşullarında karbonatlaşmış ve normal uçucu kül kullanılarak üretilmiş betonun durabilite özelliklerini L9 ortogonal dizi kullanarak deneysel olarak araştırmışlardır (Dave vd., 2021; Sahoo vd., 2016). Taguchi yönteminin istatistiksel deney tasarımında diğer yöntemlerle birlikte kullanımı ve tahmin değerleri araştırılmıştır (Chong vd., 2021). Hafif agrega ile üretilmiş fiber donatı içeren geçirimli betonların mühendislik özellikleri Taguchi yaklaşımı kullanılarak araştırılmıştır (Tang vd., 2022). Çeşitli mineral katkılar ve parametreler kullanılarak Taguchi yöntemiyle geopolimer betonun optimum dizayn karakteristikleri belirlenmeye çalışılmıştır (Jafari vd., 2018; Karthik vd., 2021; Lee & Shin, 2019; Olivia & Nikraz, 2012; Raj vd., 2021). Başka bir çalışmada; alkali ile aktifleştirilmiş öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren betonun basınç dayanımı ve diğer karakterizasyonları Taguchi yöntemi kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır (Amer vd., 2021). Polimer emdirilmiş betonun basınç dayanımı çeşitli parametreler için Taguchi yaklaşımı kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır (Tanyildizi, 2021). Diğer bir çalışmada ise Taguchi yöntemi kullanılarak mineral katkı optimizasyonu yapılmıştır (De Side vd., 2020). Başka bir çalışmada; atık malzemelerin kullanımının beton özelliklerine etkisi Taguchi yaklaşımı kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır (Gao vd., 2021).

"Taguchi Method" anahtar kelimesi ile Web of Science web sitesinde gerçekleştirilen arama sonucunda farklı alanlarda toplamda 10,284 makale, bildiri, literatür özeti, kitap bölümü gibi akademik çalışma bulunmuştur (WOS-1, 2023). Bu çalışmaların %76'sini makaleler ve %23'ünü bildiriler oluşturmaktadır. Çalışmaların çalışma alanlarına göre yüzdeleri ve yıllara göre sayısını gösteren grafikler Şekil 2' de verilmiştir.



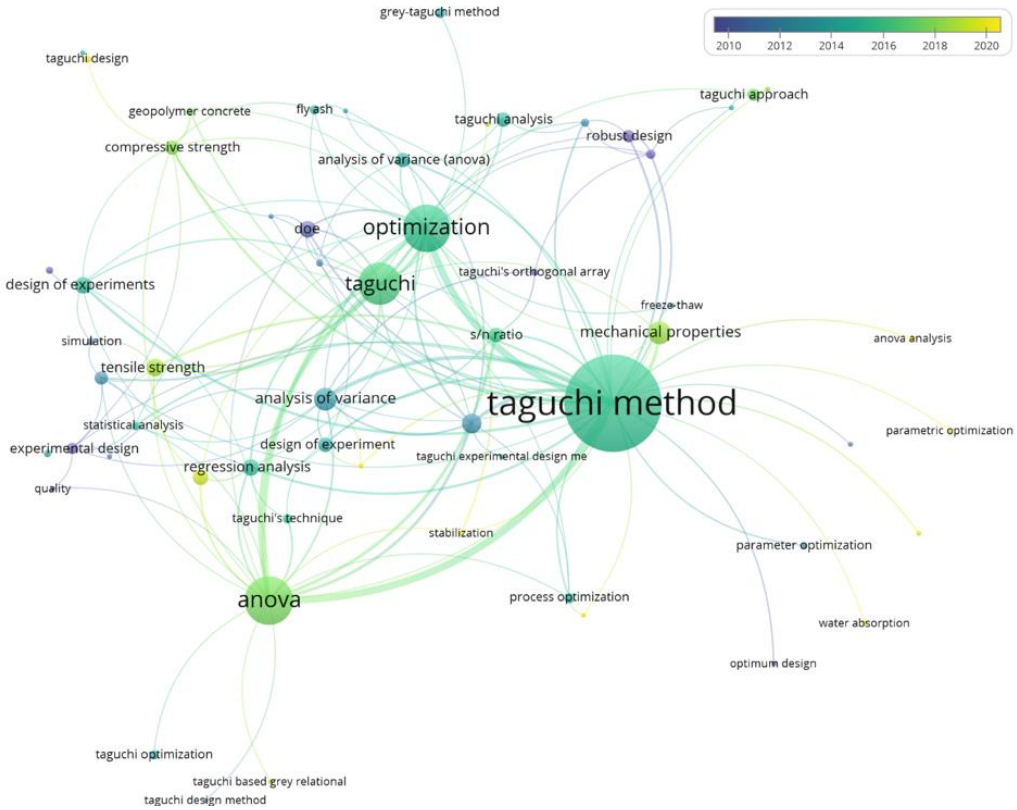
Şekil 2. Web of Science Çalışma Alanlarına ve Yıllara Göre Taguchi Metodu Literatür Tarama Sonuçları (WOS-1, 2023)

Şekil 2' de verilen grafikler incelendiğinde 1986 ve 1989 yıllarında literatüre önerilen Taguchi (Taguchi vd., 1989; Taguchi & Phadke, 1986) metodunun günümüze kadar birçok farklı alanda ve yıllara göre artan popülerlikte kalite geliştirme ve istatistiksel deney tasarımına dayanan çalışmalarda yaygın bir kullanıma sahip olduğu görülmektedir.

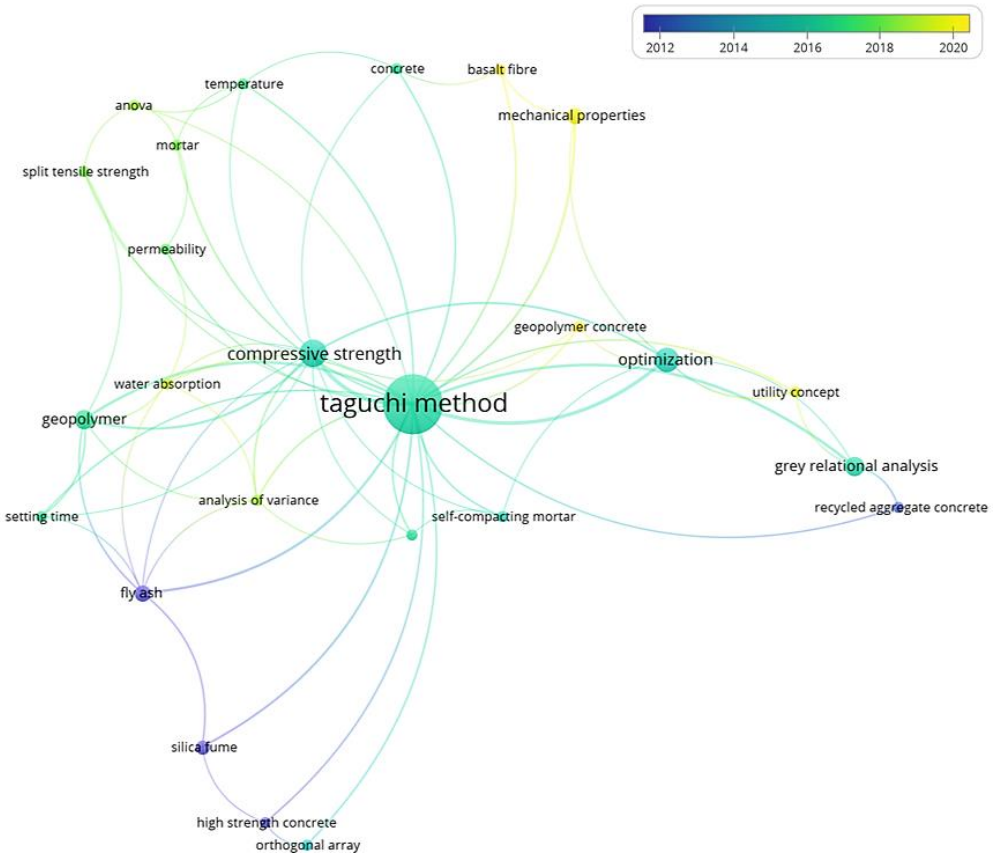
Kapsamlı literatür tarama sonuçlarının analiz edilmesinde ve görselleştirilmesinde açık kaynak kodlu bir ağ analizi ve veri görselleştirme yazılımı olan VOS VIEWER kullanılmıştır. VOS Viewer, bilimsel araştırmaların özetlenmesine, araştırma konularının belirlenmesine, ağ yapısının anlaşılmasına, araştırmalar arasındaki ilişkilerin görselleştirilmesine ve analiz edilmesine yardımcı olur. Elde tüm literatür çalışmaları yapı malzemesi ile ilişkili olan alanlara göre (Multidisciplinary-Civil Engineering) filtrelendiği elde edilen 2,704 (WOS-2, 2023) çalışmanın ortogonal dizi, Taguchi metodu, deney tasarımı, parametre optimizasyonu, uçucu kül, varyans analizi, parametre optimizasyonu, basınç dayanımı gibi anahtar kelimelerinin en az 3 kesişimi ile elde edilen ilişki ağ görseli Şekil 3' te verilmiştir. Şekil 2' de elde edilen 10,824 çalışmanın basınç dayanımı atıfı yapan çalışma (concrete sciense citation topic meso) olarak filtrelenmesi ile elde edilen 233 (WOS-3, 2023) çalışmanın ilişki ağ görseli Şekil 4' te verilmiştir. Şekil 3 ve Şekil 4' te verilen Taguchi metodunun ilişki ağ grafikleri incelendiği zaman yöntemin son on yılda yaygın olarak yapı malzemesi alanında kullanıldığı görülmektedir.

Geoteknik alanında Taguchi metodu gibi istatistik tabanlı çalışmalar için zemin, geoteknik ve Taguchi metodu anahtar kelimeleri için Web of Science veritabanında gerçekleştirilen literatür taramasında elde edilen 142 akadamik çalışmanın Vos Viewer ilişki ağ grafiği Şekil 5' te verilmiştir (WOS-4, 2023). Geoteknik alanında zemin iyileştirme çalışmalarında, jet grout kolonları (Erkan, 2013) ve derin karıştırma kolonlarının (Yenginar, 2020) performansı etkileyen faktörlerin araştırılması gibi deneysel çalışmalarda kullanıldığı görülmüştür. Çimento, kireç, uçucu kül, silis dumanı gibi malzemelerin su ve zemin belli oranlarda ile karıştırılması ile elde edilen karışımla teşkil edilen zemin iyileştirme çalışmalarında Taguchi yöntemi ile karışım bileşenlerinin optimum değerlerinin belirlendiği ve/veya karışım bileşenlerinin serbest basınç dayanımı, geçirimlilik gibi hedef değere etkisinin parametrik olarak incelendiği görülmüştür (Tan vd., 2014; Yenginar vd., 2021; Zaimoğlu, 2015). Ayrıca dayanma duvarı tasarımı ve şev stabilitesi gibi geoteknik problemlerin çözümünde güvenilir bir şekilde kullanılan Taguchi metoduna dayalı matematik modeller geliştirilmiştir (Tan, 2006;

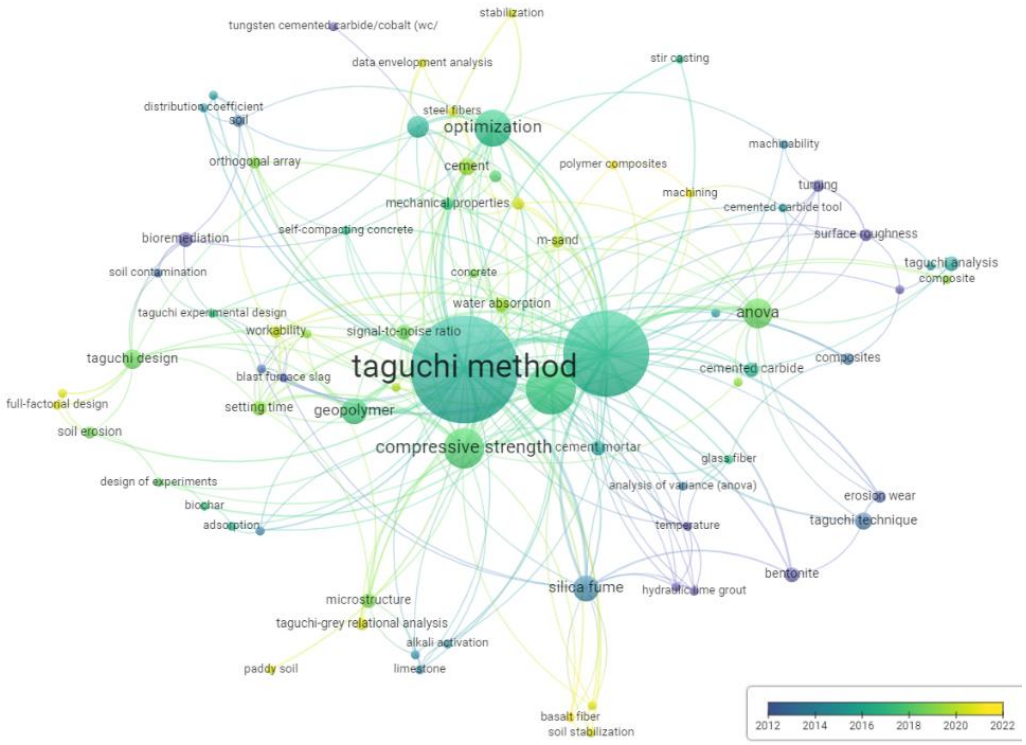
Uray vd., 2021). Taguchi metodunun kullanımının yapı malzemesi alanında daha yaygın olduğu, ancak geoteknik alanında yapılan çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür.



Şekil 3. İnşaat mühendisliğinde Taguchi metodunun inceleme alanlarının ilişkilendirilmesi (WOS-2, 2023)



Şekil 4. Yapı Malzemesi Alanında Taguchi Metodunun İnceleme Alanlarının İlişkilendirilmesi (WOS-3, 2023)



Şekil 5. Geoteknik Alanında Taguchi Metodunun İnceleme Alanlarının İlişkilendirilmesi (WOS-4, 2023)

Yöntemin yapı malzemesi alanında daha çok parametre optimizasyonunda kullanılmıştır. Silis dumanı, uçucu kül gibi yapay puzolan katkısı ile gerçekleştirilen beton karışım tasarımının optimum bileşenlerinin basınç dayanımı, çekme dayanımı gibi deney performans değerleri için araştırıldığı çalışmaların oldukça yaygın olduğu literatür çalışmalarından görülmektedir. Tablo 7' de Taguchi metodu kullanılarak yapılan çalışmalara ait detaylar verilmiştir.

Tablo 7. Literatürde Taguchi Metodu Kullanılarak Yapılmış Çalışmaların Detaylı Açıklamaları.

Araştırmacı-Yıl	Çalışma Konusu	Parametreler	Özet Sonuçlar
Uysal (2012)	Çeşitli parametrelerin yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımına olan etkisi	Çimento Tipi Çimento dozajı Süp. Akış. Tipi SD ve UK kullanımı Kür süresi	Çalışmada en etkili parametre yaklaşık %84 oranla kür süresi olurken 2. en etkili parametre %13,5 oranla çimento dozajı olmuştur. Diğer parametrelerin etkisi minimal kalmıştır.
Kate vd. (2021)	Yüksek dayanımlı betonların mühendislik özelliklerine çeşitli parametrelerin etkisi	Uçucu kül (UK) (Çimento ağırlığınca %30, 45, 60, 70) Çimento dozajı Süp. Akış. Çelik fiber	Çalışmada 7 günlük basınç dayanımında en etkili parametre süper akışkanlaştırıcı katkı olurken 28, 56 ve 90. günlerde uçucu kül olmaktadır. Diğer mekanik özelliklerde de benzer sonuçlar elde edilmiştir.
Warda vd. (2020)	Yüksek dayanımlı betonların mekanik özelliklerine çeşitli parametrelerin etkisi	Silis dumanı % (0, 5, 10) Ç. Fiber %(0, 1, 2.5) S.Ak. % (0.3, 0.5, 0.7) Agrega çapı (mm) (20, 14, 10) S/Ç oranı (0.27, 0.31, 0.35) UK % (0, 10, 20)	Çalışmada 7 ve 28 günlük basınç dayanımında en etkili parametre yaklaşık %50 ile uçucu kül olmuştur. Çelik fiber de yaklaşık %27 ile ikinci en etkili parametre olmuştur. 56 ve 90 günlük basınç dayanımlarında ise birbirlerine yakın ve yaklaşık %40'lık etkiyle uçucu kül ve s/ç oranı olmuştur.

Tablo 8. Literatürde Taguchi Metodu Kullanılarak Yapılmış Çalışmaların Detaylı Açıklamaları (Devamı).

Araştırmacı-Yıl	Çalışma Konusu	Parametreler	Özet Sonuçlar
Sevinç vd. (2017)	Barit, kolemanit, bazaltikpomza ve yüksek fırın cürufu içeren betonların mühendislik özelliklerini Taguchi yaklaşımı kullanarak araştırılması	Pomza % (0, 2.5, 5, 10) Barit % (0, 2.5, 5, 10) YFC % (0, 2.5, 5, 10) Kolamanit % (0, 0.25, 0.5, 0.75)	28 günlük basınç dayanımında ise puzolonik etkisinden dolayı yüksek fırın cürufu yaklaşık %47'lik etki ile en etkili parametre olmuştur. 28 günlük silindir yarma deney sonuçlarında da yüksek fırın cürufu en etkili parametre olmuştur.
Hınıslıoğlu & Bayrak (2004)	Geçirimli betonlarda silis dumanı ve uçucu kül ikamesinin erken eğilme dayanımına etkisi	S/Ç oranı (0.30, 0.35, 0.40, 0.45) Gradasyon tipi UK içeriği % (0, 5, 10, 15) SD % (0, 10, 20, 30)	Araştırma sonuçlarına göre; UK ve SD çok ince olduklarından maksimum eğilme dayanımına 0,30 S/Ç oranında değil 0,35 S/Ç oranında ulaşılmıştır. Çalışmada %5'ten fazla uçucu kül ikamesinin erken yaş eğilme dayanımını (7 g) olumsuz etkilediği belirtilmiştir. Araştırmacılar SD'nın çok ince olması ve su gereksinimini artırmasından dolayı çimento matrisinde mikro büzülme çatlaklarının oluşumuna sebep olabileceğini düşünmektedir.
Uysal vd. (2019)	Betonda uçucu kül kullanımının betonun durabilite özelliklerine etkisinin Taguchi yaklaşımı ve varyans analizi kullanarak araştırılması	Çimento dozajı (260, 320, 400 kg/m³) UK (% 0, 10, 17) Kür süresi (1, 6, 12 ay)	Araştırma sonuçlarına göre klorid iyonu geçirimlilik deney sonuçları değerlendirildiğinde en etkili parametrenin sırasıyla %67, %33 ve %0,5 ile çimento dozajı, uçucu kül ve kür süresi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kılcal su emme deney sonuçları değerlendirildiğinde, en etkili parametreler sırasıyla %81, %16 ve %2 ile çimento dozajı, uçucu kül ve kür süresi olduğu belirlenmiştir.
Sabarish & Paul (2020)	Taguchi L9 ortagonal dizi kullanarak beton üretiminde kullanılan parametrelerin optimizasyonunun yapılması	S/B oranı (0.4, 0.45, 0.50) UK (%20, 25, 30) Sisal fiber (%1, 1.5, 2) M kum (%30, 35, 40)	Araştırmada kullanılan parametrelere göre; elde edilen en yüksek basınç dayanımı s/b oranının 0,45 uçucu kül oranının %20 özel nehir kumu (M-kum) oranının %35 ve sisal fiber oranının %2 olduğu seride elde edilmiştir.
Sahoo vd. (2016)	Karbonatlaşmış uçucu kül ve normal uçucu kül ikamesinin agresif ortam koşullarında (asit, sülfat ve klorür) betonun durabilite özelliklerine etkisinin araştırılması	Beton tipi (Kontrol, %25 UK katkılı, %25 karbonatlaşmış UK katkılı) Normal kür süresi (28, 56, 90 ve 180 g) Kimyasal agresif ortam (Tuzlu, Sülfatlı, Asitli)	Yapılan araştırma sonuçlarına göre yazarlar karbonatlaşmış uçucu külün özellikle asit ve sülfat saldırısına maruz kalabilecek betonlarda çimento ikame maddesi olarak kullanımının basınç dayanımında olumlu etkilerinin olduğunu göstermişlerdir
Tang vd. (2022)	Hafif agrega kullanılarak fiber donatılı geçirimli betonların optimum karışım içeriklerini ve mühendislik özellikleri Taguchi yaklaşımına göre belirlenmesi	İri agrega çapı (4.75–9.5, 9.5–12.5, 12.5–19.0) Karışım matriks tipi (mineral katkı içeriği durumları, fiber donatı içeriği ve Süper akışkanlaştırıcı katkı durumları) İnce agrega (%0, 5, 10) Agrega/bağlayıcı oranı (yüksek,orta,düşük)	Elde edilen araştırma sonuçlarına göre hafif agregalı geçirimli betonun basınç dayanımında en etkili parametre ince agrega içeriği olmuştur. Aynı şekilde eğilme dayanımı ve çekme dayanımında da ince agrega içeriği etkili bir parametredir. Ayrıca çalışmada; silis dumanı, ultra ince silis tozu ve fiber donatının uygun miktarda kullanımının hafif agraga kullanılarak üretilmiş geçirimli betonların mühendislik özelliklerini iyileştirmede önemli olduğu belirtilmiştir.

Tablo 9. Literatürde Taguchi Metodu Kullanılarak Yapılmış Çalışmaların Detaylı Açıklamaları (Devamı).

Araştırmacı-Yıl	Çalışma Konusu	Parametreler	Özet Sonuçlar
Karthik & Mohan (2021)	Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı kullanılarak Taguchi yaklaşımıyla geopolimer betonun optimum dizayn karakteristikleri araştırılması	Bağlayıcı içeriği Süper akışkanlaştırıcı dozajı (% 0.5, 1, 1.5, 2) Na_2SiO_3/NaOH oranı (1.5, 2, 2.5, 3) Molar içerik (6, 8, 10, 12)	Araştırmada sonuç olarak maksimum basınç dayanımı için optimum içerik; %45 uçucu kül, %45 yüksek fırın cürufu, %10 silis dumanı, %1,5 süper akışkanlaştırıcı, Na2SiO3/NaOH oranının 1,5 olduğu ve molaritenin 12 olduğu durumda gerçekleşmiştir.
Raj vd. (2021)	Geopolimer (GPC) beton üretiminde çeşitli parametrelerin basınç dayanımı açısından etkisinin, Taguchi metodu kullanılarak araştırılması	Normal P. Çim. İçeriği (% 0, 10, 20) NaOH malaritesi (10, 12, 14) Kür sıcaklığı (derece) (60, 80, 100) Kür süresi (saat) (12, 24, 36) Dinlenme periyodu (saat) (24, 48) Uçucu kül için alkali aktivatör solüsyon oranı (0.3, 0.35, 0.40) Alkali solüsyon oranı (2, 2.5, 3)	Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre GPC basınç dayanımında %77,44 oranla en etkili parametre çimento dozajı olmuştur. Diğer yandan optimum dizayn (en büyük basınç dayanımı) için %20 çimento dozajı, 14M NaOH, 60 C° kür sıcaklığı, 36 saat kür süresi, 48 saat dinlenme süresi, alkali solüsyon oranının %2,5 ve uçucu kül içeriğinin 0,30 olduğu durumda elde edilmiştir.
Amer vd. (2021)	Alkali ile aktifleştirilen hibrit granüle yüksek fırın cürufu (GBFS)-çimentolu betonun karakterizasyonun Taguchi metodu kullanılarak araştırılması	YFC: NPÇ (100:0, 80:20, 70:30) Na_2O (% 8, 9, 10) Solüsyon modülü (0.80, 1, 1.20) S/Bağlayıcı oranı (0.4, 0.45, 0.50) 450 kg/m³ sabit bağlayıcı içeriği	Çalışma sonuçlarına göre yüksek oranda GBFS içeren hibrit bağlayıcı işlenebilirlik açısından olumsuz bir davranış sergilemiştir. Diğer yandan alkali ile aktifleştirilen GBFS'nin tek başına bağlayıcı olarak kullanılması işlenebilirliği ve basınç dayanımını olumlu etkilemiştir. Ayrıca NPÇ oranının artması mikro ölçekli çekme çatlaklarının artışına sebep olmuştur.
Tanyıldızı (2021)	Polimer emdirilmiş betonun polipropilen fiber içeriğininin Taguchi ve Anova metodu kullanılarak mekanik özellikler açısından araştırılması	Çimento dozajı (300, 350, 400 kg/m3) Polipropilen fiber oranı (%0, %1, %2) Kür süresi (3, 7, 28)	Çalışmadan elde edilen Taguchi ve anova analizine göre ultrasonik darbe hızı deneyinin en iyi sonuçları (dinamik elastisite modülü ve beton basınç dayanımı) 28 günlük kür, %1 polipropilen fiber ve 400 kg/m³ çimento dozajında bulunmuştur.
Ramasamy vd.(2020)	Yüksek dayanımlı betonun optimum dizayn parametrelerinin Taguchi yaklaşımı ile belirlenmesi	Bağlayıcı/agrega oranı (0.32, 0.36, 0.45) Süper akışkanlaştırıcı (kg/m³) (6, 6.9, 7.1, 7.7) 3) S/bağlayıcı oranı (0.3, 0.27, 0.28, 0.22)	Çalışma sonuçlarına göre en fazla basınç dayanımı s/b oranının 0,27 olduğu, süper akışkanlaştırıcı miktarının 6 kg/m³ olduğu, bağlayıcı/agrega oranının 0,45 olduğu ve fiber oranının %1 olduğu durumda gerçekleşmiştir. Ayrıca çalışmada fiber oranının %1,5 kullanılması referans betona göre basınç dayanımını azaltmıştır.

Tablo 10. Literatürde Taguchi Metodu Kullanılarak Yapılmış Çalışmaların Detaylı Açıklamaları (Devamı).

Araştırmacı-Yıl	Çalışma Konusu	Parametreler	Özet Sonuçlar
De Side vd. (2020)	Betonun optimum mühendislik özelliklerini elde etmek için çimento yerine ikame optimum silis dumanı içeriğin Taguchi yaklaşımı kullanılarak belirlenmesi	SD (90, 120, 150 gr) Çimento (300, 480, 660 gr) Kum (1200, 1400, 1600 gr)	Çalışma sonuçlarına göre harç numunelerin basınç dayanımında en etkili parametre çimento miktarı olurken, kum ve silis dumanının etkisi birbirine yakın olarak belirlenmiştir. Ayrıca silis dumanı içeren karışımların geçirimlikleri referans harç numunesine göre yaklaşık %40 daha az bulunmuştur.
Jafari vd. (2018)	Polimer betonun mekanik özelliklerinin tahribatlı ve tahribatsız testler kullanılarak araştırılması	Epoksi reçinesi oranı (%10, 12, 14) Kaba agrega çapı (4.75-9.5, 9.5-19 mm) Deney ortam sıcaklığı (-15 °C, 25 °C, 65 °C)	Araştırmada yapılan tahribatsız test sonuçlarına göre iri agrega çapının ve polimer oranının artışı betonun boşluk yapısını azaltmıştır. Taguchi metoduna göre optimum içerik olarak polimer içeriğinin %14, agrega tane büyüklüğünü 9,5-19 mm ve test sıcaklığının –15 °C olduğu durum belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada polimer betonun mekanik özelliklerini tahmin etmek için çeşitli matematik modeller önerilmiştir.
Lee & Shin (2019)	Granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı geopolimer betonların basınç dayanımı ve çekme dayanımlarını Taguchi yaklaşımı ile birlikte regresyon analizleri yaparak tahmin edilmesi	Kür sıcaklığı YFC/bağlayıcı (0.20, 0.30, 0.50) Agrega/bağlayıcı Alkali solüsyon/bağlayıcı Na_2SiO_3/NaOH oranı NaOH konsatrasyonu	Çalışma sonuçlarına göre; H2O/Na2O molar oranı 12'den fazla olan karışımlarda slump değeri 15 cm'in üzerinde çıkarken bu oran 12'nin altına düştüğünde slump değerinde keskin düşüşler olmuştur. İşlenebilirlik açısından H2O/Na2O molar oranı etkin bir parametredir. YFC/bağlayıcı oranı artışı tüm seviyelerde rölatif olarak daha fazla dayanım özelliği göstermiştir. Basınç dayanımında en etkili parametre yaklaşık %50'lik oranla kür sıcaklığı olurken, ikinci baskın parametre yaklaşık %40'lık etkiyle YFC/bağlayıcı oranı olmuştur.
Dave vd. (2021)	Taguchi metodu kullanarak farklı ortam koşullarında kürlenmiş aktif alkali kompozit betonun, taze beton ve dayanım özellikleri için karışım tasarımı optimizasyonun yapılması	Bağlayıcı içeriği (SD: %10, YFC: %30, 35, 40) Süperakışkanlaştırıcı dozajı (%1, 1.5, 2) Na_2SiO_3/NaOH oranı (2, 2.5, 3) Molar içerik (10,12,14)	Araştırma sonuçları taze betonda işlenebilirlik açısından değerlendirildiğinde; yüksek fırın cürufu yüksek kalsiyum içeriğinden dolayı işlenebilirliği olumsuz etkilemektedir. Slump değerleri açısından en etkili parametre bağlayıcı içeriğiyken ikinci en etkili parametre süper akışkanlaştırıcı dozajı olmuştur. Yüksek oranda YFC kullanımı büzülme çatlağı oluşturulduğundan basınç dayanımı açısından olumsuz özellik taşımaktadır.
Alighardashi vd (2019)	Geçirimli betonların nano silika ve ince agrega kullanarak istenilen mühendislik özelliklerine göre optimum karışım dizaynının Taguchi metodu kullanılarak belirlenmesi	S/ç oranı (0.26, 0.35, 0.45) Agrega/çimento oranı (3, 4, 5) Nano silika oranı (çimento ağırlığının (%0, 0.3, 0.6) Çimento dozajı tüm karışımlarda 300 kg/m³ olarak alınmıştır.	Taguchi optimum tasarım sonuçlarına göre s/ç oranının 0,26 olduğu, agrega/çimento oranının 5 olduğu, nano silika içeriğinin %6 olduğu ve %20 ince agrega içeriğinin olduğu karışım optimum karışım olmuştur. Buna göre basınç dayanımında en etkili parametreler nano silika olurken ikinci en etkili parametre ince agrega olmuştur. Boşluk içeriği, geçirimlilik ve yoğunlukta en etkili parametre ince agrega bulunmuştur.
Gao vd. (2021)	Çeşitli parametrelerin çevre dostu bazalt elyaf takviyeli betonun özelliklerine etkisinin araştırılması	Atık cam (%0, 30, 60, 100) UK (%0, 20, 40, 60) Kıyılmış basalt fiber (%0, 0.1, 0.2, 0.3)	Çalışma sonuçları genel anlamda değerlendirildiğinde bazalt lifinin %0,2 olduğu durum beton özellikleri açısından optimum durum olmuştur.

Tablo 11. Literatürde Taguchi Metodu Kullanılarak Yapılmış Çalışmaların Detaylı Açıklamaları (Devamı).

Araştırmacı-Yıl	Çalışma Konusu	Parametreler	Özet Sonuçlar
Olivia & Nikraz (2012)	Uçucu kül içeren geopolimer beton karışımların optimizasyonu ve optimum karışımlardan üretilen betonun mekanik özellikleri ve dayanıklılığının Taguchi yaklaşımı kullanılarak araştırılması	Agrega içeriği (1800, 1848, 1896 kg/m³) Alkali sol. /UK oranı (0.3, 0.35, 0.40) Sodyum silikat/sodium hidroksit oranı (1.5, 2, 2.5) Kür metodu (24 saat 60 C, 12 saat 70 C ve 24 saat 75 C)	Çalışmaya göre geopolimer beton 28 günde 55 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır. Geopolimer betonlar kontrol karışımından daha yüksek eğilme dayanımı göstermiş, aynı zamanda daha az kuruma büzülmesi olmuştur. Ancak elastisite modülü değerlerinde kontrol numunesinden yaklaşık %15-30 arasında daha az değerler elde edilmiştir.
Sharfi vd., (2020)	Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılarak kendiliğinden yerleşen yüksek dayanımlı betonların ele alınan parametrelere göre optimum karışım içeriklerinin belirlenmesi	Çimento miktarı (400, 425 kg/m³) S/Ç oranı (0.35, 0.37, 0.39) Agrega oranı (0.6, 0.65, 0.70) Süp. Akş. Miktarı (1, 1.25, 1,5 kg/m³) UK (80, 100, 120 kg) Karıştırma süresi (100, 110, 120 saniye)	Çalışma sonuçlarına göre sırasıyla; s/ç oranı, çimento miktarı ve karıştırma süresi beton karışım tasarımında en önemli parametreler olmuştur.

5. Sonuçlar

İnşaat mühendisliğinde yapı malzemeleri, yapı mekaniği ve geoteknik gibi alanlarda deneysel çalışmalar oldukça yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında yapılan inşaat mühendisliği literatür araştırmasında istatistiksel tabanlı deney tasarım yöntemi olan Taguchi Metodu' nun daha çok yapı malzemesi çalışmalarında ön plana çıktığı ve yöntemin araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür. İstatistiksel deney tasarımı yöntemi olan Taguchi Metodunun uzun yıllardır farklı mühendislik disiplinlerinde kullanımı son derece yaygın olduğu, ancak inşaat mühendisliği laboratuvar çalışmalarında yöntemin kullanılabilirliğinin son zamanlarda yaygınlaşmaya başladığı görülen bir diğer sonuçtur. Yöntem sayesinde birden fazla parametrenin etkisi az sayıda deney yapılarak güvenilir doğruluk aralığında tahmin edilebilmektedir. Zamanın ve iş gücünün çok önemli olduğu ayrıca kısıtlı kaynaklara sahip olduğumuz günümüz dünyasında hızlı ve güvenilir sonuçlar elde edebilmek çok önemlidir. Beton üretiminde, özellikle atık ve geri dönüştürülmüş ürünlerin kullanılabilirliği sürdürülebilirlik açısından altı çizilmesi gereken bir husustur. Bu malzemelere örnek olarak silis dumanı, granüle yüksek fırın cürufu, uçucu kül, atık betonlardan elde edilmiş agrega vb. malzemeler gösterilebilir. Ancak bu ve benzeri malzemelerin hepsini kullanarak parametre optimizasyonu yapmak; deney sayısının çokluğundan dolayı, hayli zahmetli bir çalışma gerektirecektir. Bu sebeple istatistiksel deney tasarımı, yapılan çalışmaların süresi ve iş yükü üzerinde olumlu anlamda katkı sağlayacaktır.

Taguchi yöntemi ile deney tasarımı yapılırken bağımlı değişkene bağımsız değişkenlerin etkisi belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu bağlamda deneysel çalışmalarda yöntem tarafından tarif edilen gürültü kaynaklarının mümkün olduğunca minimize edilmesi araştırmacılarca sağlanmaya çalışılmalıdır. Örneğin çalışılan ortogonal dizi için tüm serilerde ortam koşullarının mümkün olduğunca aynı olması sağlanmalıdır. Beton numuneler üzerinde çalışılıyorsa tüm serilere eşit vibrasyon, karıştırma süresi, karışıma giren malzeme sırası gibi faktörlerde tekdüzelik sağlanmalıdır. Seriler arasında bu sürekliliğin sağlanmaması durumunun sonuçlar üzerinde çok etkili olacağı unutulmamalıdır. Çünkü bu tasarımlarda az deney ile çok sayıda parametre etkisi incelendiğinden deneysel hassasiyet bir kat daha önem kazanmaktadır. İstatistiksel deney tasarımında parametre optimizasyonun yüksek doğruluklu elde edilebilmesi için ilgili deney sonuçlarının seriyi yüksek oranda temsili için deney tekrarı bir diğer önemli husus olarak göze çarpmaktadır. Bu sebeple ilgili deney için yüksek temsil sağlanması amacıyla deney tekrarının en az üç olarak uygulanması doğru olacaktır. İlgili deney için; deney tekrarları arasında yüksek bir varyasyon katsayısı söz konusu ise; katsayıyı artıran deneysel veri ortalamadan çıkarılmalı diğer verilerle analizlere devam edilmelidir. Ancak hala yüksek varyasyon katsayısı durumu söz konusu ise deney tekrarı yapılmalıdır. Bu yüzden sonuçlar üzerinde yüksek varyasyon mutlak anlamda önemlidir. Taguchi yöntemi istatistiksel bir yöntem olup incelenen çalışmalarda yöntemi kullanan araştırmacılar parametre optimizasyonu yaparken, çoklu regresyon yöntemi uygulayarak çalışma özelinde denklemler çıkarmışlardır. Çıkarılan bu denklemlerin R2 değerleri 0,5-1,00 arasında değişmektedir. R2 değerinin düşük olduğu çalışmalar incelendiğinde; bu çalışmalarda veri setinin çok büyük olduğu daha çok literatürdeki birçok çalışmanın ortak değerlendirildiği çalışmalar olduğu görülmüştür. Ayrıca birçok parametre ve farklı bağlayıcıların bulunduğu çalışmalarda bağlayıcı matrisinin karmaşıklığından dolayı dayanımı yüksek doğruluk oranıyla tahmin eden genel bir matematik model çıkarmak zor olmaktadır.

Sonuç olarak inşaat mühendisliğinde Taguchi Metodu' nun kullanıldığı literatür çalışmalarının kapsamlı olarak araştırıldığı bu çalışmada yöntemin deneysel çalışmalarda deneme-yanılma yöntemi yerine güvenilir bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür. Yöntemi kullanarak karmaşık problemlerin deneysel olarak çözümünde parametre etkisinin yorumlanmasına ve parametrelerin optimum çözümlerinin elde edilmesinde alternatif güçlü ve güvenilir bir yol olduğu sonucuna varılmıştır.

Referanslar

Adisa Olonade, K., Fitriani, H., & Toluwalase Kola, O. (2017). Regression models for compressive strength of concrete under different curing conditions. *MATEC Web of Conferences*, *101*, 05013. https://doi.org/10.1051/MATECCONF/201710105013

Aksu, B., 2019, Kalite Geliştirmede Shainin ve Taguchi Uygulamaları, Detay Yayıncılık.

Alighardashi, A., Mehrani, M. J., Fakhravar, N., & Ramezanianpour, A. M. (2019). Material design and characterization of pervious concrete reactive barrier containing nano-silica and fine pumice aggregate. *Asian Journal of Civil Engineering*, *20*(1), 49–56. https://doi.org/10.1007/S42107-018-0087-3/TABLES/8

Amer, I., Kohail, M., El-Feky, M. S., Rashad, A., & Khalaf, M. A. (2021). Characterization of alkali-activated hybrid slag/cement concrete. *Ain Shams Engineering Journal*, *12*(1), 135–144. https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2020.08.003

Bowden, G. D., Pichler, B. J., & Maurer, A. (2019). A Design of Experiments (DoE) Approach Accelerates the Optimization of Copper-Mediated 18F-Fluorination Reactions of Arylstannanes. *Scientific Reports 2019 9:1*, *9*(1), 1–10. https://doi.org/10.1038/s41598-019-47846-6

Chithra, S., Kumar, S. R. R. S., Chinnaraju, K., & Alfin Ashmita, F. (2016). A comparative study on the compressive strength prediction models for High Performance Concrete containing nano silica and copper slag using regression analysis and Artificial Neural Networks. *Construction and Building Materials*, *114*, 528–535. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.03.214

Chong, B. W., Othman, R., Jaya, R. P., Hasan, M. R. M., Sandu, A. V., Nabiałek, M., Jeż, B., Pietrusiewicz, P., Kwiatkowski, D., Postawa, P., & Abdullah, M. M. A. B. (2021). Design of Experiment on Concrete Mechanical Properties Prediction: A Critical Review. *Materials 2021, Vol. 14, Page 1866*, *14*(8), 1866. https://doi.org/10.3390/MA14081866

Cimbala, J. M. (2014). *Taguchi Orthogonal Arrays*.

Dave, S. V., Bhogayata, A., & Arora, N. K. (2021). Mix design optimization for fresh, strength and durability properties of ambient cured alkali activated composite by Taguchi method. *Construction and Building Materials*, *284*, 122822. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122822

De Side, G. N., Kencanawati, N. N., & Hariyadi. (2020). An application of Taguchi experiment design methods on optimization of mortar mixture composition with Silica Fume as a partial substitute for cement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *413*(1), 012012. https://doi.org/10.1088/1755-1315/413/1/012012

Dejaegher, B., & Vander Heyden, Y. (2011). Experimental designs and their recent advances in set-up, data interpretation, and analytical applications. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, *56*(2), 141–158. https://doi.org/10.1016/J.JPBA.2011.04.023

Erkan, İ. H. (2013). Jet grout kolonların performansını etkileyen faktörlerin deneysel olarak araştırılması. Doktora Tezi. *Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı*.

F. M. Zain, M., M. Abd, S., F. M. Zain, M., & M. Abd, S. (2009). Multiple Regression Model for Compressive Strength Prediction of High Performance Concrete. *JApSc*, *9*(1), 155–160. https://doi.org/10.3923/JAS.2009.155.160

Gao, L., Adesina, A., & Das, S. (2021). Properties of eco-friendly basalt fibre reinforced concrete designed by Taguchi method. *Construction and Building Materials*, *302*, 124161. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124161

Hinislioğlu, S., & Bayrak, O. Ü. (2004). Optimization of early flexural strength of pavement concrete with silica fume and fly ash by the Taguchi method. *Civil Engineering and Environmental Systems*, *21*(2), 79–90. https://doi.org/10.1080/10286600410001684562

Jafari, K., Tabatabaeian, M., Joshaghani, A., & Ozbakkaloglu, T. (2018). Optimizing the mixture design of polymer concrete: An experimental investigation. *Construction and Building Materials*, *167*, 185–196. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.01.191

Jin, R., Chen, Q., & Soboyejo, A. B. O. (2018). Non-linear and mixed regression models in predicting sustainable concrete strength. *Construction and Building Materials*, *170*, 142–152. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.03.063

Karthik, S., Saravana, K., Mohan, R., & Ledesma, F. (2021). A Taguchi Approach for Optimizing Design Mixture of Geopolymer Concrete Incorporating Fly Ash, Ground Granulated Blast Furnace Slag and Silica Fume. *Crystals 2021, Vol. 11, Page 1279*, *11*(11), 1279. https://doi.org/10.3390/CRYST11111279

Kate, G. K., Nayak, C. B., & Thakare, S. B. (2021). Optimization of sustainable high-strength–high-volume fly ash concrete with and without steel fiber using Taguchi method and multi-regression analysis. *Innovative Infrastructure Solutions*, *6*(2), 1–18. https://doi.org/10.1007/S41062-021-00472-6/TABLES/24

Kocáb, D., Misák, P., & Cikrle, P. (2019). Characteristic Curve and Its Use in Determining the Compressive Strength of Concrete by the Rebound Hammer Test. *Materials 2019, Vol. 12, Page 2705*, *12*(17), 2705. https://doi.org/10.3390/MA12172705

Lee, S., & Shin, S. (2019). Prediction on Compressive and Split Tensile Strengths of GGBFS/FA Based GPC. *Materials 2019, Vol. 12, Page 4198*, *12*(24), 4198. https://doi.org/10.3390/MA12244198

Olivia, M., & Nikraz, H. (2012). Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials & Design (1980-2015)*, *36*, 191–198. https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2011.10.036

Raj, S. R., Arulraj, P. G., Anand, N., Balamurali, K., & Gokul, G. (2021). Influence of Various Design Parameters on Compressive Strength of Geopolymer Concrete: A Parametric study by Taguchi Method. *International Journal of Engineering*, *34*(10), 2351–2359. https://doi.org/10.5829/IJE.2021.34.10A.16

Ramana, N. V., Harathi, R., Narasimha Babu, S., & Vinay Babu, S. (2013). Regression Models to Evaluate Compressive Strength of Polyethylene Terephthalate (PET) Fibre Reinforced Recycle Aggregate Concrete. *International Journal of Engineering Research*, *8*(5), 11–16. www.ijerd.com

Ramasamy, N. G., Lakshmipathy, M., & Kannan Rajkumar, P. R. (2020). Optimization and Experimental investigation of High-Performance concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *912*(6), 062051. https://doi.org/10.1088/1757-899X/912/6/062051

Ross, P. J. (1988). *Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design*.

Roy, R. K. (2010). *A Primer on the Taguchi Method*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21506.84163

Sabarish, K. V., & Paul, P. (2020). Optimizing the concrete materials by L9 orthogonal array. *Materials Today: Proceedings*, *22*, 460–464. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.07.720

Sahoo, S., Das, B. B., & Mustakim, S. (2016). Acid, Alkali, and Chloride Resistance of Concrete Composed of Low-Carbonated Fly Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *29*(3), 04016242. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001759

Serencam, H., & Uçurum, M. (2019). Taguchi Deney Tasarımı Kullanılarak Uçucu Kül İle Ni (II) Gideriminde Bazı Adsorpsiyon Parametrelerinin Etkinliğinin İrdelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *8*(1), 336–344. https://doi.org/10.28948/NGUMUH.517135

Sevinç, A. H., Durgun, M. Y., & Eken, M. (2017). A Taguchi approach for investigating the engineering properties of concretes incorporating barite, colemanite, basaltic pumice and ground blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, *135*, 343–351. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.12.209

Sharifi, E., Sadjadi, S. J., Aliha, M. R. M., & Moniri, A. (2020). Optimization of high-strength self-consolidating concrete mix design using an improved Taguchi optimization method. *Construction and Building Materials*, *236*, 117547. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117547

Taguchi, G., Elsayed, E. A., & Hsiang, T. C. (1989). *Quality engineering in production systems*. McGraw-Hill College.

Taguchi, G., & Phadke, M. S. (1986). Quantity Engineering Through Design Optimization. *Proceedings of the National Electronics Conference*, *40*(pt 1), 32–39. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-1472-1_5

Tan, O. (2006). Investigation of soil parameters affecting the stability of homogeneous slopes using the Taguchi method. *Eurasian Soil Science*, *39*(11), 1248–1254. https://doi.org/10.1134/S1064229306110135

Tan, O., Gungormus, G., & Zaimoglu, A. S. (2014). Effect of Bentonite, Fly Ash and Silica Fume cement injections on uniaxial compressive strength of granular bases. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *18*(6), 1650–1654. https://doi.org/10.1007/S12205-014-0227-6/METRICS

Tanco, M., Viles, E., Ilzarbe, L., & Alvarez, M. J. (2008). Is design of experiments really used? A survey of Basque industries. *http://dx.doi.org/10.1080/09544820701749124*, *19*(5), 447–460. https://doi.org/10.1080/09544820701749124

Tang, C. W., Cheng, C. K., & Ean, L. W. (2022). Mix Design and Engineering Properties of Fiber-Reinforced Pervious Concrete Using Lightweight Aggregates. *Applied Sciences 2022, Vol. 12, Page 524*, *12*(1), 524. https://doi.org/10.3390/APP12010524

Tanyildizi, H. (2021). Investigation of mechanical properties of polymer impregnated concrete containing polypropylene fiber by taguchi and anova methods. *Revista de la construcción*, *20*(1), 52–61. https://doi.org/10.7764/RDLC.20.1.52

Thawing Durability of a Fine-Grained Soil. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, *9*(8), 1116–1120. https://doi.org/10.5281/ZENODO.1110309

Uray, E., Carbas, S., Geem, Z. W., & Kim, S. (2022). Parameters Optimization of Taguchi Method Integrated Hybrid Harmony Search Algorithm for Engineering Design Problems. *Mathematics 2022, Vol. 10, Page 327*, *10*(3), 327. https://doi.org/10.3390/MATH10030327

Uray, E., Tan, O., Carbas, S., & Erkan, I. H. (2021). Metaheuristics-based Pre-Design Guide for Cantilever Retaining Walls. *Teknik Dergi*, *32*(4). https://doi.org/10.18400/tekderg.561956

Uysal, M. (2012). Taguchi and Anova approach for optimisation of design parameters on the compressive strength of HSC. *Magazine of Concrete Research*, *64*(8), 727–735. https://doi.org/10.1680/MACR.11.00156

Uysal, M., Akyuncu, V., Tanyildizi, H., Sumer, M., & Yildirim, H. (2019). Optimization of durability properties of concrete containing fly ash using Taguchi's approach and Anova analysis. *Revista de la Construccion*, *17*(3), 364–382. https://doi.org/10.7764/RDLC.17.3.364

Warda, M. A., Khalil, H. S., Ahmad, S. S. E., & Mahdi, I. M. (2020). Optimum Sustainable Mix Proportions of High Strength Concrete by Using Taguchi Method. *Frattura ed Integrità Strutturale*, *14*(54), 211–225. https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.54.16

WOS-1. (2023). *Web of Science*. https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/24c4417b-991a-4b1a-a632-f9fe2b81c565-571adfc7/relevance/1

WOS-2. (2023). *Web of Science*. https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/5873ee75-bca9-49b0-8ace-aa049a92b8c2-5729300f/relevance/1

WOS-3. (2023). *Web of Science*. https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/42b3a50d-ee06-4c9d-8f26-8ea425b5fe75-572b595e/relevance/1

WOS-4. (2023). *Web of Science*. https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/a120a56e-59fe-4a35-ba37-86c9deb3e337-74dfdf5b/relevance/1(overlay:export/ext)

Wu, S. S., Li, B. Z., Yang, J. G., & Shukla, S. K. (2010). Predictive modeling of high-performance concrete with regression analysis. *IEEM2010 - IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 1009–1013. https://doi.org/10.1109/IEEM.2010.5674229

Yeh, I. C. (1998). Modeling of strength of high-performance concrete using artificial neural networks. *Cement and Concrete Research*, *28*(12), 1797–1808. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00165-3

Yenginar, Y. (2020). Derin karıştırma kolonlarının performansını etkileyen faktörlerin model deneylerle araştırılması. Doktora Tezi. *Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı*.

Yenginar, Y., Mobark, A. A. a. m., & Olgun, M. (2021). Investigating the construction parameters of deep mixing columns in silty soils. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, *5*(3), 464–474. https://doi.org/10.35860/IAREJ.978978

Zahraee, S. M., Memari, A. ;, Rezaei, G. ;, Afshar, J. ;, & Rohani, J. B. M. (2013). Teaching the Design of Experiment and Response Surface Methodology Using Paper Helicopter Experiment. Paper presented at 4th International Graduate conference on Engineering.

Science and Humanity. https://www.researchgate.net/publication/259589822

Zaimoğlu, A. Ş. (2015). The Effect of Randomly Distributed Polypropylene Fibers Borogypsum Fly Ash and Cement on Freezing-

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

UMAGD, (2023) 15(2), 446-462.

10.29137/umagd.1146322

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Research Article

Plant Species Selection for Vertical Garden Systems with Multi-Criteria Decision Making Techniques

Necmettin Gür[1], Özgür Kahraman*[2]

1 Çanakkale Onsekiz Mart University, Graduate School of Education, Department of Landscape Architecture, Çanakkale, Turkey
2 Çanakkale Onsekiz Mart University, Faculty of Architecture and Design, Department of Landscape Architecture, Çanakkale, Turkey

***Received**: 22/07/2022* ***Accepted**: 08/03/2023* ***Published Online:** 15/06/2023*

***Final Version**: 15/06/2023*

Abstract

Vertical gardens are alternative green spaces produced for urban open-green spaces. In this study, the importance of correct plant use is emphasized in order to ensure the sustainability of vertical garden systems, which have an important place for urban ecology. AHP-TOPSIS and susceptibility analysis methods were used to determine the correct plant species. In the study, Bornova Metro Station, located in Bornova district of İzmir province, was chosen as a sample application area. SWOT analysis was carried out in the sample area and metal-fence systems were determined as the application model, taking into account the environmental conditions, user profiles and application cost. Then, plant selection criteria were created for the AHP method, taking into account the properties of metal fence systems, Izmir climate norms and expert opinions on the subject. The plant species used in vertical gardens were determined by the literature review. By using the TOPSIS method, ten ideal species that can be used in the sample area were determined among these plants. Afterwards, sensitivity analysis was applied to evaluate the reliability of these rankings. Plants determined to start from the most ideal; Trachelospermum jasminoides, Tecomaria carpensis, Hedera helix, Solanum jasminoides, Jasminum officinale, Distictis buccinatoria, Hydrangea petiolaris, Lonicera japonica, Bougainvillea glabra, Vigna caracalla. With this study, it has been seen that multi-criteria decision-making methods can be used to decide on plant materials in the design stages of vertical garden systems.

Key Words

""AHP, SWOT analysis, TOPSIS, Sensitivity analysis, MCDM techniques, Vertical garden systems."

***Corresponding Author:** ozgurkahraman@comu.edu.tr*

1. Introductıon

Urban population growth and structuring constitute the basis of the environmental problems of today's cities in the world and in our country. The urban population is increasing in parallel with the increasing migration, especially from rural areas to cities. Migration to urban areas brings with it excessive and unplanned construction, industrialization and the use of natural resources to meet energy needs (Demirarslan and Demirarslan, 2018). This situation destroys forest areas and global climate changes, increases the urban heat island effect, increases air, water and noise pollution, increases the concrete pile of cities and reduces open-green areas (Uchida et al., 2021). Against these negativities in the cities, the importance of alternative green areas to be created in urban areas is emerging.

Vertical garden systems are alternative green spaces created in urban areas, just like roof gardens (Goel et al., 2022). Vertical garden systems are an aesthetically important design integral element with their ecological contribution to today's modern architecture and cities, dating back to the Hanging Gardens of Babylon (Kahraman et al., 2018). Inspired by the plants that live on the rocks, on the vertical surfaces of trees and on various structures in nature, the concept of vertical garden has been integrated into urban life today by the French botanist Patrick Blanc (Gür and Erduran Nemutlu, 2021). These systems can basically be defined as systems created by integrating plant material into the vertical surfaces of structures by means of various growing media or climbing wires (Bagheri Moghaddam et al., 2022).

Vertical gardens are systems with different application methods in themselves. Systems created using felt, modular panel systems, hydroponic systems and metal fence systems, also known as living walls, are the application methods of vertical gardens (Pérez-Urretarazu, 2021). Systems created using felt are systems where plant material is grown in pockets made of felt. In this system, there are cultivation pockets that contain soil on the felt ground plane and are also formed from felt. In systems created using felt, the water holding capacity of the felt material is used at the maximum level (Gür and Kahraman, 2022). Modular-panel systems are systems created in panels and with pots containing soil in modular form. In these systems, drip irrigation method is generally used. In most of the modular-panel system applications, there is an extra water collection reservoir in the system structure for the discharge and reuse of rain water and excess irrigation water (Çelik et al., 2015). Hydroponic systems do not contain soil. In these systems, plant material is grown in containers containing a water-plant nutrient solution. Hydroponic systems require more careful maintenance than other application methods (Salas et al., 2010). Metal-fence systems are traditional systems in which climbing plant species are placed directly in the soil or in pots and then wrapped in metal fencing or wire. These systems are generally used for curtaining or covering outdoor spaces, balconies, courtyards and similar spaces. In addition, the application costs of metal fence systems are also suitable compared to other application methods (Price et al., 2015).

Before applying vertical garden systems, various factors such as the suitability of the building surface, environmental and climatic factors, and user profile should be carefully evaluated. In particular, a more accurate decision-making process is created by using scientific methods based on numerical data in determining the application methods and the plant material to be used in the design, and the sustainability and functionality of the systems are placed on more solid foundations (Hosseini et al., 2021). Decision-making problems arise when there are disagreements on different issues at different stages of our lives. Decision-making is the process of choosing one or more of the most suitable among various alternatives, depending on a general purpose and based on certain criteria. In this process, Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods, which are based on pairwise comparisons of certain criteria, help the process with numerical data in order to reach the most accurate decision (Durak et al., 2021).

In the literature, multi-criteria decision-making methods are used in many different areas and in various decision-making problems. Majumdar et al. (2010) used the Analytical Hierarchy Process (AHP) method under certain criteria to evaluate the quality of cotton fibers in their study. Then, using the Order of Preference Technique according to Ideal Solution Similarity (TOPSIS) method, the best and worst alternatives among these fibers were ranked. They repeated the study on two different yarn types and stated that both types were compatible in the order of alternatives. In their study, Supçiler and Cross (2011) stated that it is very important for a company to work with the right supplier in order to be successful throughout the business process. In the study, they used the AHP and TOPSIS methods to determine the most appropriate supplier for the solution of the problem by addressing the supplier selection problem. As a result of the methods, they ranked the alternatives from the most ideal to the most non-ideal and determined A2 as the most ideal supplier. Chen et al. (2012) stated in their study that the selection of the best starting pitchers in the Chinese Professional Baseball League is a multi-criteria decision making problem. In the study, AHP and TOPSIS methods were used as methods to solve the problem of determining the best shooter. As a result of the application of the methods, they stated that Ken Ray, Jim Magrane and Orlando Roman were among the top three shooters who started the Chinese Professional Baseball League in the 2010 season. Geyik et al. (2016) mentioned the importance of choosing the right publisher in order to reach high readership at low cost. They stated that this selection stage is a multi-criteria decision making problem. In their studies, they used AHP and TOPSIS methods to solve this problem. By consulting the expert opinions on the methods; has determined delivery time, cost, brand value and competence criteria as selection criteria. Alakas et al. (2019) stated in their studies that educating patients for the most urgent treatment is as important as correct and good treatment in accidents and diseases that occur in daily life. They stated that the problem that arises in order to provide the best service in this field is the problem of multi-criteria decision making. As a method, they used AHP, TOPSIS and VIKOR methods in their studies. As a result of AHP-TOPSIS methods, the best alternative is EMS; As a result of the AHP-VIKOR methods, EMS and DORSER revealed that one of the companies is the best alternative. Tukan et al. (2020) mentioned in their study that the number of shipyards where maintenance and repair works can be done in the state of Maluka is low and that although potential areas are abundant,

many companies dock out of the state. In the study, they used AHP and TOPSIS methods to determine the right place where such shipyards can be established. As a result of the application of the methods, they stated that Dobo region is the priority region, Saumlaki region is the second priority region, and Tual region is the third priority region. When the literature is examined, it has been seen that MCDM methods can be used in different areas. Based on this, it has been concluded that MCDM methods can also be used to determine the most suitable plant material in vertical garden systems.

In this study, the problem of determining the plant material to be used to ensure the sustainability of vertical garden systems, which have an important place in the ecology and silhouette of the city, is discussed. It is aimed to list the most suitable alternatives that can be used in the application of the area determined as an example by making evaluations according to various criteria among 69 plant species alternatives that can be used in vertical garden systems. In the second part of the study, information is given about the study area, which has a potential vertical garden area, and why this area is used. At the same time, information about the methods used is given in this section. In the third part, SWOT analysis was carried out to determine the vertical garden application method for the problem that constitutes the purpose of the study. Then, the AHP method and TOPSIS method were used to determine the 10 most suitable plants among the alternatives. At the end of the data collection, the sensitivity analysis of the cases created by multiplying the criteria obtained in the AHP method with different coefficients in the TOPSIS method was performed. In the last part, the results obtained in the study were evaluated and various suggestions were made.

2. Material and Method

2.1 Material

The main material of this study is some plant species suitable for use in vertical garden systems. These plant species were determined as a result of the literature review including master's and doctoral theses, articles, symposium and congress papers written on vertical garden systems and stated to be used in vertical garden systems (Table 1).

Table 1. Some Plant Species Used in Vertical Garden Systems (Aygencel, 2011; Örnek, 2011; Timur and Karaca, 2013; Üçok, 2014; Bates, 2017; Phonpo and Saetiew, 2017; Kırıt, 2018; Karakoç, 2019; Chaipong, 2020)

Plant Species	**Family**
Aechmea fasciata Linn. Baker	*Bromeliaceae*
Aeschynanthus radicans Jack	*Gesneriaceae*
Alocasia sanderiana Bull.	*Araceae*
Aloe ciliaris Haw.	*Asphodelaceae*
Ampelopsis aconitifolia Bunge	*Bignoniaceae*
Anthurium crystallinum Linden & Andre.	*Araceae*
Asplenium nidus L.	*Aspleniaceae*
Asplenium adiantum- nigrum L.	*Aspleniaceae*
Asplenium thunbergi Belangeri	*Aspleniaceae*
Berberis thunbergii var. atropurpurea nana Chenault	*Berberidaceae*
Bougainvillea glabra Choisy	*Nyctaginaceae*
Caladium lindenii Vent.	*Araceae*
Calathea makoyana Nichols.	*Marantaceae*
Campsis radicans (L.) Bureau	*Bignoniaceae*
Cardinal climber (Ipomoea quamoclit L.*)*	*Convolvulaceae*

Table 1 (Continued). Some plant species used in vertical garden systems

Plant Species	Family
Cardiospermum halicacabum Linn.	*Sapindaceae*
Carex morrowii Boott.	*Cyperaceae*
Carex oshimensis Nakai	*Cyperaceae*
Carex testacea Sol. ex Boott	*Cyperaceae*
Cercestis mirabilis Bogner.	*Araceae*
Chlorophytum bichetii Backer.	*Asparagaceae*
Chlorophytum comosum L.	*Asparagaceae*
Cineraria maritima Linn.	*Asteraceae*
Cissus antarctica Vent.	*Vitaceae*
Clytostoma callistegioides Cham.	*Bignoniaceae*
Cuphea hyssopifolia Kunth.	*Lythraceae*
Dianella tasmanica var. variegata C. Pynaert	*Asphodelaceae*
Distictis buccinatoria A. H. Gentry	*Bignoniaceae*
Dracaena surculosa Lindl.	*Asparagaceae*
Echinodorus cordifolius (L.) Griseb.	*Alismataceae*
Euonymus japonicus Thunb. cv. 'Microphyllus' H.Jaeger	*Celastraceae*
Festuca glauca Vill.	*Poaceae*
Fittonia albivenis (Lindl. ex Veitch) Brummit	*Acanthaceae*
Gelsemium sempervirens L.	*Gelsemiaceae*
Geogenanthus undatus C. Koch & Linden.	*Commelinaceae*
Gladiolus italicus Mill.	*Iridaceae*
Hedera helix L.	*Araliaceae*
Holcus mollis L.	*Poaceae*
Hydrangea petiolaris Siebold & Zucc.	*Hydrangeaceae*
Isolepis cernua (Vahl) Roem. & Schult.	*Cyperaceae*
Jasminum officinale L.	*Oleaceae*
Lathyrus odoratus L.	*Fabaceae*
Liriope muscari (Decne.) L. H. Bailey	*Liliaceae*
Liriope spicata (Thunb.) Lour.	*Liliaceae*
Lonicera japonica Thunb.	*Caprifoliaceae*
Monstera karstenia num Hort.	*Araceae*
Nandina domestica Thunb.	*Berberidaceae*
Neoregelia carolinae (Beer) L.B. Sm.	*Bromeliaceae*

Table 1 (Continued). Some Plant Species Used in Vertical Garden Systems

Plant Species	Family
Nephrolepis exaltata (L.) Schott	*Nephrolepidaceae*
Ophiopogon jaburan (Kunth) Lodd.	*Asparagaceae*
Ophiopogon japonicus (L. f.) Ker Gawl.	*Asparagaceae*
Ophiopogon planiscapus Nakai	*Asparagaceae*
Pellionia repens (Lour.) Merr.	*Urticaceae*
Peperomia caperata Yunck.	*Piperaceae*
Peperomia obtusifolia (L.) A. Dietr.	*Piperaceae*
Philodendron erubescens K. Koch & Augustin.	*Araceae*
Pilea cadierei Gagnep.	*Urticaceae*
Pittosporum tobira var. nana (Thunb.) W.T. Aiton	*Pittosporaceae*
Plectranthus scutellarioides (L.) R.Br	*Lamiaceae*
Polypodium vulgare L.	*Polypodiaceae*
Scindapsus pictus Hassk.	*Araceae*
Scirpus cernuus Vahl.	*Cyperaceae*
Solanum jasminoides Paxt.	*Solanaceae*
Syngonium podophyllum Schott	*Araceae*
Tecomaria capensis Thunb.	*Bignoniaceae*
Thunbergia alata Bojer ex Sims	*Acanthaceae*
Thymus vulgaris L.	*Lamiaceae*
Trachelospermum jasminoides Lindl.	*Apocynaceae*
Vigna caracalla L. Verdc.	*Fabaceae*

The study was carried out at Bornova Metro Station, where 38º27'30.43" north latitude and 27º12'44.74" east longitude coincide (Google Earth Pro, 2021). The metro station is located in the Bornova district of İzmir province and is on the metro line of İzmir Metro AŞ, which is affiliated to the metropolitan municipality. Its height above sea level is 24 m. The study area is very close to Ege University on Ankara Street and also shares a common area with municipal buses and bus stops (Figure 1). Bornova district, where the station is located, is the 3rd district with the highest population in İzmir province and the district population is 445232 people (Tunç, 2021). The metro station and its surroundings have been chosen as a study area because it has a dense human and vehicle circulation, appeals to very different user profiles, and this area is limited in terms of green space, and contains a lot of potential areas for vertical gardening.



Figure 1. Study Area

2.2. Method

SWOT analysis was used to determine the vertical garden application method, which was determined to be used in the study and which could be applied in the sample area with various challenging environmental factors. Will be able to list the alternatives and reveal the difference during the determination of plant materials to be used in vertical garden design by using the application method and the constraints of the climate data determined after the SWOT analysis; AHP and TOPSIS methods including mathematical solutions were used. In addition, different scenarios were created with sensitivity analysis and plant alternatives were analyzed. The process followed in determining the plant material alternatives to be used in the vertical garden system is shown in Figure 2.

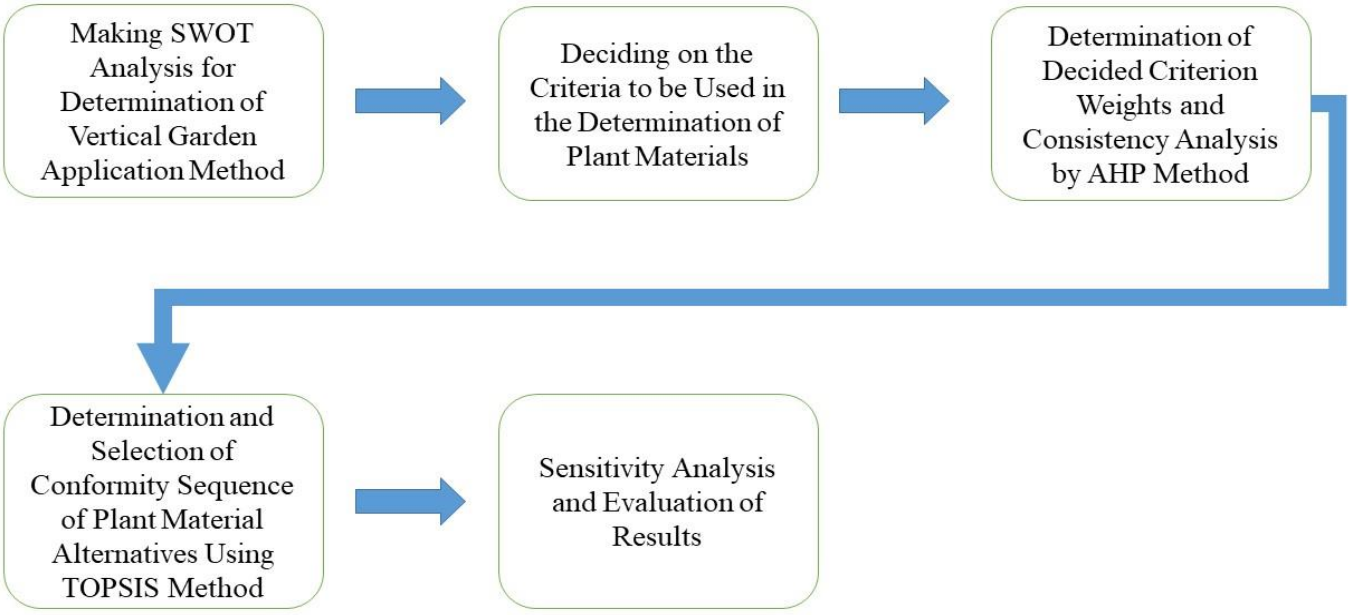


Figure 2. The Process of Determining The Plant Material

2.2.1. SWOT analysis

SWOT analysis is a method that enables the evaluation of strengths, weaknesses, threats and other variable factors that affect a particular issue. It is based on a systematic and accurate analysis of the subject in a broad framework (Helms & Nixon, 2010). This method can be used to determine the positive and negative variables in a certain area or environment, to overcome the difficulties in the focused target, to understand the problems encountered in the direction of the target and to guide the selection stages (Kumar et al., 2020).

2.2.2. AHP method

The AHP method is one of the multi-criteria decision-making methods (Eren and Gür, 2017). Developed by Thomas L. Saaty, this method is a mathematical model that facilitates making the necessary decisions during the selection stages (Hoque & Rohatgi, 2022). Developed by Thomas L. Saaty, this method is a mathematical model that facilitates making the necessary decisions during the selection stages (Hoque & Rohatgi, 2022). AHP consists of 5 steps (Hopfe et al., 2013; Xu, et al., 2022).

- Step 1: Determining the definition of the problem and creating the structure of the problem by the decision makers: In this step, the problem to be decided is handled, the criteria that are effective on the problem and in the decision-making process are determined. After the criteria are determined, a hierarchical structure is created.
- Step 2: Creating the pairwise comparison matrix: After the criteria are determined, pairwise comparison matrices are created and evaluated against each other. The structure of the pairwise comparison matrix is shown in Equation 1.

$$A = [a_{ij}] \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

While Saaty's 1-9 scale is used in this matrix structure, each criterion is evaluated according to another criterion. Table 2 shows the scale used during the assessment. This scale is used to indicate the dominance or importance of criteria in the comparison matrix.

Table 2. Saaty's Scale of 1-9 (Fawad et al., 2022).

Importance level	Definition	Explanation
1	Equally Important	Both factors are equally important.
3	Moderately Important	One factor is slightly more important than the other.
5	Strongly Important	One factor is strongly more important than the other.
7	Very Strongly Important	One factor is very strongly more important than the other.
9	Absolutely Important	One factor is absolutely strongly more important than the other.
2, 4, 6, 8	Intermediate Values	It is used when there are small differences between two factors.
Mutual values	If a value x is assigned when comparing i, j; The value to be assigned when comparing with i should be 1/x.	

The “i” and “j” values indicated in Table 2 represent the criteria. The “x” value indicates the superiority value given on a scale of 1-9 among the criteria. When the two criteria are compared, the "x" superiority value given is in a symmetrical structure and the division value of the 1/x part is written (Aydın et al., 2009).

- Step 3: Normalizing the pairwise comparison matrix: After evaluating the criteria, these values are normalized and the normalized matrix (a'_{ij}) is obtained. Equation 2 is used to obtain the normalized matrix.

$i = 1,2,3, \dots, n$ ve $j = 1,2,3, \dots, n;$

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} a_{ij}} \quad (2)$$

According to Equation 2, the sum of the values of each column is found separately. Normalization is done by dividing the value in each column by the total value of the column it belongs to.

- Step 4: Determining the eigenvectors of the criteria: At this stage, the weights (w_i) of the criteria are calculated by averaging the row sums of the normalized matrices. This step is done with the help of Equation 3.

$i = 1,2,3, \dots, n\ ; j = 1,2,3, \dots, n;$

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} a'_{ij}}{n} \quad (3)$$

According to Equation 3, the value of each row is summed separately and divided by the number of criteria to find the weight of the criteria. The value "n" in the equation is equal to the number of criteria.

- Step 5: Performing the consistency analysis: Finally, the consistency ratio is calculated, which shows that the assessments are correct. It is desirable that this ratio be less than 0.1 (Malul & Bar-El, 2009). As a result of the analysis, a ratio greater than 0.1 indicates that there is inconsistency in the decision maker's criterion judgments.

2.2.3. TOPSIS method

TOPSIS method is a multi-criteria decision making method developed by Ching-Lai Hwang and Kwangsun Yoon in 1981. Attributes, goals and criteria are the basic principles of the method (Wang et al., 2022). The TOPSIS method consists of 6 different stages (Mao et al., 2018; Chakraborty, 2022).

3- As a result of the application of the AHP method, the selection criteria were determined, a hierarchical structure was created and the criteria weights were determined. TOPSIS method is a multi-criteria decision making method developed by Ching-Lai Hwang and Kwangsun Yoon in 1981. Attributes, goals and criteria are the basic principles of the method (Wang et al., 2022). The TOPSIS method consists of 6 different stages (Mao et al., 2018; Chakraborty, 2022).

- Step 1: Creating the decision matrix: The evaluation in the decision matrix is evaluated using certain score ranges. While preparing the decision matrix structure, the score ranges determined are scored according to each criterion, just like in the AHP method. The higher the importance, the higher the point value. An example of a decision matrix is shown in Table 3.

Table 3. Example of Decision Matrix (Demireli, 2010:104).

Alternatives	**Characteristics of Alternatives by Criteria**			
	k_1	k_2	k_3	k_n
a_1	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{1n}
a_2	k_{21}	k_{22}	k_{32}	k_{2n}
a_3	k_{31}	k_{32}	k_{33}	k_{3n}
…	…	…	…	…
a_n	k_{n1}	k_{n2}	k_{n3}	k_{nn}

Table 3 (a_1, ..., a_n) refers to the alternatives listed one after the other. In addition, the expressions shown as (k_1, ..., k_n) express the evaluation criteria. Again, the values expressed as (k_{11}, ..., k_{nn}) in Table 3 are the evaluation scores of the alternatives' criteria characteristics.

- Step 2: Normalization of the decision matrix: After the decision matrix structure, the standard decision matrix is created in this step. Normalization is performed on the standard decision matrix. Equation 4 is used for this operation.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} a_{ij}^2}}, \quad i = 1,2,\dots.m\,; j = 1,2\,\dots..n \tag{4}$$

According to Equation 4, the square root of the sum of the squares of the scores of the criteria in the decision matrix is taken, and the normalization of the matrix is performed.

- Step 3: Creating a weighted standard decision matrix: The standard decision matrix is converted to a weighted standard decision matrix. At this stage, the criteria weight values (w_{ij}) determined in the AHP method are multiplied with the values in the column of the standard decision matrix. With the realization of this process, a new matrix structure (v_{ij}) is formed.
- Step 4: Determination of ideal points: Negative ideal (A-) and positive ideal solution (A*) points are created using the weighted standard decision matrix structure. Equation 5 and Equation 6 are used for this operation.

$$A^* = \left\{\left(\max i\ v_{ij}\,\middle|j \in J\right), \left(\min i\ v_{ij}\,\middle|j \in J^{\iota}\right)\right\}, A^* = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\} \tag{5}$$

$$A^- = \left\{\left(\min i\ v_{ij}\,\middle|j \in J\right), \left(\max i\ v_{ij}\,\middle|j \in J^{\iota}\right)\right\}, A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \tag{6}$$

J refers to the benefit (maximization) and J^- loss (minimization) values in the equations.

- Step 5: Calculating the maximum distance to the ideal point: In this step, the maximum distance to the ideal point is calculated using Equation 7 and Equation 8.

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(v_{ij} - v_j^*\right)} \tag{7}$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(v_{ij} - v_j^-\right)} \tag{8}$$

- Step 6: Calculating the distance to the ideal point: In this step, which is the last step of the TOPSIS method, the relative proximity to the ideal solution is calculated and alternative plants are ranked. Equation 9 is used for this step.

$$C_i^* = \frac{s_i^-}{s_i^- + s_i^*}, \quad 0 \leq C_i^* \leq 1 \tag{9}$$

This value should be between 0-1 as stated in Equation 9. 0 means the absolute closeness of the decision point to the negative solution, and 1 represents the absolute closeness of the decision point to the positive solution.

2.2.4. Sensitivity analysis

Sensitivity analysis expresses how well the alternatives perform on each criterion. This method shows how the effects of changing the criteria one by one on the alternatives will be reflected in the result. Thus, it is seen how sensitive the ranking of alternatives is (Mathur & VanderWeele, 2019).

3. Results

In the first stage of the study, Bornova Metro Station, which is the study area, was examined and observed on site in order to make SWOT analysis. Afterwards, SWOT analysis was conducted to determine the vertical garden application method. The results of the SWOT analysis are shown in Table 4.

Table 4. SWOT Analysis for Potential Vertical Garden Application at Bornova Metro Station

SWOT Analysis	
Strengths	**Weaknesses**
-It is a public space. -It is an area with heavy pedestrian use. -Potential floors are available for vertical landscape applications due to the intensive use of reinforced concrete.	-It has intensive human use because it is a subway area. -There is heavy traffic around the area. -The area is located under the Bornova Viaduct.
Opportunities	**Threats**
-The area has 240 m^2 of potential vertical garden area. -Spatial air quality can be increased with vertical garden applications. -Noise pollution caused by subway line and heavy traffic can be reduced.	-Most of the potential surfaces intersect with rest areas reserved for metro passengers. -As the potential surfaces are in open areas, they intersect with the smoking areas of waiting passengers.

When the strong features of the field are evaluated; the fact that it is a public area and has extensive pedestrian use provides this area with important features in terms of gaining green space on vertical systems. In addition, having a dense reinforced concrete surface as a vertical plane means that it has a lot of potential for the application of vertical garden systems. Considering the weaknesses of the field; The fact that it is used extensively by people means that it weakens the area as well as gives it strong features. Thus, it cannot be ignored that possible vertical garden applications will be exposed to too many human use every other day. At this point, it shows how important it is to really prioritize the sustainability of vertical gardens to be implemented. The heavy traffic in the region causes the metro area to be exposed to high levels of dust and polluted air. In addition, the fact that the metro area is located under the Bornova Viaduct causes the hot air here to circulate between the reinforced concrete structures. When the opportunities of the field are evaluated; having a potential area of 240 m^2 means that a large-scale area, just like on the horizontal plane, is transformed into green areas with these systems. Dust and polluted air caused by heavy traffic can be absorbed by plants in vertical garden systems and spatial air quality can be increased. Thanks to the insulation properties of vertical garden systems (Ekren, 2017), traffic and human-induced noise in the area can be isolated to a certain extent. When the threats of the area are evaluated; the fact that most of the potential areas are in the areas where metro users are waiting and smoking means that they will be used by user profiles of different socio-cultural and socio-economic structures. Therefore, the sustainability of vertical gardening practices may be threatened by Vandalism. The fact that the implementation cost of vertical garden systems is relatively higher than horizontal planes (Ekren, 2017) reveals that Vandalism-induced damages cause much more financial loss during the repair phase. According to the SWOT analysis, the metal fence system, which is considered to be sustainable, durable, cheap and less damaged due to its use by people from different socio-cultural structures, high mobility, shielding and ease of application, was chosen as the application method for the potential area. Metal fence systems are systems in which plants are surrounded by metal fences from soil or pots. For this reason, the plant material to be used in metal fence systems should be ivy and climbing species (Feng and Hewage, 2014). When the climate norms of İzmir province are evaluated; It is seen that the average of the winter months is 9.8 ºC. Considering this temperature average, it is not important that the plant materials that are thought to be used in vertical garden systems do not have high tolerance to temperatures below 0 and frost. However, it is important that the plants that are thought to be used in vertical garden systems have a high tolerance to hot weather, since the average temperature of the province is high, such as 21.21 ºC, except for the winter months. The climate norms of İzmir province are shown in Table 5.

Table 5. Izmir Climate Norms (URL-1, 2022).

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Annual
Average Temperature (ºC)	8.7	9.5	11.6	15.8	20.7	25.3	27.8	27.5	23.6	18.8	14.2	10.4	17.8
Average Highest Temperature (ºC)	12.3	13.5	16.2	20.8	26	30.7	33.1	32.9	29.1	23.9	18.5	14	22.6
Average Lowest Temperature (ºC)	5.7	6.1	7.6	11.1	15.4	19.8	22.4	22.3	18.6	14.5	10.6	7.4	13.5
Average Sunbathing Time (Hours)	4.2	5.1	6.4	7.9	9.8	11.5	12.2	11.9	10.1	7.5	5.5	4.1	96.2
Average Rainy Days	12.7	10.8	9.2	7.9	5.3	2.2	0.5	0.5	2	5.4	8.8	12.8	78.1
Average Monthly Total Precipitation (mm)	136.1	102.3	75.6	46	31.3	11.6	4.1	5.7	15.8	44.6	93.7	144.3	711.1
Highest Temperature (ºC)	22.4	27	30.5	32.5	37.6	41.3	42.6	43	40.1	36	30.3	25.2	43
Lowest Temperature (ºC)	-8.2	-5.2	-3.8	0.6	4.3	9.5	15.4	11.5	10	3.5	2.9	-4.7	-8.2
Total Daily Peak Precipitation 29.06.2006 - 145.3 mm						Daily Fastest Wind 29.03.1970 - 127.1 km/h					Highest Profit 31.01.1945 - 32 cm		

Metal-fence systems determined as vertical garden method by SWOT analysis and selection criteria for the 1st step of AHP method according to İzmir climate norms were determined. In determining the criteria, the opinions of four landscape architects aged between 35-50 who are experienced in vertical garden systems and their applications and an agricultural engineer experienced in vertical agriculture were taken. As a result, for the AHP method; "Climbing plant species", "Dust and air pollution resistance", "Leafy structure" and "Heat resistance" criteria were determined. The hierarchical structure of the determined criteria has been established and the hierarchical structure is indicated in Figure 3.

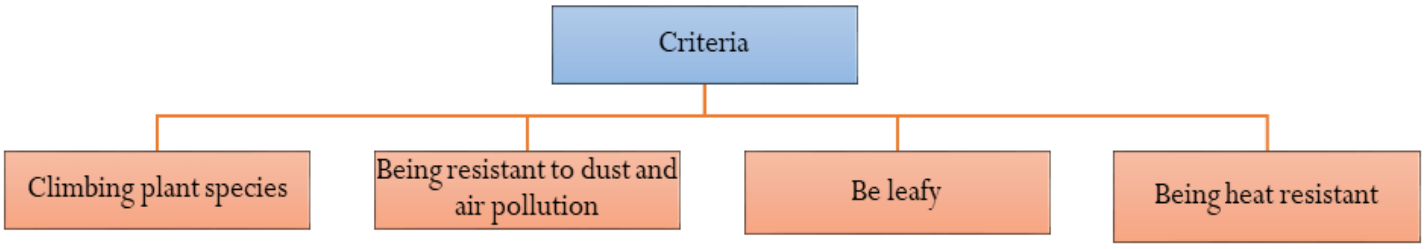


Figure 3. Hierarchical Structure of Criteria

After the criteria were determined and the hierarchical structure was created, the second step of the method was passed and the pairwise comparison matrix was created. In the dual decision matrix, the experts whose opinions were taken in determining the criteria were also asked to fill in this matrix structure. As a result, by taking the geometric mean of all the data, a pairwise comparison matrix was created according to Equation 1. The pairwise comparison matrix is indicated in Table 6.

Table 6. Pairwise Comparison Matrix

Criteria	A	B	C	D
A	1.00	9.00	5.00	3.00
B	0.11	1.00	0.25	0.33
C	0.20	4.00	1.00	0.50
D	0.33	3.00	2.00	1.00
Total	1.64	17.0	8.25	4.83

Climber plants species (A), Leafy (B), Be resistant to dust and air pollution (C), Be Heat-Resistant (D)

After the second step was completed, the values in Table 6 were normalized by proceeding to the third step of the AHP method. Normalization operations were performed according to Equation 2. The normalized pairwise comparison matrix is shown in Table 7.

Table 7. Normalized Matrix

Normalization	A	B	C	D
A	0.609756098	0.529411765	0.606060606	0.620689655
B	0.067073171	0.058823529	0.030303030	0.068965517
C	0.121951220	0.235294118	0.121212121	0.103448276
D	0.201219512	0.176470588	0.242424242	0.206896552

Climber plants species (A), Leafy (B), Be resistant to dust and air pollution (C), Be Heat-Resistant (D)

After the normalized matrix was created, the eigenvector weights of the criteria were calculated in the 4th step. Equation 3 is used to calculate the eigenvector weights of the criteria. The eigenvector weights of the criteria are given in Table 8.

Table 8. Eigenvector Weights of Criteria

Criteria	Criterion weights
Climber plants species	0.591479531
Leafy	0.056291312
Be resistant to dust and air pollution	0.145476434
Be Heat-Resistant	0.206752724

After the criterion weights were calculated, the last step of the method was passed and consistency analysis was performed. As a result of the analysis, it was determined that the consistency ratio was less than 0.1 (0.037113117), that is, the selection criteria were reasonable. After the selection criteria were weighted and consistency analysis was performed, the TOPSIS method was used.

In the decision matrix (Table 9) created in the 1st step of the TOPSIS method, the alternatives were scored between 1-10 on the basis of criteria. The reason for choosing this scoring range is to eliminate the processing overhead. Due to the large number of plants, Table 9, Table 10 and Table 11 are shown in abbreviated form. In other words, these three tables did not show all 69 plants as in Table 1. The structure of Table 9 is set as in Table 3.

Table 9. Decision Matrix Structure

Alternatives Plants	Criteria			
	Climber plants species	Leafy	Be resistant to dust and air pollution	Be Heat-Resistant
Aechmea fasciata Linn. Baker	1	2	3	8
Aeschynanthus radicans Jack	8	8	5	8
Alocasia sanderiana Bull.	1	1	2	8
Aloe ciliaris Haw.	5	1	5	7
Ampelopsis aconitifolia Bunge	9	5	4	6
Anthurium crystallinum Linden & Andre.	2	2	3	8
Asplenium nidus L.	1	5	4	7
Asplenium adiantum- nigrum L.	1	5	3	7
Asplenium thunbergi Belangeri	1	7	3	7
Berberis thunbergii var. atropurpurea nana Chenault	1	8	8	7

In the TOPSIS method, after the decision matrix structure, the standard decision matrix was created in the second step. Equation 4 was used while creating the standard decision matrix structure. The standard decision matrix structure is specified in Table 10.

Table 10. Standard Decision Matrix

	Climber plants species	Leafy	Be resistant to dust and air pollution	Be Heat-Resistant
Aechmea fasciata Linn. Baker	0.022021945	0.028733141	0.058565161	0.096030735
Aeschynanthus radicans Jack	0.176175558	0.097611798	0.090328672	0.096030735
Alocasia sanderiana Bull.	0.022021945	0.012201475	0.024751793	0.086894945
Aloe ciliaris Haw.	0.110109724	0.016143738	0.084455122	0.071162322
Ampelopsis aconitifolia Bunge	0.198197503	0.080718690	0.074023321	0.068554642
Anthurium crystallinum Linden & Andre.	0.044043890	0.023043371	0.053571429	0.091406189
Asplenium nidus L.	0.010009012	0.057608427	0.071428571	0.071162322
Asplenium adiantum-nigrum L.	0.010870850	0.061007374	0.047012936	0.066633434
Asplenium thunbergi Belangeri	0.022021945	0.070246294	0.037127689	0.066633434
Berberis thunbergii var. atropurpurea nana Chenault	0.022021945	0.068868343	0.099007171	0.066633434

In the third step, the standard decision matrix is transformed into a weighted standard decision matrix. For this, the weights obtained from the AHP method were used. Table 11 shows the weighted decision matrix.

Table 11. Weighted Normalized Decision Matrix

Weighted Normalized Decision Matrix				
Weights	0.591479531 **(A)**	0.056291312 **(B)**	0.145476434 **(C)**	0.206752724 **(D)**
Aechmea fasciata Linn. Baker	1.302552958	0.161742621	0.851985074	1.985461600
Aeschynanthus radicans Jack	10.42042366	0.549469618	1.314069305	1.985461600
Alocasia sanderiana Bull.	1.302552958	0.068683702	0.360080256	1.796576659
Aloe ciliaris Haw.	6.512764788	0.090875219	1.228622997	1.471300391
Ampelopsis aconitifolia Bunge	11.72297662	0.454376096	1.076864877	1.417385892
Anthurium crystallinum Linden & Andre.	2.605105915	0.129714159	0.779338039	1.889847856
Asplenium nidus L.	0.592012582	0.324285397	1.039117386	1.471300391
Asplenium adiantum- nigrum L.	0.642988506	0.343418511	0.683927422	1.377664394
Asplenium thunbergi Belangeri	1.302552958	0.395425604	0.540120383	1.377664394
Berberis thunbergii var. atropurpurea nana Chenault	1.302552958	0.387668939	1.440321022	1.377664394

Climber plants species (A), Leafy (B), Be resistant to dust and air pollution (C), Be Heat-Resistant (D)

Using the structure in Table 11, negative ideal and positive ideal solution points were created. In order to create the ideal points, the highest and lowest values in the normalized matrix of the evaluation factor in the decision matrix were determined. Equation 7 and Equation 8 were used while determining these values. These points are shown in Table 12.

Table 12. Ideal and Negative Ideal Solution Points

	Creating Ideal and Negative Ideal Solutions			
Ideal Solution	13.02552958	0.833670102	2.529110236	2.362309820
Negative Ideal Solution	0.543053297	0.068683702	0.360080256	1.261114621

The plants were ranked by calculating their relative closeness to the ideal solution, which is the last step of the TOPSIS method (Table 13). Equation 9 was used in this calculation process. The plants shown in Table 13 show, respectively, the 10 most ideal plants to be used for the potential area among the alternatives.

Table 13. Ranking of Plants.

Relative Proximity to The Ideal Solution	
Trachelospermum jasminoides Lindl.	0.999371670
Tecomaria capensis Thunb.	0.979890177
Hedera helix L.	0.958574796
Solanum jasminoides Paxt.	0.955526207
Jasminum officinale L.	0.939493990
Distictis buccinatoria A. H. Gentry	0.936984270
Hydrangea petiolaris Siebold & Zucc.	0.920083866
Lonicera japonica Thunb.	0.913415027
Bougainvillea glabra Choisy	0.910090244
Vigna caracalla L. Verdc.	0.888484376

After completing the steps of the TOPSIS method, the last stage of the study method was started with the determination of the most suitable 10 plant species for the vertical garden system to be applied in the sample area among the plant species alternatives. At this stage, sensitivity analysis was carried out. The method used by Hamurcu and Eren (2020) in their studies was used in the sensitivity analysis. Since the ranking of the alternatives in the TOPSIS method depends on the criterion weight coefficients, it has been analyzed whether the proportional changes in the criterion weights will cause a change in the ranking of the most ideal plant species. At this stage, 13 different scenarios were created. The first 12 scenarios; By using three different increase rates, 0.25, 0.50, 0.75, the criteria coefficients were changed according to these rates in each scenario. In the 13th scenario, the analysis was made considering that the criteria weights were not taken into account, that is, all criteria weights were 1 in the TOPSIS method. The 13 sensitivity analysis scenarios using the new criterion weights are given in Table 14.

Table 14. Sensitivity Analysis Scenarios

Scenarios	Criterion Weights	Coefficient of Change	New Criterion Weight
Scenario 1	0.591479531=A	0.591479531 x 1,25	0.73934941375
Scenario 2	0.056291312=B	0.056291312 x 1,25	0.07036414000
Scenario 3	0.145476434=C	0.145476434 x 1,25	0.18184554250
Scenario 4	0.206752724=D	0.206752724 x 1,25	0.25844090500
Scenario 5	0.591479531=A	0.591479531 x 1,50	0.88721929650
Scenario 6	0.056291312=B	0.056291312 x 1,50	0.08443696800
Scenario 7	0.145476434=C	0.145476434 x 1,50	0.21821465100
Scenario 8	0.206752724=D	0.206752724 x 1,50	0.31012908600
Scenario 9	0.591479531=A	0.591479531 x 1,75	1.03508917925
Scenario 10	0.056291312=B	0.056291312 x 1,75	0.09850979600
Scenario 11	0.145476434=C	0.145476434 x 1,75	0.25458375950
Scenario 12	0.206752724=D	0.206752724 x 1,75	0.36181726700
Scenario 13	0.591479531=A	Condition of All Criteria with Equal Coefficients	1
	0.056291312=B		1
	0.145476434=C		1
	0.206752724=D		1

As indicated in Table 14, the weighting coefficients of the criteria were increased by 0.25, 0.50 and 0.75, respectively, at each stage of the sensitivity analysis. In each scenario, only one criterion was chosen, where the weight coefficient increased with the specified values. In addition, in the 13th scenario, while the weighted decision matrix was created in the TOPSIS method, 1 was written for all criterion coefficients. As a result of the sensitivity analysis, the change in the rankings of the alternatives in the 13 scenarios is shown in Figure 4.

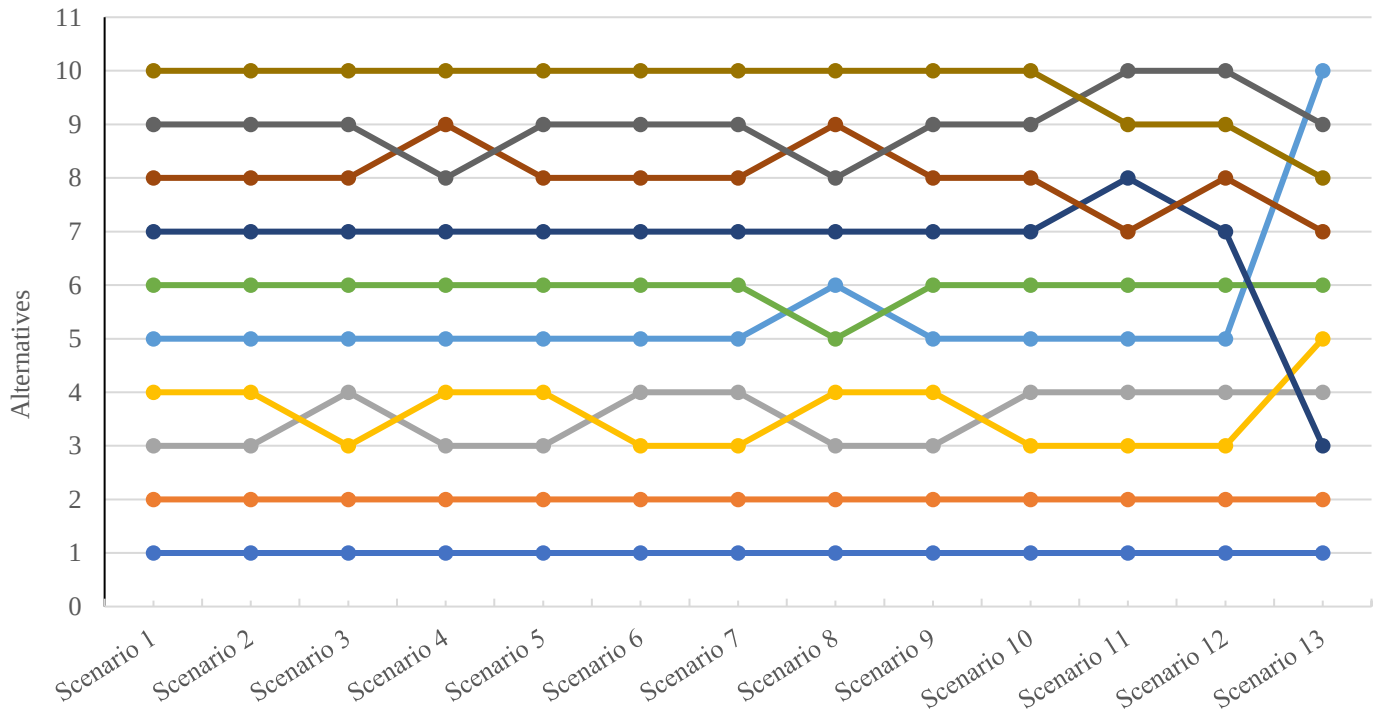


Figure 4. Changes in The Rankings of Alternatives Over 13 Scenarios

The results showed that in 12 of 13 scenarios, giving different weights to the criteria did not cause a significant change in the rankings of the alternatives. In the 13th scenario, the criteria weights being equal created changes in the ranking. Those who scored high in the decision matrix took their places in the changing order because they were multiplied by the ineffective element in the coefficients in this scenario. However, in scenario 13, the distances between preference rankings have increased and become more pronounced, thus affecting the results of the integrated use of AHP-TOPSIS. However, in the other 12 scenarios, there was satisfactory rank affinity and

the proposed AHP-TOPSIS alternative rankings turned out to be reliable. Similar to this study, Gür (2021) used AHP and TOPSIS methods in an integrated way to determine the plant species that grow naturally in the Izmir region and can be used in vertical garden systems. In his study, he quantitatively determined that *Lavandula stoechas* L. plant is the most suitable species. Later, this plant proved the accuracy of the result obtained by testing its ability to grow in vertical garden systems. In this study, alternative plants were determined for a specific design area among the plants currently used in vertical garden systems. Therefore, this study is different from other similar studies; it differs in terms of choosing plants for design, using SWOT analysis as well as AHP and TOPSIS methods.

4. Conclusion

Unemployment has increased in rural areas as manpower has been replaced by industrialization and increased mechanization. Indirectly, in this case, people living in rural areas have started to migrate to cities in order to achieve a better income and quality of life. The desire of the increasing urban population to use natural resources, construction and development plans due to migration causes great damage to urban open-green areas. Sustainability and protection of open-green areas in urban areas is very important. It has gained importance to create alternative areas for the protection of open-green areas. Vertical garden systems are one of the alternative open green spaces created in urban areas. The correct use of plants in vertical garden systems is very important for the continuity and protection of urban ecology as well as providing aesthetic contributions. In the potential application area of Bornova Metro Station, which was chosen as a sample for the study, SWOT analysis was used to determine the vertical garden application method, taking into account the space-user relations and environmental conditions. As a result of the analyses made, it was determined that the most ideal application method for the potential area was the metal-fence system. As a result of the literature review, some plant species used in vertical garden systems were determined and listed. The vertical garden application method and the 10 most ideal plant species to be used in accordance with environmental conditions were determined using AHP and TOPSIS methods from 69 plant species. Starting from the ideal 10 plants determined as a result of the methods; *Trachelospermum jasminoides* Lindl. *Tecomaria capensis* Thunb., *Hedera helix* L., *Solanum jasminoides* Paxt., *Jasminum officinale* L., *Distictis buccinatoria* AH Gentry, *Hydrangea petiolaris* Siebold & Zucc., *Lonicera petiolaris* Siebold & Zucc. The plant species farthest from the ideal sequence is *Asplenium adiantum-nigrum* L. Then, after all procedures, sensitivity analysis was performed to measure the reliability of the results obtained from the AHP and TOPSIS methods. As a result of the sensitivity analysis, it was determined that the alternative rankings as a result of the AHP and TOPSIS methods were reliable. In this study, SWOT analysis, AHP and TOPSIS methods and sensitivity analysis were used to quantitatively determine plant material alternatives to be used in vertical garden design. At the same time, the study is the first to our knowledge in the landscape architecture literature in terms of using these four methods together in determining plant material for vertical garden systems. The use of multi-criteria decision-making methods in the field of plant selection and supply of plant nutrition products, in urban design stages, in rural and urban sustainable planning studies, in evaluating the suitability of natural plant species for landscape studies, will be useful in later studies and will contribute to the landscape architecture literature.

References

Alakas, H. M., Bucak, M., & Kızıltas, S. (2019). Selection of Ambulance Supplier Company with AHP-TOPSIS and AHP-VIKOR Methods. Harran University Journal of Engineering 4, 93-101.

Aygencel, M. (2011). Vertical Green Systems, Master Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Architecture, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.

Bagheri Moghaddam, F., Navarro Delgado, I., Redondo Domínguez, E., Fort Mir, J. M., & Giménez Mateu, L. (2021). Understanding the Performance of Vertical Gardens by Using Building Simulation and its Influences on Urban Landscape. ACE: architecture, city and environment, 16(47). doi: 10.5821/ace.16.47.10321.

Bates, B. (2017). Straight up: Vertical garden lessons. ReNew: Technology for a Sustainable Future, (138), 48-51.

Chaipong S., (2020). Indoor plant species survival under different environment in indoor vertical garden. International Journal of Geomate, 18(68), 15-20. doi: 10.21660/2020.68.5572.

Chakraborty, S. (2022). TOPSIS and Modified TOPSIS: A comparative analysis. Decision Analytics Journal, 2 (2022), 100021. doi: 10.1016/j.dajour.2021.100021.

Chen, C. C., Lin, M. L., Lee, Y. T., Chen, T. T., & Huang, C. L. (2012). Selection best starting pitcher of the Chinese professional baseball league in 2010 using AHP and TOPSIS methods. Frontiers in Computer Education (pp. 643-649). Berlin, Heidelberg: Springer.

Çelik, A., Ender, E. & Zencirkıran, M. (2015). Vertical Garden and Practices in Turkey. Research Journal of Agricultural Sciences, 8(1), 67-70.

Demirarslan, K. O. & Demirarslan, D. (2018). The Relationship between Industrialization, Urbanization and Environment: The Case of Kocaeli Province. Journal of Sustainable Engineering Applications and Technological Developments, 1(1), 29-43.

Durak, İ., Arslan, H. M., & Özdemir, Y. (2021). Application of AHP–TOPSIS methods in technopark selection of technology companies: Turkish case. Technology Analysis & Strategic Management, 1-15. doi: 10.1080/09537325.2021.1925242

Eren T., & Gür Ş. (2017). Selection of 3PL Company for online shopping sites with AHP and TOPSIS method. Hitit University Journal of Social Sciences Institute, 10(2), 819-834. doi: 10.17218/hititsosbil.285102.

Fawad, M., Ullah, F., Irshad, M., Shah, W., Mahmood, Q. & Ahmad, I. (2022). Marble waste site suitability assessment using the GIS-based AHP model. Environmental Science and Pollution Research, 29, 28386–28401. doi: 10.1007/s11356-021-18373-7.

Feng H., & Hewage K. (2014). Lifecycle assessment of living walls: air purification and energy performance. Journal of Cleaner Production, 69, 91-99. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.01.041.

Geyik, O., Tosun, M., Ünlüsoy, S., Hamurcu, M., & Eren, T. (2016). Using AHP and TOPSIS methods for selecting of publishing house. International Journal of Social and Educational Sciences, 3(6), 106-126.

Goel, M., Jha, B., & Khan, S. (2022). Living walls enhancing the urban realm: a review. Environmental Science and Pollution Research, 1-20. doi: 10.1007/s11356-022-19501-7.

Gür, N. & Erduran Nemutlu, F. (2021). Use of Vertical Gardens in Historical Areas: The Case of Hasan Mevsuf Martyrdom Canakkale. Journal of Bartin Faculty of Forestry, 23(3), 792-807. doi: 10.24011/barofd.975280.

Gür, N. & Kahraman, Ö. (2022). Effect of Vertical Gardens on Urban Biodiversity. Düzce University Journal of Science and Technology, 10 (1), 342-355 . doi: 10.29130/dubited.934578.

Helms, M. M. & Nixon, J. (2010). Exploring SWOT analysis–where are we now? A review of academic research from the last decade. Journal of Strategy and Management, 3(3), 215,251. doi: 10.1108/17554251011064837.

Hopfe C. J., Augenbroe G. L., & Hensen J. L. (2013). Multi-criteria decision making under uncertainty in building performance assessment. Building and Environment, 69, 81-90. doi: 10.1016/j.buildenv.2013.07.019.

Hoque, I., & Rohatgi, S. (2022). Identification of Potential Urban Residential Area by Integrating AHP and WCL in RS and GIS Environment: A Case Study of Siliguri Municipal Corporation and Its Buffer of 7 km, West Bengal. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 1-20. doi: 10.1007/s12524-022-01534-7.

Hosseini, S. M., Paydar, M. M., & Triki, C. (2021). Implementing sustainable ecotourism in Lafour region, Iran: Applying a clustering method based on SWOT analysis. Journal of Cleaner Production, 329, 129716. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129716.

Kahraman, Ö., Aktaş, M. & Yurtsever, N. (2018). Assesment of Çanakkale City Center in Terms of Roof and Vertical Gardens. COMU Journal of Agriculture Faculty, 6, 153-159.

Karakoç, M. (2019). Investigation of the effects of vertical garden use on urban ecology in building facades, Florya transformer building example. Master Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Istanbul Aydin University, İstanbul, Turkey.

Kırıt, N. (2018). Vertical gardens applications on urban landscape design: A case of Istanbul European Side. Master Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Çanakkale Onsekiz Mart University, Çanakkale, Turkey.

Majumdar, A., Sarkar, B., & Majumdar, P. K. (2005). Determination of quality value of cotton fibre using hybrid AHP-TOPSIS method of multi-criteria decision-making. Journal of the Textile Institute, 96(5), 303-309. doi: 10.1533/joti.2005.0013.

Malul, M., Bar-El, R. (2009). The gap between free market and social optimum in the location decision of economic activity. Urban Studies 46(10), 2045-2059. doi: 10.1177/0042098009339427.

Mao N., Song M., Pan D., & Deng S. (2018). Comparative studies on using RSM and TOPSIS methods to optimize residential air conditioning systems. Energy, 144, 98-109. doi: 10.1016/j.energy.2017.11.160.

Natarajan, M., Rahimi, M., Sen, S., Mackenzie, N., & Imanbayev, Y. (2015). Living wall systems: evaluating life-cycle energy, water and carbon impacts. Urban ecosystems, 18(1), 1-11. doi: 10.1007/s11252-014-0378-8.

Örnek, M. A. (2011). A sample based design model suggestion that can be used in the vertical garden design process. Master Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Istanbul Technical University, İstanbul, Turkey.

Pérez-Urrestarazu L. (2021). Water consumption of felt-based outdoor living walls in warm climates. Urban Forestry & Urban Greening, 59, 127025. doi: 10.1016/j.ufug.2021.127025.

Perini, K., Ottelé, M., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2013). Vertical greening systems, a process tree for green façades and living walls. Urban Ecosystems, 16(2), 265-277. doi: 10.1007/s11252-012-0262-3.

Price, A., Jones, E. C., & Jefferson, F. (2015). Vertical greenery systems as a strategy in urban heat island mitigation. Water, Air, & Soil Pollution, 226(8), 1-11. doi: 10.1007/s11270-015-2464-9.

Phonpo S., & Saetiew K. (2017). Selection of appropriate species of plants for indoor vertical garden. International Journal of Agricultural Technology, 13(1), 119-129.

Salas, M. C., Montero, J. L., & Moral, J. A. (2010). Hydroponic system for growing ground cover plants on vertical surface. II International Conference on Landscape and Urban Horticulture 881,421-423. doi: 10.17660/ActaHortic.2010.881.67.

Supçiller, A., & Çapraz, O. (2011). Supplier Selection Based on AHP-TOPSIS Method application. Istanbul University Econometrics and Statistics e-Journal, (13), 1-22.

Timur, Ö. B. & Karaca, E. (2013) .Vertical gardens. Advances in Landscape Architecture, 587-620. doi: 10.5772/55763.

Tukan, M., Camerling, B. J., & Afifudin, M. T. (2020). Decision Support System for Determining Floating Dock Locations in Maluku Islands Using AHP-TOPSIS. Journal of Physics: Conference Series 1577(1), 012001. doi: 10.1088/1742-6596/1577/1/012001.

Tunç, T. B. (2021). Human-Space Relations in Neoliberal Residential Structures: The Case Of Bornova (Izmir). Master Thesis, Department of Human and Economic Geography, Social Sciences Institute, Ege University, İzmir, Turkey.

Uchida, K., Blakey, R. V., Burger, J. R., Cooper, D. S., Niesner, C. A., & Blumstein, D. T. (2021). Urban biodiversity and the importance of scale. Trends in Ecology & Evolution, 36(2), 123-131. doi: 10.1016/j.tree.2020.10.011.

URL- 1, (2022) General Directorate of Meteorology of the Republic of Turkey. Seasonal normal of the provinces / Izmir. https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=IZMIR (Date of access: 15.06.2022).

Üçok, E. (2014). A study on vertical garden and its examples in Turkey. Master Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey.

Vach, T., & Mašín, I. (2020). AHP-Based Evaluation of Vertical Gardens Design. Current Methods of Construction Design (pp. 415-421). Cham, Germany:.Springer.

Wang, Y., Liu, P., & Yao, Y. (2022). BMW-TOPSIS: a generalized TOPSIS model based on three-way decision. Information Sciences, 607, 799-818. doi: 10.1016/j.ins.2022.06.018.

Xu, Y., Liu, S., Wang, J., & Shang, X. (2022). Consensus checking and improving methods for AHP with q-rung dual hesitant fuzzy preference relations. Expert Systems with Applications, 117902. doi: 10.1016/j.eswa.2022.117902.

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

UMAGD, (2023) 15(2), 463-471.

10.29137/umagd.1165147

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

A Parallel Architecture for Improving the Performance of the Kriging Algorithm

Özgür Tamer[1*], A.Esat Genç[2],

[1]Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Dokuz Eylül Üniversitesi İzmir, TÜRKİYE

***Başvuru/Received**: 22/08/2023* ***Kabul / Accepted**: 12/03/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 06/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: xx/xx/xxxx*

Abstract

Estimating missing data values by using interpolation algorithms is a well-known technique. Kriging is an optimized interpolation method based on regression against evaluated values from the surrounding observation points, weighted according to spatially varying values according to the covariance between these observation points. It has been widely used for estimating the missing geological data of the areas based on the measurements in close proximity. In this work we use the Kriging to recover the missing pixels of digital images. Even though Kriging is considered as successful on estimating the missing pixels, the algorithm has a high operation load, causing delays especially for live streaming videos. In this paper we propose a parallel architecture to improve the performance and reduce the operation time of the Kriging Algorithm for estimating the missing pixels. The proposed method can be applied on Field Programmable Gate Arrays (FPGA) and considerable performance improvement have been achieved depending on the number of logic blocks available inside the FPGA

Key Words

"Kriging algorithm, parallel architectures, interpolation, image reconstruction, FPGA"

***Corresponding Author:** ozgur.tamer@deu.edu.tr*

1. Introduction

Interpolation algorithms are used to construct new data points or to estimate missing data points by weighting the values of discrete set of priorly known data points (Vaseghi, 2012). Interpolation is an important research topic in the fields where large data sets in the form of vectors or matrices are used, like Geostatistics, Geography Information System (GIS), Image Processing, Motor Control and many other fields (Vaseghi, 2012). There are many interpolation methods such as Linear Interpolation, Inverse Distance to a Power, Local Polynomial Interpolation, Trilinear Interpolation (Vaseghi, 2012) and Kriging (He et al., 2011).

The Kriging algorithm is considered as the optimal interpolation method for minimizing the possible interpolation errors (He et al., 2011) and it is generally preferred to estimate the geological characteristics of the area based on the measured data from the nearby locations (Johnston et al., 2003), (Bohling, 2005), (Li & Dong, 2011), (Bonaventura et al., 2005). In these studies, geostatistical data is predicted by evaluating the weighted sum of the surrounding observed values to derive a prediction for each point. Different methods for determining the weights are proposed in various works (Bohling, 2005).

Interpolation in image processing is used to reconstruct the pixels lost in the sampling process by smoothing the data samples with an interpolation function (Miklós, 2004). Even the construction of a raw digital image is based on interpolating of different color values acquired from of different colors which is called Bayer filtering (Bayer, 1976).

The quality of the resulting image depends on the preferred interpolation technique. There are two basic categories used in image interpolation; deterministic techniques and statistical techniques (Miklós, 2004). Deterministic techniques uses a fixed weighting scheme between data points while statistical techniques depend on approximating the weights based on the statistical properties of the data. Even though statistical methods promise a lower estimation error they increase the computation time (Miklós, 2004).

Kriging attempts to minimize the error variance by calculating every possible distance weighting function based on the statistical properties of the measurement values (He et al., 2011). These calculations increase the computational complexity and therefore the computational load of the algorithm. There exists various studies of using the Kriging algorithm about reconstruction of an image that have missing pixels. Panagiotopoulou and Anastassopoulos propose a method to interpolate a high resolution image from a low resolution image by using the Kriging technique (Panagiotopoulou & Anastassopoulos, 2007). They apply the Kriging algorithm to subpixel shifted and aliased low-resolution images to reconstruct the missing pixels of a high-resolution image. Their results show significant improvement when compared with alternative interpolation methods. Wielgosz et al. proposed and FPGA based architecture to reduce the computation time of the algorithm (Maciej Wielgosz Mauritz Panggabean, 2013). In their approach, the missing pixels are fixed and the weights are predetermined based on the statistical data of the previous images. Therefore it is neither a deterministic nor a statistical method, it is a hybrid approach. They also reduce time by performing several operations concurrently. Co-kriging grid-point interpolation is used by Chernetskiy, Tao, and Muller to generate Digital Elevation Model (DEM) and determine height uncertainties for each location (Chernetskiy et al., 2019). Their results show improvement in satellite images even for urban area satellite images. Li and Dong proposed an interpolation algorithm based on Kriging Interpolation and running on Graphics Processing Unit (GPU) cores (Li & Dong, 2011). They first use Kriging to interpolate the missing data values to build stratum surfaces and build a three-dimensional geological model. In their work, Kriging algorithm runs on a GPU with CUDA® (Compute Unified Device Architecture) cores. CUDA® is a graphics-processing unit, which can also be used as a general-purpose parallel computing architecture proposed by NVIDIA® Corporation. Their results show speedup values greater than 100 for some grid counts. The work presented by Yfantis and Au shows a Kriging based image compression technique (Hagstrom & Yfantis, 1994). They use Kriging interpolator to estimate the pixels not included in the image. Their results are promising when compared with other compression techniques. In the work presented by Han and friends, Kriging is used to pretreat of an image to be inpainted by the proposed improved Criminisi based inpainting algorithm (Han et al., 2021). They first degrade the image to a lower resolution, then use Kriging to improve the quality called “pretreatment”. Their results are superior when compared with traditional Criminisi based inpainting algorithm. This work is similar to the work presented in this paper since intentional degrading is performed on the image. A salt and pepper noise reduction algorithm based on Kriging interpolation is presented by Varatharajan and friends called the Adaptive Decision based Kriging interpolation filter (ADKIF) (Varatharajan et al., 2018). The proposed method is a decision based one using a 3×3 kernel and requires at least 3 non noisy pixels in the current processing window, if this condition is not satisfied window size is increased. Presented results show comparable performance with similar methods for most images and superior in some of the images. An FPGA based semivariogram computation methodology is presented by Lagadapati, Shirvaikar and Dong (Lagadapati et al., 2015). Even though this work is not directly focused on Kriging, it presents a work based on FPGA implementation, which shows similarity with this paper. Their aim is to speed up the semivariogram value calculation by concurrent operating modules dedicated to the constituent computational tasks. Presented results show a significant improvement in speed for evaluating the semivariogram value using the proposed architecture.

The main aim of this work is to interpolate the missing image pixels which are dropped on purpose and in a predefined order for compression of images. A parallel architecture is proposed to reduce the processing load of the algorithm to avoid delays especially in video streams (Rønningen et al., 2011). Initial results of this work has been presented by Guvendik et. al. (Güvendik et al., 2012)

General definition of the Kriging algorithm will be introduced in the second section of this paper, which is going to be followed by the presentation of the proposed parallel architecture. At the fourth section, results of this application will be presented. Finally, the results will be concluded.

2. Methodology

Kriging is an optimized interpolation method based on regression against evaluated values from the surrounding observation points, weighted according to spatially varying values according to the covariance between these observation points [4].
It is usually used in Geostatistic calculations like elevation, material density of an area by taking the data from surrounding points and estimate a data value for unknown location [3]. The algorithm can also be used in image processing applications to estimate unknown pixel values [10], [12].
The aim of the Kriging algorithm is to find the summation of the surrounding residual values of data points and obtain the corresponding weights of the points. As presented in Fig 1. Z(u) is the point with unknown value, λ is the Kriging weight for each corresponding measurement value given by Z(1) to Z(6) The cumulative sum of these weighted values gives the estimated data.

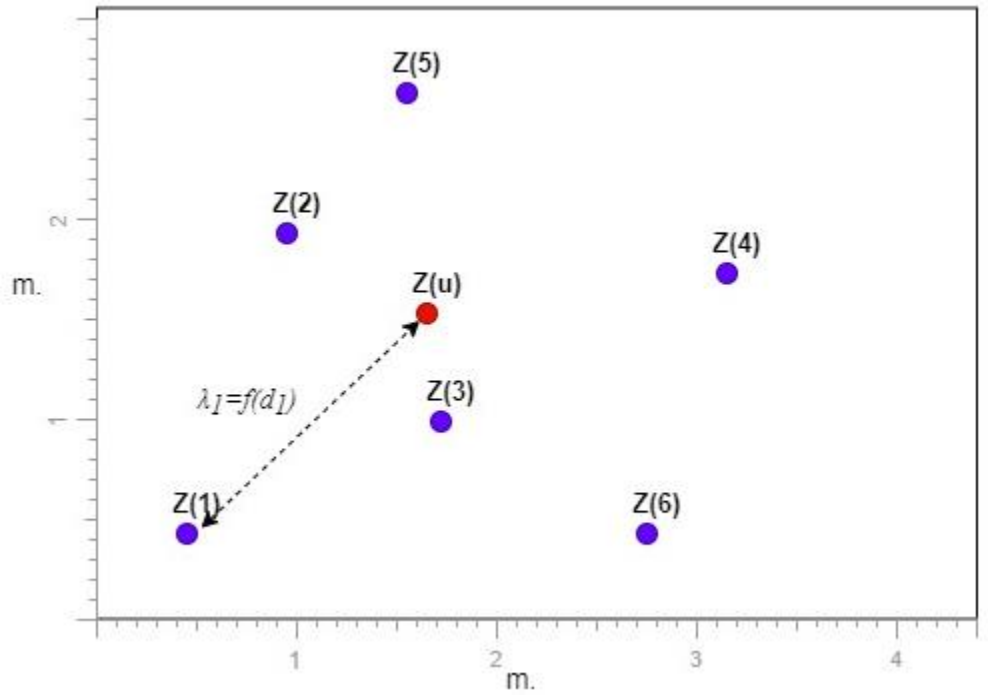


Figure 1. Geographic data points with their coordinates**.**

We define Z(u) as a random field with a mean value m(u). Therefore, the residual component of Z(u) is given by;

$$R(\mathbf{u}) = Z(\mathbf{u}) - m(\mathbf{u}) \tag{1}$$

Kriging algorithm estimates the value at point u by weighting the sum of the measured values at surrounding locations.
The general expression for the Kriging algorithm is given by;

$$Z^*(\mathbf{u}) - m(\mathbf{u}) = \sum \lambda_\alpha [Z(\mathbf{u}_\alpha) - m(\mathbf{u}_\alpha)] \tag{2}$$

where **u**, $\mathbf{u}_\alpha$ denote the position vectors for the location to be estimated and one of the data of a location of close proximity, indexed by α. In equation (2) $n(\mathbf{u})$ denotes the number of locations with observed data in close proximity used for estimation of $Z^*(\mathbf{u})$ and $m(\mathbf{u})$, $m(\mathbf{u}_\alpha)$ are the expected values of $Z(\mathbf{u}_\alpha)$ and $Z(\mathbf{u})$ while λ_α is the Kriging weight assigned to $Z(\mathbf{u}_\alpha)$ for estimating the value at location **u**. The weights differ for different locations based on axial distances.
The goal is always to determine Kriging weights (λ) that minimizes the estimation error;

$$\sigma_E^2(\mathbf{u}) = \mathrm{Var}\{Z^*(\mathbf{u}) - Z(\mathbf{u})\} \tag{3}$$

The assumption for data points are given by

$$Z(\mathbf{u}) = R(\mathbf{u}) + m(\mathbf{u}) \tag{4}$$

$$\mathrm{E}\{R(\mathbf{u})\} = 0 \tag{5}$$

Where R(u) is a random field with stationary covariance and a mean of 0,
The unbiasedness condition for minimizing the estimation error variance is given by;

$$\begin{gathered} Z(\mathbf{u}) = R(\mathbf{u}) + m(\mathbf{u}) \\ \mathrm{E}\{R(\mathbf{u})\} = 0 \\ \mathrm{E}\{Z^*(\mathbf{u}) - Z(\mathbf{u})\} = 0 \end{gathered} \tag{6}$$

Under these conditions the covariance between all data points must be calculated as given in (8).

$$\mathrm{Cov}\,\{R(\mathbf{u})R(\mathbf{u}+\mathbf{h})\} = \mathrm{E}\{R(\mathbf{u}) \cdot R(\mathbf{u}+\mathbf{h})\} = C_R(\mathbf{h}) \tag{7}$$

2.1 Simple Kriging

Data point estimations for simple Kriging is given by;

$$Z^*_{SK}(\mathbf{u}) = m + \sum_{\alpha=1}^{m(\mathbf{u})} \lambda_\alpha^{SK}(\mathbf{u})[Z(\mathbf{u}_\alpha) - m] \tag{8}$$

This is similar with the general formula. The specialty of the Simple Kriging method is the constant mean "m" as seen from(10).

$$\begin{gathered} \mathrm{E}[Z^*_{SK}(\mathbf{u})] = m = \mathrm{E}[Z(\mathbf{u})] \\ \mathrm{E}[Z(\mathbf{u}_\alpha) - m] = 0 \end{gathered} \tag{9}$$

It is obvious that the error expression of residuals can be obtained as;

$$\begin{gathered} Z^*_{SK}(\mathbf{u}) - Z(\mathbf{u}) = \\ \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_\alpha^{SK}(\mathbf{u})R(\mathbf{u}_\alpha) - R(\mathbf{u}) = \\ R^*_{SK}(\mathbf{u}) - R(\mathbf{u}) \end{gathered} \tag{10}$$

Error of the variance is evaluated by the linear combination of random variables as presented in (13).

$$\begin{aligned} \sigma_E^2(\mathbf{u}) &= Var\{R^*_{SK}(\mathbf{u})\} + Var\{R_{SK}(\mathbf{u})\} - 2Cov\{R^*_{SK}(\mathbf{u}), R_{SK}(\mathbf{u})\} \\ &= \sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \sum_{\beta=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_\alpha^{SK}(\mathbf{u})\,\lambda_\beta^{SK}(\mathbf{u}) C_R(\mathbf{u}_\alpha - \mathbf{u}_\beta) + C_R(0) - 2\sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_\alpha^{SK}(\mathbf{u}) C_R(\mathbf{u}_\alpha - \mathbf{u}) \end{aligned} \tag{11}$$

The derivative of the equation in (13) is taken with respect to the Kriging weights and each derivative is set to zero to minimize the error variance. As a result, we get the following system of equations (14);

$$\begin{gathered} \sum_{\beta=1}^{n(u)} \lambda_\alpha^{SK}(\mathbf{u}) C_R(\mathbf{u}_\alpha - \mathbf{u}_\beta) = C_R(\mathbf{u}_\alpha - \mathbf{u}) \\ \alpha = 1, \ldots, n(\mathbf{u}) \end{gathered} \tag{12}$$

In vector notation these equations become;

$$\begin{gathered} \mathbf{K}\lambda_{SK}(\mathbf{u}) = \mathbf{k} \\ \lambda_{SK} = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{k} \end{gathered} \tag{13}$$

Where **K** is covariance matrix between all pixels; **k** is the covariance vector between data pixels and estimation pixel; **λ** is the Kriging weight vector.

Kriging has three main types; Simple Kriging, Ordinary Kriging and Kriging with a trend. In this paper Simple Kriging is employed.

3. Parallel Kriging Architecture

Kriging interpolation has great performance on reconstructing a dataset from small amount of information as mentioned previously. However, computational load of the algorithm is very high due to the computation procedure of the weights. A parallel architecture is introduced in this section for improving the performance of the algorithm.

In case of randomly missing pixels we need to calculate Kriging weights for each estimation process. However, the proposed architecture assumes that, the pixels to be estimated are deleted on purpose for compression of streaming videos. Therefore, the locations of the missing pixels is predetermined by the compression algorithm as can be seen in Fig. 2. Each number in Fig. 2 (a) corresponds to a pixel of an image. As can be observed image is divided into 3x3 sub-images and all the pixels of the sub-image are numbered from 1 to 9. In order to compress the image, pixels marked with one or more numbers can be deleted before it is transmitted (Panggabean et al., 2011). In Fig. 2 (b) pixels numbered with 2 and 7 are deleted before transmission. Since the pixels are deleted have fixed positions, corresponding distance with the available pixels are also predetermined. Therefore, we can pre-calculate the corresponding Kriging weights according to the distances and store them.

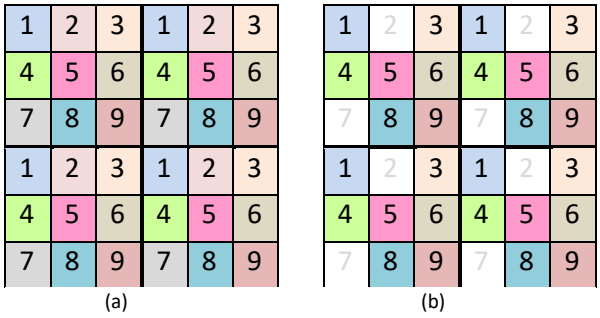


Figure 2. Image with pixels marked with numbers for planned deleting

The proposed architecture has distributed identical processing elements (PE) as shown in Fig. 3. Each PE is responsible for interpolating the unknown pixel by using the available pixels.

Each PE, as shown in Fig. 4, contains a look-up table (LUT) to keep the values of Kriging weights and the distance calculator which finds the distance between available pixel and the estimated pixel by using locations of them. The RAM block acquires and stores the available pixels' value until the end of each estimation process to prevent flow delays.

Each PE stores the values of the observation points pixels and calculates the corresponding pixel to be estimated by weighting it with appropriate LUT value. We evaluate the estimation values, by adding the outputs of each processing element as shown in Figure 3.

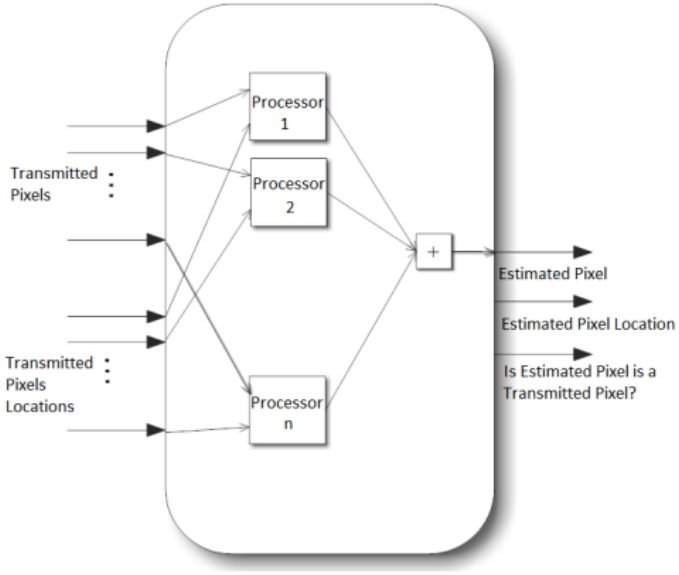


Figure 3. Block diagram of the parallel architecture

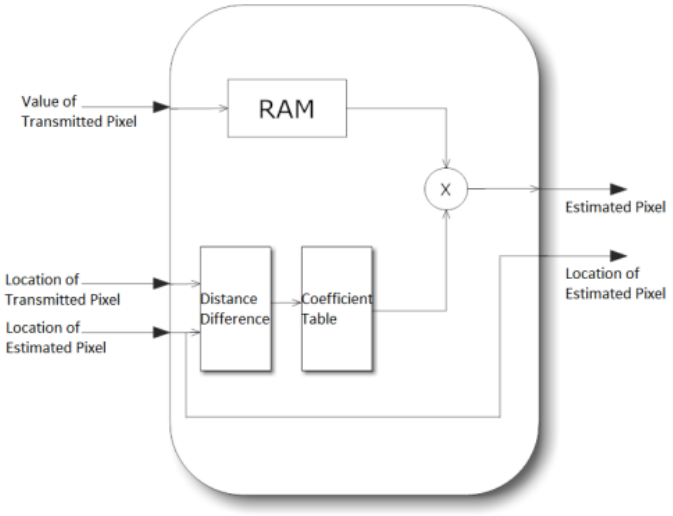


Figure 4. Block diagram of a single processing element

The image is divided into regions as presented in Figure 5. Each PE (denotes as PEX on the most top row) is responsible of processing different regions in its dedicated column. At each time slot each PE processes a region then switches to the next region in the same column therefore regions of each row is processed concurrently. The concurrent operation of the PE's reduces the processing time at a similar ratio since all of the operation is considered as parallel operation. Only reconstruction of the image after all of the pixels are evaluated is considered as the serial part which has minor effect on the total time.

/	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6	PE7	PE8
T1	Region 1.1	Region 2.1	Region 3.1	Region 4.1	Region 5.1	Region 6.1	Region 7.1	Region 8.1
T2	Region 1.2	Region 2.2	Region 3.2	Region 4.2	Region 5.2	Region 6.2	Region 7.2	Region 8.2
T3	Region 1.3	Region 2.3	Region 3.3	Region 4.3	Region 5.3	Region 6.3	Region 7.3	Region 8.3
T4	Region 1.4	Region 2.4	Region 3.4	Region 4.4	Region 5.4	Region 6.4	Region 7.4	Region 8.4
T5	Region 1.5	Region 2.5	Region 3.5	Region 4.5	Region 5.5	Region 6.5	Region 7.5	Region 8.5
T6	Region 1.6	Region 2.6	Region 3.6	Region 4.6	Region 5.6	Region 6.6	Region 7.6	Region 8.6
T7	Region 1.7	Region 2.7	Region 3.7	Region 4.7	Region 5.7	Region 6.7	Region 7.7	Region 8.7
T8	Region 1.8	Region 2.8	Region 3.8	Region 4.8	Region 5.8	Region 6.8	Region 7.8	Region 8.8

Figure 5. Working regions of PEs and time slots

4. Results

First, simulation time of the algorithm by using one PE is measured. The algorithm, which uses necessary operations including row/column selection, subtraction, addition, multiplication, division, absolute value needs 3180 cycles for each pixel estimation [3]. If the resolution of the image is considered as 512x512, total cycles to get result will be 834,404,352. 250 MHz clock frequency which is the clock frequency of Xilinx Virtex 6 FPGA is preferred for calculation of necessary operation time. Xilinx Virtex 6 FPGA is preferred since the development board available for use in our experiments are equipped with these FPGA's. Correspondingly, the total time to get result for a single PE will be 3.337 seconds.

If the 512x512 resolution image is divided into N processing elements by using the parallel architecture for the Kriging algorithm, total time can be calculated as;

$$t = s/n \tag{23}$$

Here, t is the total operation time, s is the single PE operation time and n is parallel PE number. Consequently, total reconstruction time of the 512x512 resolution MALE image by using (14.) with 8 PEs will be 0.417 seconds. Operation times for different number of parallel PEs are presented in Table-2.

A 512x512 pixel MALE image, which is presented in Fig. 6 is used to test the parallelized Kriging algorithm. The parallel architecture is developed using Simulink HDL libraries and simulated using the same environment [7]. The developed architecture has 32 concurrent processing elements.

Table 2. Number of Parallel PEs and total calculation time

Number of Parallel PEs	Process Times (sec.)
1	3.337
2	1.668
3	1.112
4	0.834
8	0.417
16	0.208
32	0.104



Figure 6. Uncompressed image

Figure 7 presents the reconstructed images. The first image is reconstructed from %25 of the original image while and the second image contains only %11.11 of it. Here, neighborhood of nearest 8 pixels is used to calculate the Kriging weights. Exponential semivariance model, which is shown in Figure 3, tells, if the distance (h) is increasing from an observation point towards the estimation points, the Kriging weights of this observation point for these estimation points are decreasing. Thus, using the neighborhood of nearest 8 pixels is considered as satisfactory for accurate reconstruction.



Figure 7. Reconstructed images from 11% (left) of uncompressed image and 25% (right) of uncompressed image

Increasing or decreasing the size of the image also effects processing time. Table 3 presents processing time in seconds for different image resolutions vs number of processing elements. As can be observed increasing the image resolution dramatically increases

processing times and more PEs are needed for reconstructing the image in desired timing limits. Numbers in parenthesis next to time in every row denotes the number of PEs used in the simulation.

Table 3. Effect of the Resolution of the image

Resolution	Time (sec)	Time(8)	Time(16)	Time (32)	Time(64)	Time(128)	Time (256)
512x512	3,33447168	0,416809	0,2084045	0,1042022	0,0521011	0,026051	0,013025
1024x1024	13,3378867	1,667236	0,8336179	0,416809	0,2084045	0,104202	0,052101
Full HD	26,376192	3,297024	1,648512	0,824256	0,412128	0,206064	0,103032
4K	105,504768	13,1881	6,594048	3,297024	1,648512	0,824256	0,412128

In Table 4 comparison of the proposed work with results of other similar techniques is presente. In the work presented by Hudson et al. an implementation of an engine on the Xilinx XC6264 image interpolation is performed which utilizes 2-5-2 splines (Hudson et al., 1998). In the work presented by Fahmy bilinear interpolation hardware interpolating a stream of sub-pixel addresses in a single-cycle delay pipeline is propoed (Fahmy, 2008). A Hardware Architecture for Bicubic Interpolation (HABI) is proposed by Nuño-Maganda and friends (Nuño-Maganda & Arias-Estrada, 2005). The proposed architecture is integrated by three main blocks: for generating the interpolation coefficients. Finally a highly tunable motion estimation architecture is proposed in the work presented by Bournias and friends implementing the Horn and Schunck algorithm in FPGAs (Bournias et al., 2021). As can be observed the proposed algorithm needs more operating time with respect to the methods in the literature. However it is more flexible since controlled erasing of the pixels can be increased to save bandwidth.

Table 4. Comparison with other work

	FPGA Frequency (MHz)	Initial Image	Reconstructed Image	Duration (ms)
Hudson et.al. (Hudson et al., 1998)	30	128x128	512x512	4.91
Fahmy (Fahmy, 2008)	250	128x128	512x512	1
Nuño-Maganda (Nuño-Maganda & Arias-Estrada, 2005)	100	640 x 480	884x660	3.5
Bournias	800	256x256	1024 x 1024	0.5
This work	250	341x341	512x512	13 (256 PEs)

5. Conclusion

In this paper, we propose a parallel processing architecture to improve the performance of the Kriging algorithm. Kriging algorithm helps to recover the effects of data clustering by assigning each points within a cluster different amount of weight. The parallel architecture enables concurrent operation and therefore reduction in processing time without effecting the output image or video and therefore, improving the overall performance of the algorithm. Simulation results show that an FPGA with enough number of processing elements processing time can be reduced to 0.1 seconds, which is adequate for even videos with 60 frames per second. As a future work, it is planned to develop a video compression algorithm for real time streaming videos by intentionally erasing a considerable amount of pixels and reconstructing them at the destination by using the proposed approach.

References

Bayer, B. E. (1976). *Color Imaging Array* (Patent No. US3971065A).

Bohling, G. (2005). Kriging. *Kansas Geological Survey*, *October*, 1–20. https://doi.org/10.2104/ag050010

Bonaventura, L., Castruccio, S., Laboratorio, M. O. X., Matematica, D., & Milano, P. (2005). *Random notes on kriging : an introduction to geostatistical interpolation for environmental applications*.

Bournias, I., Chotin, R., & Lacassagne, L. (2021). FPGA acceleration of the hom and schunck hierarchical algorithm. *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, *2021-May*, 0–4. https://doi.org/10.1109/ISCAS51556.2021.9401068

Chernetskiy, M., Tao, Y., & Muller, J.-P. (2019). 3D stereo reconstruction: high resolution satellite video. *Https://Doi.Org/10.1117/12.2533226*, *11155*, 582–593. https://doi.org/10.1117/12.2533226

Fahmy, S. A. (2008). Generalised parallel bilinear interpolation architecture for vision systems. *Proceedings - 2008 International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs, ReConFig 2008*, 331–336. https://doi.org/10.1109/ReConFig.2008.15

Güvendik, C., Esat Genç, A., Tamer, Ö., & Nil, M. (2012). Improving the performance of Kriging based interpolation application with parallel processors | Kriging temelli aradeğerleme uygulamasinda paralel işlemciler ile başariminin iyileş tirilmesi. *2012 20th Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2012, Proceedings*. https://doi.org/10.1109/SIU.2012.6204645

Hagstrom, B. L., & Yfantis, E. A. (1994). Performance of Multi-Bus, Multi-Memory Systems Using Variable Miss Ratio. *Int. Conf. on Computing and Information*, 831–846.

Han, R., Liu, X., Liao, S., Li, Y., Qi, Z., Fu, S., Li, Y., & Han, H. (2021). Adaptive image inpainting algorithm based on sample block by kriging pretreatment and facet model. *Https://Doi.Org/10.1117/1.JEI.30.4.043021*, *30*(4), 043021. https://doi.org/10.1117/1.JEI.30.4.043021

He, F., Fang, J., & Zou, W. (2011). An effective method for interpolation. *Proceedings - 2011 19th International Conference on Geoinformatics, Geoinformatics 2011*. https://doi.org/10.1109/GeoInformatics.2011.5980762

Hudson, R. D., Lehn, D. I., & Athanas, P. M. (1998). A run-time reconfigurable engine for image interpolation. *Proceedings - IEEE Symposium on FPGAs for Custom Computing Machines, FCCM 1998*, *1998-April*, 88–95. https://doi.org/10.1109/FPGA.1998.707886

Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K., & Lucas, N. (2003). The principles of geostatistical analysis. *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*, 49–80.

Lagadapati, Y., Shirvaikar, M., & Dong, X. (2015). Fast semivariogram computation using FPGA architectures. *Https://Doi.Org/10.1117/12.2077851*, *9400*, 40–49. https://doi.org/10.1117/12.2077851

Li, M., & Dong, L. (2011). Visualization three-dimensional geological modeling using CUDA. *Proceedings - 6th International Conference on Image and Graphics, ICIG 2011*, 852–857. https://doi.org/10.1109/ICIG.2011.94

Maciej Wielgosz Mauritz Panggabean, L. A. R. (2013). FPGA Architecture for Kriging Image Interpolation. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications(IJACSA)*, *4*(12), 193–201. http://ijacsa.thesai.org/

Miklós, P. (2004). Image interpolation techniques. *2nd Siberian-Hungarian Joint Symposium On Intelligent Systems. 2004.*, 1–6.

Nuño-Maganda, M. A., & Arias-Estrada, M. O. (2005). Real-time FPGA-based architecture for bicubic interpolation: An application for digital image scaling. *Proceedings - ReConFig 2005: 2005 International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs*, *2005*(1). https://doi.org/10.1109/RECONFIG.2005.34

Panagiotopoulou, A., & Anastassopoulos, V. (2007). Super-resolution image reconstruction employing Kriging interpolation technique. *2007 IWSSIP and EC-SIPMCS - Proc. 2007 14th Int. Workshop on Systems, Signals and Image Processing, and 6th EURASIP Conf. Focused on Speech and Image Processing, Multimedia Communications and Services*, 144–147. https://doi.org/10.1109/IWSSIP.2007.4381174

Panggabean, M., Tamer, O., & Rønningen, L. A. (2011). Parallel image transmission and compression using windowed kriging interpolation. *2010 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, ISSPIT 2010*. https://doi.org/10.1109/ISSPIT.2010.5711801

Rønningen, L. A., Panggabean, M., & Tamer, O. (2011). Toward futuristic near-natural collaborations on Distributed Multimedia Plays architecture. *2010 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, ISSPIT 2010*. https://doi.org/10.1109/ISSPIT.2010.5711738

Varatharajan, R., Vasanth, K., Gunasekaran, M., Priyan, M., & Gao, X. Z. (2018). An adaptive decision based kriging interpolation algorithm for the removal of high density salt and pepper noise in images. *Computers & Electrical Engineering*, *70*, 447–461. https://doi.org/10.1016/J.COMPELECENG.2017.05.035

Vaseghi, S. V. (2012). Interpolation. In *Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction* (Vol. 33, pp. 3–8). https://doi.org/10.1002/0470841621.ch10

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

UMAGD, (2023) 15(2), 472-483.

10.29137/umagd.1234584

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Kristalize Geçirimsizlik Katkılarının Betonun Taşıma Özellikleri Üzerindeki Etkisi

Effect of Crystalline Waterproofing Admixture on the Transport Properties of Concrete

Oğuzhan Şahin[1*]

[1]*Ankara Ünivesitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,Ankara, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 16/01/2023* ***Kabul / Accepted**: 17/03/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Öz

Bu çalışmada kristalize geçirimsizlik katkılarının beton malzemesinin geçirimlilik ve taşıma özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda iki farklı kristalize geçirimsizlik katkısı kullanılarak beton karışımları üretilmiştir. Üretilen karışımlar kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde basınç dayanımı, kılcal geçirimlilik, basınçlı su geçirimliliği ve klor iyon geçirimliliği testleri uygulanmış ve bu testlerden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Bu testlere ilaveten karışımlara mikroyapısal analizler uygulanarak katkılı beton karışımlarındaki kristal yapı oluşumları gösterilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre katkı kullanımına bağlı olarak basınç dayanımlarında gözlemlenen değişimler sınırlı olmuştur. Katkı kullanımıyla birlikte karışımların çatlak iyileştirme potansiyelleri artmıştır. Genel olarak çalışma sonuçlarından katkıların geçirimliliği azaltma konusunda oldukça etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler

"Geçirimlilik, kristalize geçirimsizlik katkıları, taşıma özellikleri, çimento esaslı sistemler, mekanik özellikler"

Abstract

In this study, the effect of crystalline waterproofing admixture on the permeability and transport properties of cementitious systems was investigated. In this regard, concrete mixtures were produced by using two different crystalline waterproofing admixtures. Compressive strength test, test for determination of resistance of capillary absorption, pressurized water permeability test and chloride ion permeability test were performed on the concrete specimens, and the obtained results were presented. In addition to these tests, microstructural analyzes were applied to the specimens to illustrate the crystal structure formation in the concrete mixtures containing admixtures. According to the results of this study, the changes in the compressive strength test results depending on the use of additives were limited. The crack healing potential of the mixtures increased with the use of additives. In general, it can be deducted from the results of this study that the crystalline waterproofing admixtures are quite effective in reducing permeability.

Key Words

"Permeability, crystalline waterproofing admixture, transport properties, cementitious systems, mechanical properties"

***Sorumlu Yazar:** oguzhan.sahin@ankara.edu.tr*

1. Giriş

Dünyadaki bütün ülkeler, sürdürülebilirlik yönünden verimsizliğe neden olan kalkınma problemlerine çözüm üretmeye çalışmaktadırlar. Gün geçtikçe gelişen ve hızlıca büyüyen ekonomilere sahip ülkelerde bu çözümlerin getirdiği sonuçlar daha açık görülebilmektedir. Genellikle, gelişmiş ekonomilerde otoyollar, sanayi yapıları, havaalanları, yer altı toplu taşıma sistemleri, köprüler, barajlar, atık su arıtma tesisleri, deniz yapıları ve altyapı sistemleri, ticareti destekleyen ve dış kaynaklı yatırımı destekleyen unsurların başında gelmektedir. Bu sebeple, tüm bu yapıların üretiminde kullanımı söz konusu olan beton, ekonomik gelişmenin temel yapıtaşlarından biri olarak kabul edilmektedir. Betonun ve üretiminde kullanılan ana bileşenlerden olan çimentonun üretimleri sırasında çevreye vermiş oldukları ciddi zararlara rağmen özellikle gelişmekte olan ülkelerin inşaat sektörlerindeki canlanmalarla birlikte, küresel olarak betona olan rağbet kayda değer seviyede artmış ve mevcut durumda dünyada en geniş çapta kullanılan inşaat malzemesi olmuştur. Çok yaygın olarak farklı amaçlarda kullanılmasından dolayı özellikle konvansiyonel betonun performans özellikleri birçok araştırmacı tarafından çalışılmış ve bu malzemenin servis ömrü içerisinde göstereceği performansın iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Gelişmiş ülkelerde yaşlanmış ve ömrünü tamamlamış altyapılarla ilgili sorunlar ortaya çıkmaktadır. Karayolları, havaalanları, köprüler, metro geçiş sistemleri, barajlar, atıksu arıtma tesisleri, kıyı yapıları ve hayatımızda çok geniş yer kaplayan binalar şeklinde gelişen altyapılar, mekanik zorlamalar, yer değiştirmeler ve çevresel faktörler nedeniyle sürekli hasar ve deformasyonlara maruz kalmaktadır. Bu bağlamda, , daha uzun servis ömrü ve onarım işlerinin daha az sıklıkla yapılabilmesi adına yüksek dayanıklılığın önemli bir parametre olduğu belirtilebilir. Gerçek altyapısal sürdürülebilirliğin ancak çevresel etkileri düşük malzemelerin üretimi ve yüksek yapısal ve işlevsel dayanıklılığın sağlanması yoluyla sağlanabileceği düşünülmektedir. Çok sayıda farklı altyapısal uygulamalarda kullanılan beton malzemesi, tarihsel olarak, servis ömrünün başında belirli özellikleri bünyesinde taşıyacak ve önceden belirlene bir servis ömrünü sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır. Sürekli artan insan nüfusu nedeniyle insanlar her ne kadar ömür boyu kullanılabilecek yapıların inşa edilebilmesi arzu etse de Avrupa standartlarına göre geniş çaplı kamusal işlerde kullanılan beton malzemelerinden en az 75 yıllık kullanım ömrü beklenmektedir (Alexander ve Stanish, 2005; Bossio v.d.,, 2021). Ancak, kullanıma bağlı mekanik ve çevresel yüklerin ortak etkisi altında 20 ila 30 yıl arasında bozulmanın başladığı göz önünde bulundurulduğunda (Mehta ve Burrows, 2001), bir önceki yüzyılın son yarısında inşa edilen çok sayıda yapının sürekli olarak azalmakta olan işlevsellik nedeniyle hizmet ömürlerinin sonuna yaklaştıkları belirtilebilir. Yapıların kendilerinden beklenen işlevsellik seviyesini karşılayamamaları hizmet süresi boyunca bozulan yapısal elemanların sürekli olarak tekrarlanan bakım, onarım ve/veya yenileme işlemlerini beraberinde getirerek yüksek trafik yoğunluğu, yakıt tüketimi, gaz salınımı vb. sorunları doğurmaktadır. Tüm bunlara ek olarak, tekrarlı olarak uygulanan bu işlemler uzun ömürlü olmayabilmekte ve bu durum yapıların yıkılması ve yeniden inşa edilmesi gibi sonuçları doğurabilmektedir. Bu bağlamda yapıların servis ömrünün uzaması adına dayanıklılık özelliğinin iyileştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Dayanıklılık, su basıncı, asit, klorür ve sülfat saldırıları dahil olmak üzere agresif ortamlara maruz kalan beton yapılar için ana tasarım kriterlerinden biridir (Nematzadeh v.d., 2021). Uygun malzeme veya karışım içeriği seçimleri ile yapıların yapısal kapasitenin artması ve hizmet ömrünün uzaması sağlanabilmektedir (Shi v.d., 2015). Kapiler gözeneklerin, jel gözeneklerinin ve potansiyel olarak gözenekli çimento-agrega arayüzey bölgelerinin varlığı nedeniyle beton normalde gözenekli olarak kabul edilmekte ve gözeneklilik durumu betonun geçirgenlik özelliklerini belirleyen temel unsurların başında gelmektedir (Nyame ve Illston, 1981; Jiang v.d., 2022). Betonda geçirgenliğin yüksek olması zararlı maddelerin beton ve donatı çeliğine ulaşmasına ve buna bağlı olarak yapının hizmet ömrünün kısalmasına neden olmaktadır (Basher v.d., 2001; Al-Akhras v.d., 2022). Betonun dayanıklılığı; tipik olarak yoğun bir beton matrisle, yani geçirgenliği düşürmesi ve aşındırıcıların çeliğe taşınmasını azaltması beklenen çok kompakt bir mikro yapı ile ilişkilidir (Oh v.d., 2002; Beeldens ve Vandewalle, 2001; Nematzadeh v.d., 2021; Kumar v.d., 2022). Bu kompakt mikro yapı, iyi derecelendirilmiş bir parçacık boyutu dağılımı (Hwang v.d., 1996; Rathore v.d., 2022), betonda uçucu kül ve silis dumanı kullanımı (Chang v.d., 2001; Pal v.d., 2020; Saran ve Demiröz, 2023) veya düşük su/bağlayıcı oranlarının seçilmesi (Mehta, 1986; Liu v.d., 2019) gibi yöntemlerle başarılabilmektedir. Geçirimliliği azaltılmış bir mikro yapı elde etmek için ayrıca çimento bağlayıcılı kompozitlerin içerisine üretimi sırasında kimyasal ve mineral katkıların ilave edilmesi de kolay ve uygulanabilir yöntem olarak kabul edilmektedir (Hassani v.d., 2017; Tibbetts v.d., 2021). Kullanılan bu kimyasal ve mineral katkılar ile beton malzemesinin geçirimliliği düşürülerek dayanıklılık açısından kısıtlamaları/yetersizlikleri ortadan kaldırılmaktadır. Geçirimsizlik katkısı (GK) da beton dayanıklılığını artırmak ve yapılara su ve zararlı materyal girişini azaltmak için bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. GK'lar geçirimliliği azaltmalarına ek olarak kuruma büzülmesi ve klorür iyon geçirimliliğini de azalmakta ve donma çözünme etkilerine karşı daha dayanıklı bir beton malzemesi elde edilmesini sağlamaktadır (Ramachandran, 1995; Rixom and Mailvaganam, 1999; Munn v.d., 2003; Matar ve Barhoun, 2020; Gojević v.d., 2021). Bu yönü de dikkate alındığında GK'ların beton malzemesi üretiminde kullanımı büyük faydalar sağlamaktadır. GK'lar maruz kaldıkları koşullar göz önüne alınarak hidrostatik olmayan koşullara maruz kalan beton için GK'lar ve hidrostatik koşullara maruz kalan beton için GK'lar olmak üzere iki alt kategoriye ayrılmıştır (Tibbetts v.d., 2021). Bunun yanında GK'lar mekanizma, performans ve beton endüstrisi tarafından kabulü açısından farklılık gösteren çok çeşitli mineral ve kimyasal katkıları kapsamaktadır. ACI Kimyasal Katkılar Komitesi 212 raporunda GK'lar hidrofobik su iticiler, polimer geçirimsizlik ürünleri, ince yapıdaki katılar, hidrofobik gözenek engelleyiciler ve kristalize ürünler olmak üzere beş ana kategoride sınıflandırılmıştır (ACI, 2016). Bu GK çeşitleri arasından kristalize ürünler daha az bilinen kimyasal katkılar olduğundan bu inceleme makalesinin odak noktası olmuştur. Kristalize katkılar hidrofilik özellikte olup ve bu katkı malzemelerinin aktif bileşenleri, mevcut mikro çatlaklar ve kılcal kanallarda gözenek tıkayan çökeltiler oluşturmak için betondaki su ve çimento parçacıkları ile reaksiyona girmektedir (Almusallam v.d., 2003; Muhammad v.d., 2021). Bu malzemelerin hidrofilik doğası, kalsiyum silikat hidratın yoğunluğunu artırmalarına ve/veya su penetrasyonuna direnen gözenek bloke edici tortular (suda çözünmeyen kristaller) oluşturmalarına neden olmaktadır. Bu katkılar beton gözeneklerinde kristalleşme yoluyla beton geçirgenliğini

azaltan mikro yapı değiştirici olarak sınıflandırılmaktadır. Söz konusu katkıların çalışma mekanizması kalsiyum silikat hidratların oluşumuna benzemektedir ve reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan kristal tortular çimento hamuru ile bütünsel olarak bağlanmaktadır. Oluşan bu tortular ile ortaya çıkan betonun basınç altında su penetrasyonuna karşı direnci önemli ölçüde artırılmış olmaktadır. Reaksiyon sonucu oluşan kristal tortular betonun derinliği boyunca gelişmekte ve beton kütlesinin kalıcı bir parçası haline gelmektedir. Kristal tortular, hidrostatik basınca karşı su penetrasyonuna direnebildiklerinden hidrostatik koşullara maruz kalan beton için GK'lar olarak kategorize edilebilmektedir. Betonun ömrü boyunca kılcal çatlaklar oluştuğundan, kristal katkılar nem varlığında aktifleşmeye devam edebilmekte ve ek boşlukları kapatabilmektedir (Kubal, 2000; Skoglund ve Johansson, 2003; Gojević v.d., 2021).

Kristalize katkıların yaygın olarak kullanılması maliyet ve zaman verimliliği nedeniyle son birkaç on yılda önemli ölçüde artmış ve performanslarına ilişkin mevcut bilgiler günden güne genişlemektedir. Bu kapsamda bu çalışmada da bu tür katkıların beton malzemesinin özellikleri üzerindeki etkilerinin ortaya çıkarılması adına iki farklı formda kristalize geçirimsizlik katkısı kullanılarak beton karışımları geliştirilmiş ve kullanılan bu katkıların beton malzemesinin özellikleri üzerindeki etkisi katkı kullanılmayan beton karışımının özellikleri ile karşılaştırma yapılarak incelenmiştir. Yapılan bu inceleme kapsamında üretilen numuneler üzerinde basınç dayanımı, kılcal geçirimlilik, basınçlı su geçirimliliği ve klor iyon geçirimliliği testleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu testlere ilaveten karışımlara mikroyapısal analizler uygulanarak katkılı beton karışımlarındaki kristal oluşumu tespit edilmiş ve gösterilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Malzemeler

Bu çalışma kapsamında üretilen bütün karışımlarda bağlayıcı malzeme olarak TS-EN-197-1:2012 çimento standartlarında belirtilen nitelikleri karşılayan CEM I 52,5N tipi yüksek dayanıma sahip Portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Karışımlarda doğal kum, kırma taş kumu ve kırma taş agrega olarak kullanılmıştır. Kullanılan bu agregaların granülometrik özellikleri Tablo 2'de sunulmuştur. Çalışmada ayrıca katı (GK1) ve sıvı (GK2) olmak üzere iki farklı formda kristalize geçirimsizlik katkısı kullanılmıştır. GK1 (yığın yoğunluğu: 1,350 ± 0,02 gm/cm³), hidrofilik kristal toz katkı maddesi olup Portland çimentosu, çok ince işlenmiş silis kumu ve çeşitli aktif kimyasallardan oluşmaktadır. GK2 ise sıvı formda kristalize kapiler geçirimsizlik katkısıdır.

Tablo 1. Karışımların üretiminde kullanılan Portland çimentosunun kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Kompozisyon												Fiziksel Özellikler	
Çözünmeyen Kalıntı	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	Kızdırma kaybı	Klorür (CI)	Na2Eq	Özgül ağırlık (gr/cm^3)	Blaine İnceliği (cm^2/g)
0,2-0,5	18,5-20,0	5,0-5,7	2,5-3,2	62,0-65,0	1,2-2,0	2,6-3,2	0,1-0,2	0,4-0,6	1,5-2,5	0,01-0,03	0,4-0,6	3,14	4000-5300

Tablo 2. Çalışma kapsamında karışımlarda kullanılan agregaların granülometrik özellikleri

Agrega Cinsi	Elek Göz Boyutları (mm), Elekten Geçen (%)						
	25 (1")	19 (3/4")	12,5 (1/2")	9,5 (3/8")	4,75 (No: 4)	2 (No: 10)	0,075 (No:200)
Doğal kum	100	100	100	100	99	99	98
Kırmataş kumu	100	100	100	100	97	90	0,5
Kırmataş	100	100	100	76,5	2	0	0

2.2. Karışım Oranları

Çalışma kapsamında sıvı ve katı olmak üzere iki farklı formda kristalize geçirimsizlik katkısı kullanılarak karışımlar üretilmiştir. Ayrıca kullanılan bu katkı malzemelerinin beton malzemesinin özellikleri üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla herhangi bir katkı kullanılmadan şahit bir karışım da üretilmiştir. Tüm karışımların hazırlanmasında 0.5 (ağırlıkça) olacak şekilde sabit su/çimento oranı (S/Ç) kullanılmıştır. Karışımlara kristalize geçirimsizlik katkısının katılım oranı %2 (çimentonun toplam ağırlığına göre) olarak seçilmiştir. Agrega/bağlayıcı oranı tüm karışımlar için yaklaşık 4,4 olacak şekilde kullanılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen karışımların karışım oranları ve bazı karakteristik özellikleri Tablo 3'te sunulmuştur.

2.3. Numunelerin Üretilmesi ve Saklanması

Çalışma kapsamında üretilen karışımların farklı özelliklerini test etmek amacıyla çeşitli ebatlarda numuneler üretilmiştir. Karışım içerikleri ve yapılan testler için performans karşılaştırmasının yapılabilmesi için katkı içeren beton karışımlarına ek olarak benzer sayılarda herhangi bir geçirimsizlik katkısı bulundurmayan referans numuneleri de üretilmiştir. Hazırlanan karışımlardan basınç dayanımı testlerinde kullanılmak üzere 150×150×150 mm boyutlarında olacak şekilde küp numuneler üretilmiştir. Her bir karışım için 3, 7 ve 28 günlük kür yaşlarında her bir kür durumu ve yaş için 6'şar adet numune test edilecek şekilde numuneler hazırlanmıştır.

Kılcal geçirimlilik testi için 75 × 80 × 400 mm boyutlarında kiriş numuneler üretilmiştir. Ayrıca hızlı klorür iyonu geçirimlilik testlerinde kullanılmak üzere her karışımdan 50 mm kalınlığında, 100 mm çapında (Ø100×50 mm) silindirik numuneler hazırlanmıştır.

Tablo 3. Teorik 1 m^3 için beton bileşimi ve özellikleri

Karışım Oranları			
Malzemeler (kg/m³)	**Şahit (Kontrol) betonu (KB)**	**Geçirimsizlik katkılı beton 1 (GKB1)**	**Geçirimsizlik katkılı beton 2 (GKB2)**
Çimento	395	395	395
Kırma taş	528	528	528
Kırma taş kumu	522	522	522
Doğal kum	695	695	695
Su	197	197	197
GK1	-	7,1	-
GK2	-	-	7,1
S/Ç	0,5	0,5	0,5
Taze Betonun Özellikleri			
Birim Ağırlık (kg/m³)	2460	2470	2468
Çökme (cm)	14	15	15

Dökümlerin tamamlanmasının ardından, numuneler kalıplar içerisinde 24 saat süresince 50±5% nem, 23±2 ºC sıcaklığa sahip bir ortamda bekletilmiştir. 24 saatin tamamlanmasının ardından, kalıplarından çıkarılan numuneler, 23 ºC'de laboratuvar şartlarında ve 23 ºC suda olacak şekilde iki farklı kür ortamında belirlenen süreler boyunca kür edilmiştir.

2.4. Numunelerin Test Edilmesi

2.4.1. Basınç dayanımı testi

Çalışma kapsamında üretilen karışımların temel mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda her bir karışımdan basınç dayanımı testinde kullanılmak üzere 6 özdeş küp (150×150×150 mm) numunesi üretilmiş ve üretilen bu numuneler 3, 7 ve 28 günlük kür yaşlarında ASTM C39 standardına uygun olarak 100 ton kapasiteli bir test cihazı kullanılarak basınç testine tabi tutulmuştur. Karışımlara ait basınç dayanımı değerleri her bir durum için 6 özdeş numune kullanılarak elde edilen sonuçların ortalaması alınarak belirlenmiştir.

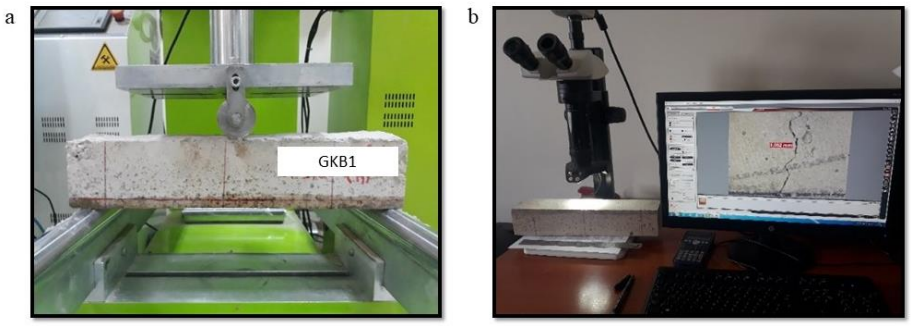
2.4.2. Basınçlı su geçirimlilik testi

Çalışma kapsamında üretilen küp numuneler 28 gün boyunca belirtilen kür ortamında muhafaza edilmelerinin sonunda 5 bar basınçlı su altında basınçlı su geçirimlilik testine tabi tutulmuştur. Söz konusu test gerçekleştirilirken "TS EN 12390-8: Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 8: Basınç altında su işleme derinliğinin tayini" standardı kullanılmıştır. Test için öncelikle deney numuneleri manuel ve mekanik bir sıkıştırma sistemi ile basınçlı su geçirimlilik testi cihazının deney haznesine sabitlenmiştir. Daha sonra kompresörlü sistem vasıtasıyla numunelere 5 bar basınç altında su verilmiş ve basınç altında numunelerdeki su işleme (nüfuz etme) derinliğinin tayini yapılmıştır.

2.4.3. Kılcal geçirimlilik testi

Katkısız ve katkılı karışımlar kullanılarak hazırlanan numuneler 7 gün iki farklı kür koşullarında (havada ve suda) bekletildikten sonra deformasyon kontrollü yükleme test cihazı ile çatlatılmış ve kılcal geçirimlilik tayini yapılmıştır. Çatlatıldıktan 28 gün sonra aynı kür koşullarında bekletilen çatlatılmış numuneler üzerinde tekrar kılcal geçirimlilik tayini yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Kılcal geçirimlilik deneyi TS EN 13057 "Beton yapılar-korunma ve tamir için mamul ve sistemler- deney metotları- kılcal su emme direnci tayini" standardı dikkate alınarak yapılmıştır. Bu standarda göre belirli aralıklarla 24 saat süresince ölçümler alınmıştır.

Katkılı ve katkısız betonlar deformasyon kontrollü yükleme test cihazı kullanılarak Şekil 1a.'de görüldüğü gibi çatlatılmıştır. Her numunede yaklaşık 0,04-0,10 mm civarında kalıcı çatlak oluştuğu görülmüştür. Oluşturulan çatlakların ölçümü mikroskop ile Şekil 1b'de gösterildiği şekilde yapılmıştır. Çatlak oluşturulduktan sonra 28 gün aynı kür koşullarında bekletilen numunelere ait çatlaklar kılcal geçirimlilik deneyi öncesi mikroskop yardımıyla tekrar kontrol edilmiştir.



Şekil 1. (a) Kontrollü çatlak oluşturulması; **(b)** Çatlak ölçümü

2.4.4. Klor iyon geçirimliliği testi

Çalışma kapsamında klor iyon geçirimliliği testi de numunelerin geçirgenliklerini incelemek adına uygulanmıştır. Bu kapsamda havada ve suda kür edilen Ø100×50 mm boyutlarındaki silindirik numunelerin 3. gün ve 28. gün sonundaki klor iyon geçirimliliği ASTM C 1202 standardı göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Bu test yapılırken ilk önce numuneler hızlı klor iyonu geçirimlilik testi test hücrelerine yerleştirilmiş ve yerleştirilen bu numunelerin bir ucu %3,0 tuz (NaCl) solüsyonuna diğer ucu da 0,3 M sodyum hidroksit (NaOH) solüsyonuna daldırılacak şekilde sistem hazneleri ilgili solüsyonlarla doldurulmuştur (Şekil 2). Bu test sırasında, Ø100×50 mm silindirik numunenin iki karşılıklı ucu boyunca 60 V'lık doğru akım (DC) olacak şekilde sabit potansiyel farkı uygulanmıştır. 6 saat sonra numunelerden geçen akım miktarı Coulombs (C) olarak kaydedilmiştir.



Şekil 2. Klor iyonu geçirimlilik deney düzeneği

2.4.5. Mikroyapısal analizler

Üretilen katkılı ve katkısız betonların katkı kullanımına bağlı olarak içyapısında oluşan değişimler mikroyapısal analizler yardımıyla analiz edilmiştir. Mikroyapısal analizler için üretilen numuneler üzerinde taramalı elektron mikroskobu-SEM (Scanning Electron Microscope) kullanılarak görüntüleme yapılmıştır. Söz konusu analizler için 28 günlük kürleme yaşında basınç dayanımı testine tabi tutulan kübik numunelerden örnekler alınmıştır. Numune alımında ilk olarak nispeten büyük boyutlardaki basınç dayanımı testi numuneleri küçük parçalara ayrılmış ve kırılan parçalar arasından 20-25 gram ağırlığında olacak şekilde rastgele numuneler seçilmiştir. Bir gün boyunca fırında kurutulduktan sonra bu numuneler üzerinde taramalı elektron mikroskobu ile (Tescan-GAIA3+Oxford XMax 150 EDX) analizler yapılmış ve SEM görüntüleri alınmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Basınç Dayanımı Testi

Tablo 4, katkısız ve katkılı beton numunelerin basınç dayanım sonuçlarını göstermektedir. Deney sonuçları incelendiğinde beklenildiği gibi kür süresi uzadıkça üretilmiş numunelerin karışım içeriğinden bağımsız olarak basınç dayanımlarında artma eğilimi olduğu görülmektedir. 28 günün sonunda, havada kür edilmiş numuneler için kaydedilen maksimum basınç dayanımı sonuçları 60,1 MPa (KB), 59,8 MPa (GKB1), 58,6 MPa (GKB2) iken suda kür edilmiş numuneler için kaydedilen maksimum basınç dayanımı sonuçları 65,7 MPa (KB), 64,6 MPa (GKB1), 62,7 MPa (GKB2) olmuştur.

Tablo 4. Basınç dayanımı test sonuçları

Numune yaşı	Ortalama basınç dayanımı (MPa)					
	23 °C'de havada kür edilmiş numuneler			23 °C'de suda kür edilmiş numuneler		
	KB	GKB1	GKB2	KB	GKB1	GKB2
3 gün	35,9 (2,87)*	35,4 (2,72)	35,1 (3,01)	36,1 (2,96)	36,8 (3,14)	35,8 (2,91)

7 gün	41,2 (2,93)	43,5 (2,94)	44,1 (3,83)	46,2 (1,77)	48,5 (3,45)	48,4 (2,76)
28 gün	60,1 (3,66)	59,8 (3,78)	58,6 (3,91)	65,7 (4,00)	64,6 (3,42)	62,7 (2,96)

**Standart sapma*

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde numune yaşından bağımsız olarak suda kür edilmiş numunelerin havada kür edilmiş numunelere kıyasla daha yüksek basınç dayanımı sonuçları sergilediği görülmektedir. Tüm karışımlar için geçerli olan bu durum numune yaşı arttıkça daha belirgin bir hal almıştır. Genel olarak, bulgular, karışım tasarımından bağımsız olarak, katkılı beton numunelerin, katkısız numunelerle karşılaştırılabilir basınç dayanımları sergilediğini göstermektedir. Her iki kür koşulunda da katkılı beton karışımlarında katkı kullanımına bağlı olarak sadece 28 günlük dayanım değerlerinde ihmal edilebilecek derecede düşüşler tespit edilmiştir. Katkı kullanımına bağlı olarak gözlemlenen bu düşüşler GKB2 numunelerinde nispeten daha belirgin olmuştur. 7 günlük numune yaşlarında katkı kullanımının basınç dayanımı sonuçlarını iyileştirdiği gözlemlenmiş olsa da genel olarak katkı kullanımına bağlı olarak basınç dayanımında gözlemlenen değişimler sınırlı olmuştur.

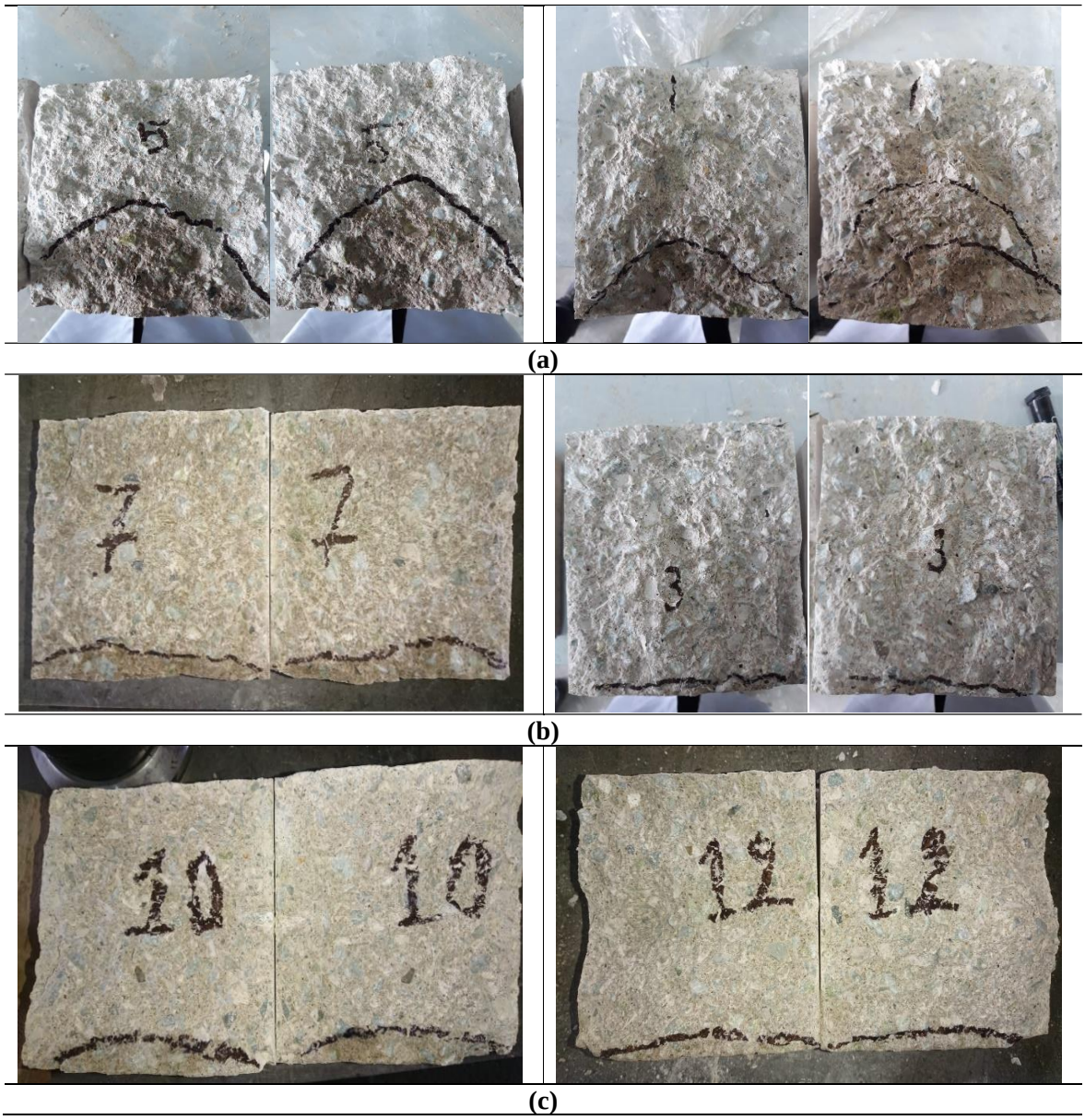
3.2. Basınçlı Su Geçirimlilik Testi

23 ºC'de laboratuvar şartlarında ve 23 ºC suda kür koşullarında 28 gün bekletilen katkılı ve katkısız beton numunelerine basınçlı su altında uygulanan su geçirimlilik testlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 5'te ve test numunelerine ait test sonrası görüntüler de Şekil 3'te sunulmuştur.

Tablo 5. Basınçlı su geçirimlilik deney sonuçları

Numuneler	**23 °C de havada kür edilmiş**	**23 °C de suda kür edilmiş**
	Ortalama Su Derinliği (mm)	Ortalama Su Derinliği (mm)
KB	69,0	44,7
GKB1	12,5	4,7
GKB2	15,0	9,5

Tablo 5'ten beton numunelerine ait basınçlı su geçirimlilik deney sonuçları incelendiğinde katkılı numuneler üzerinde gözlemlenen ortalama su derinliklerinin katkısız numunelere kıyasla oldukça düşük olduğu görülmektedir. Şekil 6'dan da işaretlenmiş su derinlikleri incelendiğinde katkı kullanımına bağlı olarak numune içerisindeki su hareketinin kısıtlandığı anlaşılmaktadır. Buradan katkı kullanımına bağlı olarak numunelerin mikroyapısının değiştiği, boşluk miktarının azaldığı ve buna bağlı olarak geçirimsizlik özelliklerinin kayda değer ölçüde iyileştiği açıkça söylenebilir. Katkılı numuneler kendi içerisinde kıyaslandığında GKB1'in GKB2'ye göre daha geçirimsiz bir özellikte olduğu söylenebilir. Kür koşulları açısından numunelerin basınçlı su geçirimlilik deney sonuçları incelendiğinde ise suda kürlenmiş numunelerin geçirimliliğinin daha düşük olduğu anlaşılmaktadır.



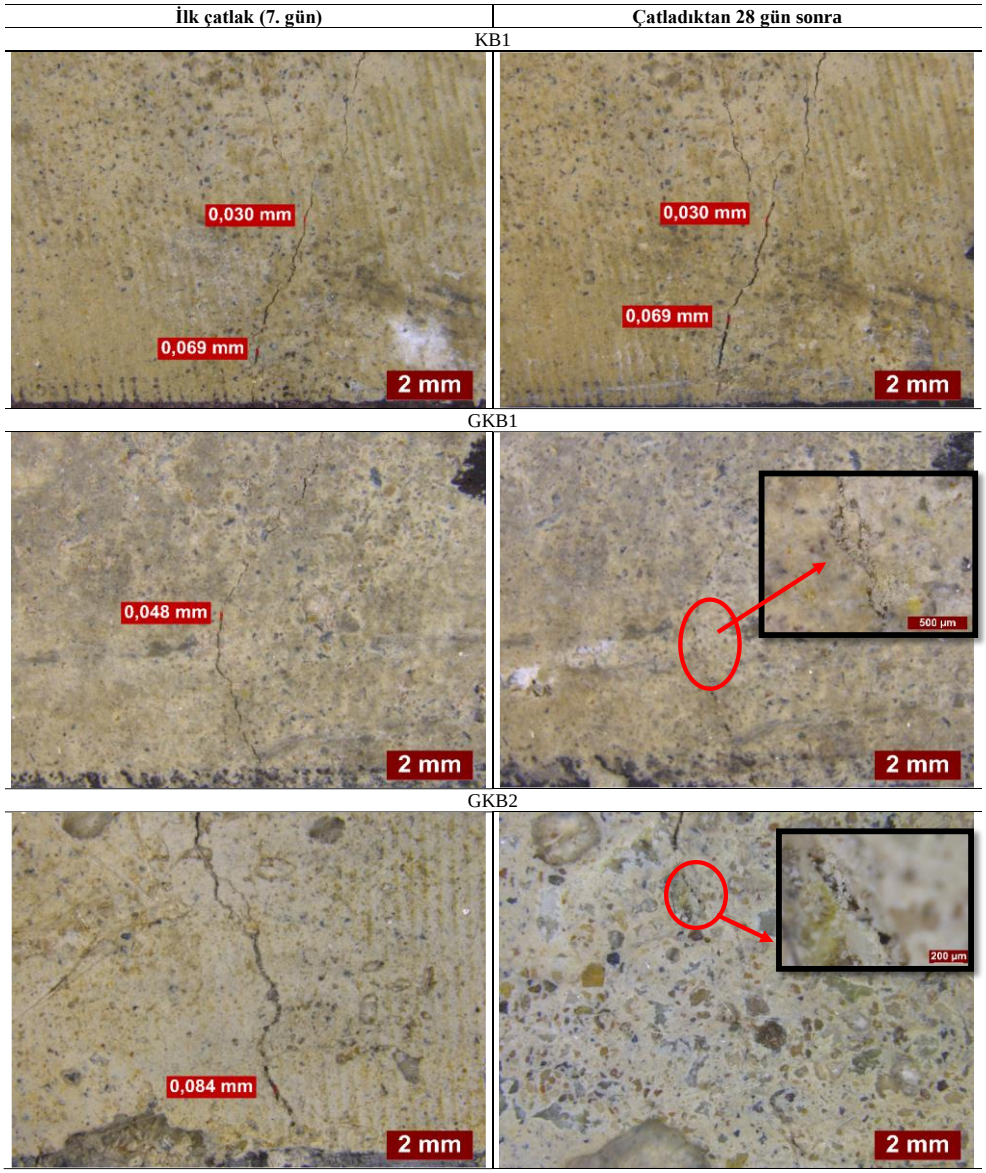
Şekil 3. Karışımlara ait ortalama su derinlikleri: **(a)** KB; **(b)** GKB1; **(c)** GKB2 [havada kür (sol), suda kür (sağ)]

3.3. Kılcal Geçirimlilik Testi

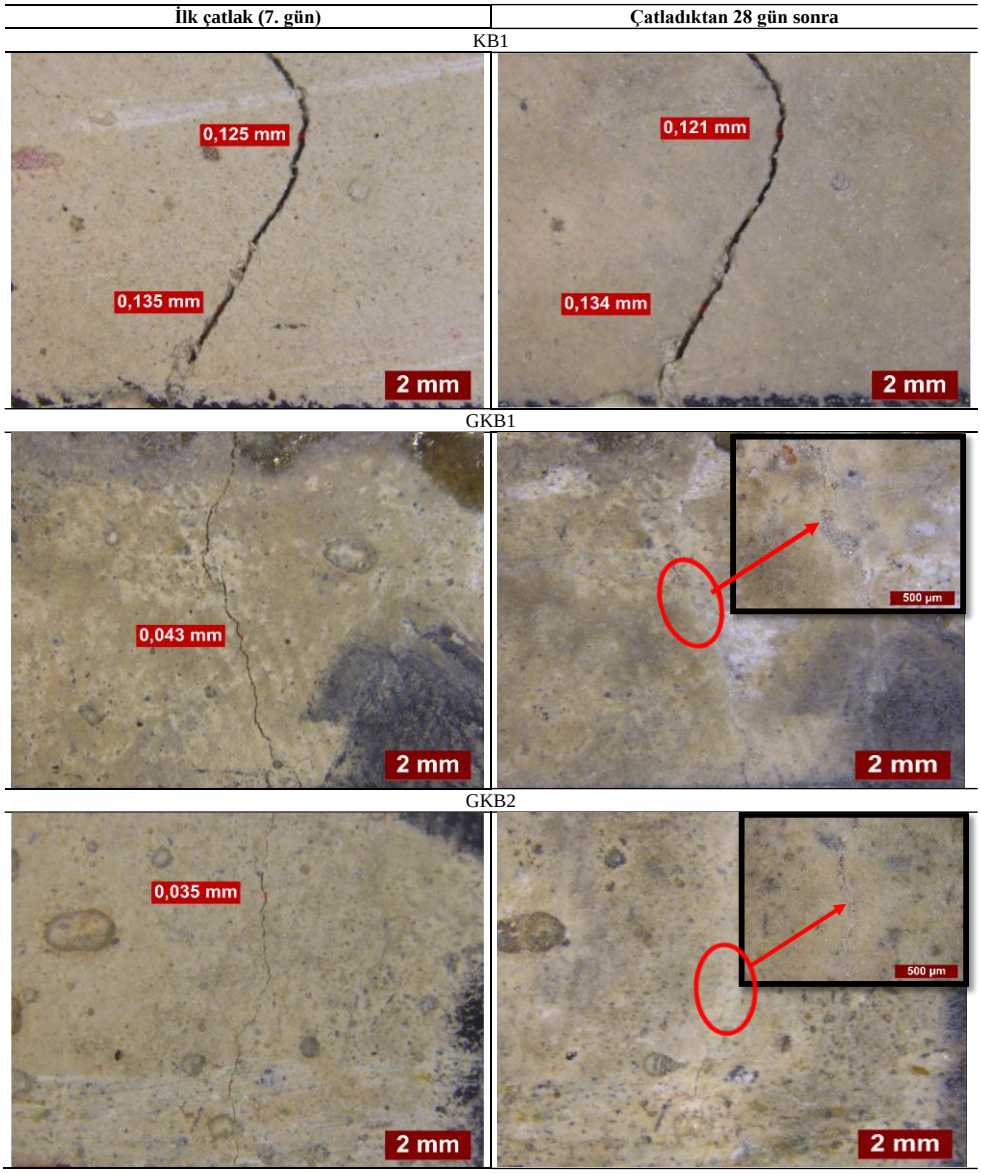
Katkılı ve katkısız numunelerden elde edilen ortalama kılcal geçirimlilik katsayı değerleri Tablo 6'da sunulmuştur. Ayrıca çatlak ölçümleri yapılan havada ve suda kür edilmiş numunelere ait görüntüler Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir. Katkısız numunelerden elde edilen ortalama kılcal geçirimlilik katsayı değerleri incelendiğinde çatlatıldıktan sonra 28 gün kadar devam eden kür sürecinin bu numunelerin kılcal geçirimliliğini azaltma yönünde kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Bu kılcal geçirimliliğin artan yaşa göre azalmaması durumu havada kür edilmiş katkısız numune için daha belirgin olmuştur. Aynı durum katkılı numuneler özelinde değerlendirildiğinde katkı kullanımına bağlı olarak çatlatılmış numunelerin geçirimliliğinin devam eden ilave kür süreci sonrasında azaldığı anlaşılmaktadır. Bu durum GKB1 karışımı için daha belirgin olmuştur ve kullanılan katkıların çatlatılmış beton numunelerinin mikroyapısını geçirimsizlik lehine iyileştirdiğini kanıtlamaktadır. Katkılı numuneler açısından kür türünün etkisi değerlendirildiğinde çatlatılmış beton numunelerinin geçirimliliklerinin suda kürleme sonrasında daha fazla iyileştiği anlaşılmaktadır. Şekil 4 ve Şekil 5'ten çatlak ölçümleri yapılan havada ve suda kür edilmiş numunelere ait görüntüler incelendiğinde ise kılcal geçirimlilik testine paralel olarak katkı kullanılmış beton numunelerin zamana bağlı olarak çatlaklarının inceldiği açıkça görülmektedir.

Tablo 6. Katkılı ve katkısız numunelerde ortalama kılcal geçirimlilik katsayıları [g/(m²×s)]

Numuneler	23°C de havada kür edilmiş numuneler			23°C de suda kür edilmiş numuneler		
	Çatladıktan Hemen Sonra	**Çatladıktan 28 gün Sonra**	**İyileşme yüzdesi**	**Çatladıktan Hemen Sonra**	**Çatladıktan 28 gün Sonra**	**İyileşme yüzdesi**
KB1	0,117	0,115	**%1,7**	0,10	0,096	**%4,00**
GKB1	0,135	0,100	**%25,9**	0,11	0,057	**%48,2**
GKB2	0,085	0,065	**%23,5**	0,097	0,060	**%38,1**



Şekil 4. 23 °C'de havada kür edilmiş numuneler



Şekil 5. 23°C'de suda kür edilmiş numuneler

3.4. Klor İyon Geçirimliliği Testi

Bu çalışma kapsamında katkılı ve katkısız olarak üretilmiş beton numunelerinin klor iyonundaki zamana ve katkı kullanımına bağlı olarak oluşan değişimler Tablo 7'de sunulmuştur. Sonuçlardan kür koşulundan bağımsız olarak artan yaş ile hızlı klorür iyonu geçirimlilik değerlerinin azaldığı görülmektedir. Her iki numune yaşı içinde havada kür edilmiş numunelerden daha yüksek hızlı klorür iyonu geçirimlilik değerleri elde edilmiştir. Bu sonuç daha önce detaylandırılan basınçlı su geçirimlilik testi ve kılcal geçirimlilik testi sonuçlarıyla paralellik göstermektedir. Katkı kullanımının beton numunelerin geçirimliliği üzerindeki etkileri açısından sonuçlar değerlendirildiğinde 3 gün ve 28 gün sonunda farklı eğilimler gözlemlenmiştir. 3 günlük sonuçlara göre katkı kullanımı beton numunelerinin hızlı klorür iyonu geçirimlilik değerlerini artırırken 28 günlük sonuçlara göre bu değerler katkı kullanımına bağlı olarak kayda değer düzeyde düşmüştür. ASTM C1202, hızlı klorür iyonu geçirimliliğini, hesaplanan Coulomb değerlerine dayanılarak, "Yüksek klor geçirgenliği"nden "İhmal edilebilir klor geçirgenliği"ne kadar olmak üzere beş sınıf olarak sınıflandırılmaktadır. Bu açıdan sonuçlar değerlendirildiğinde katkı kullanımı ile karışımların hızlı klorür iyonu geçirimliliği sınıfları 28 gün sonunda orta düzeyden çok düşük seviyesine geçmiştir. Her iki kür durumu içinde 28 gün sonunda en düşük hızlı klorür iyonu geçirimlilik değerleri GKB1 karışımından elde edilmiştir.

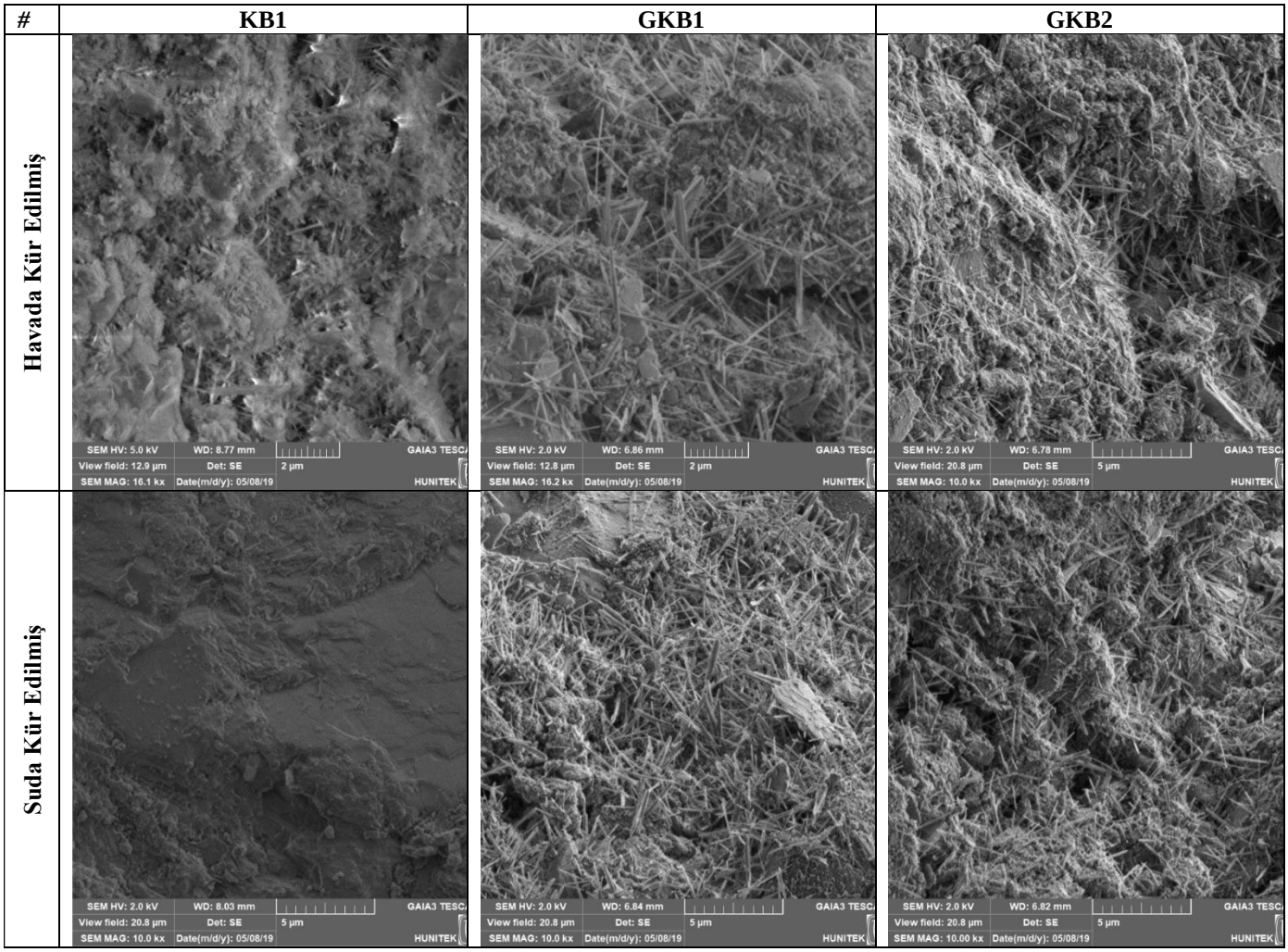
Tablo 7. Hızlı klorür iyonu geçirimlilik değerleri

Numuneler	**Geçen akım** Coulomb (Ortalama)*			
	23°C de havada kür edilmiş numuneler		23°C de suda kür edilmiş numuneler	
	3 gün	**28 gün**	**3 gün**	**28 gün**
KB1	2452	1120	2350	980
GKB1	2510	650	2410	520
GKB2	2550	720	2450	570

* Coulomb Değerlerine Göre Hızlı Klorür İyonu Geçirimliliği Sınıfları: >4.000: Yüksek, 2.000-4.000: Orta, 1.000-2.000: Düşük, 100-1.000 :Çok Düşük, <100: İhmal Edilebilir (ASTM C1202)

3.5. Mikroyapısal Analiz Testi

Katkısız ve kristalize geçirimsizlik katkıları kullanılarak oluşturulan numunelerden 28 gün sonunda taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilen görüntüler Şekil 6'da gösterilmiştir. Görüntülerden katkılı beton karışımlarında katkı kullanımına bağlı olarak ciddi oranda kristal oluşumu tespit edilmiştir.



Şekil 6. SEM analizi sonuçları

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, iki farklı kristalize geçirimsizlik katkısının beton malzemesinin geçirimlilik ve taşıma özellikleri üzerindeki etkisi basınç dayanımı, kılcal geçirimlilik, basınçlı su geçirimliliği ve klor iyon geçirimliliği deneyleri ile araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Katkı kullanımına bağlı olarak basınç dayanımlarında gözlemlenen değişimler sınırlı olmuştur. 7 günlük numunelerde katkı kullanımının basınç dayanımı sonuçlarını iyileştirdiği gözlemlenmişken 28 günlük numunelerin dayanım değerlerinde ihmal edilebilecek derecede düşüşler tespit edilmiştir.

- Basınçlı su geçirimliliği deney sonuçlarından geçirimsizlik katkısı kullanımına bağlı olarak numunelerin mikroyapısının değiştiği, boşluk miktarının azaldığı ve buna bağlı olarak geçirimsizlik özelliklerinin kayda değer ölçüde iyileştiği görülmüştür. Katkı kullanılan numunelerde katkı kullanılmayan numunelere kıyasla daha kısa mesafede su nüfuzu olmuştur.
- Kılcal geçirimlilik deneyi sonuçları çatlatılmış numunelerin geçirimliliğinin katkı kullanımına bağlı olarak devam eden ilave kür süreci sonrasında azaldığını ortaya koymaktadır. Yapılan görsel incelemelerden katkı kullanılmış beton numunelerin zamana bağlı olarak çatlaklarının katkı kullanımına bağlı olarak inceldiği görülmüştür.
- Geçirimsizlik katkısı kullanımı 28 gün sonunda beton numunelerinin hızlı klorür iyonu geçirimlilik değerlerini kayda değer düzeyde düşürmüştür.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, geçirimsizlik katkısı kullanımının geçirimliliği azaltma konusunda oldukça etkili olduğunu kanıtlamaktadır. Buradan geçirimsizlik katkılarının beton malzemesinin dayanıklılık özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılabileceği açıkça anlaşılmaktadır.

Referanslar

ACI Committee, (2016). Report On Chemical Admixtures For Concrete, 212, ACI International.

Al-Akhras, N., Makableh, Y., & Dagamseh, D. A. (2022). Evaluating composite nanomaterials to control corrosion of reinforcing steel using different tests. Case Studies in Construction Materials, 16, e00963. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e00963

Alexander, M. G., & Stanish, K. (2005, August). Durability design and specification of reinforced concrete structures using a multi-factor approach. In Mindess Symposium, Third Int. Conference on Construction Materials, Vancouver.

Almusallam, A. A., Khan, F. M., Dulaijan, S. U., & Al-Amoudi, O. S. B. (2003). Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability. Cement and concrete composites, 25(4-5), 473-481. doi: 10.1016/S0958-9465(02)00087-2

Basheer, L., Kropp, J., & Cleland, D. J. (2001). Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. Construction and building materials, 15(2-3), 93-103. doi: 10.1016/S0950-0618(00)00058-1

Beeldens, A., & Vandewalle, L. (2001). Durability of high strength concrete for highway pavement restoration. In Third International Conference on Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading-CONSEC 01 (pp. 1230-1238).

Bossio, A., Faella, G., Frunzio, G., Guadagnuolo, M., & Serpieri, R. (2021). Diagnostic reliability in the assessment of degradation in precast concrete elements. Infrastructures, 6(11), 164. doi: 10.3390/infrastructures6110164

Chang, P. K., Peng, Y. N., & Hwang, C. L. (2001). A design consideration for durability of high-performance concrete. Cement and Concrete Composites, 23(4-5), 375-380. doi: 10.1016/S0958-9465(00)00089-5

Gojević, A., Ducman, V., Netinger Grubeša, I., Baričević, A., & Banjad Pečur, I. (2021). The effect of crystalline waterproofing admixtures on the self-healing and permeability of concrete. Materials, 14(8), 1860. doi: 10.3390/ma14081860

Hassani, M., Vessalas, K., Sirivivatnanon, V., & Baweja, D. (2017). Influence of permeability-reducing admixtures on water penetration in concrete. ACI Mater. J, 114, 911-922.

Hwang, C. L., Liu, J. J., Lee, L. S., & Lin, F. Y. (1996). Densified mixture design algorithm and early properties of high performance concrete. Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering, 8(2), 217-219.

Jiang, Z. L., Pan, Y. J., Lu, J. F., & Wang, Y. C. (2022). Pore structure characterization of cement paste by different experimental methods and its influence on permeability evaluation. Cement and Concrete Research, 159, 106892. doi: 10.1016/j.cemconres.2022.106892

Kubal, M. T. (2000). Construction Waterproofing Handbook, McGraw-Hill, 544.

Kumar, M., Anand, A., Chatterjee, R., Sharma, S., Maiti, T. K., Dwivedi, S. P., Saxena, A., Li, C., & Eldin, E. M. T. (2022). Investigation on Carbonation and Permeability of Concrete with Rice Hush Ash and Shop Solution Addition. Materials, 15(17), 6149. doi: 10.3390/ma15176149

Lohtia, R., Joshi, R., & Ramachandran, V. (1995). Concrete Admixtures Handbook—Properties. Science and Technology. Second edition, Noyes Publications, Park Ridge, NJ, 1153.

Liu, B., Qin, J., & Sun, M. (2019). Influence of silane-based impregnation agent on the permeability of concretes. KSCE Journal of Civil Engineering, 23, 3443-3450. doi: 10.1007/s12205-019-1121-z

Mailvaganam, N. P., Rixom, M. R., Manson, D. P., & Gonzales, C. (1999). Chemical admixtures for concrete. E&FN Spon, London, UK, 437.

Matar, P., & Barhoun, J. (2020). Effects of waterproofing admixture on the compressive strength and permeability of recycled aggregate concrete. Journal of Building Engineering, 32, 101521. doi: 10.1016/j.jobe.2020.101521

Mehta, P. K., & Burrows, R. W. (2001). Building durable structures in the 21st century. Concrete international, 23(3), 57-63.

Mehta, P.K., (1986). "Concrete: structure, properties, and materials" Prentice-Hall. Englewood Cliffs, New Jersey. 353-367.

Muhammad, N. Z., Keyvanfar, A., Majid, M. Z. A., Shafaghat, A., & Mirza, J. (2015). Waterproof performance of concrete: A critical review on implemented approaches. Construction and Building Materials, 101, 80-90. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.048

Munn, R. L.; Kao, G.; & Chang, Z. T. (2003), "Performance and Compatibility of Permeability Reducing and Other Chemical Admixtures in Australian Concretes," Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, SP-217, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 361-379.

Nematzadeh, A., Aytekin, B., & Mardani-Aghabaglou, A. (2021). Effect of mineral additives and permeability reducing admixtures having different action mechanisms on mechanical and durability performance of cementitious systems. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 15(5), 1277-1291. doi: 10.1007/s11709-021-1752-2

Nyame, B. K., & Illston, J. M. (1981). Relationships between permeability and pore structure of hardened cement paste. Magazine of Concrete Research, 33(116), 139-146. doi: 10.1680/macr.1981.33.116.139

Oh, B. H., Cha, S. W., Jang, B. S., & Jang, S. Y. (2002). Development of high-performance concrete having high resistance to chloride penetration. Nuclear Engineering and Design, 212(1-3), 221-231. doi: 10.1016/S0029-5493(01)00484-8

Pal, S., Shariq, M., Abbas, H., Pandit, A. K., & Masood, A. (2020). Strength characteristics and microstructure of hooked-end steel fiber reinforced concrete containing fly ash, bottom ash and their combination. Construction and Building Materials, 247, 118530. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118530

Rathore, K., Agrawal, V., & Nagar, R. (2022). Effect of waste sandstone microfines on mechanical strength, abrasion resistance, and permeability properties of concrete. Materials Today: Proceedings, 61, 571-578. doi: 10.1016/j.matpr.2022.02.299

Saran, O., & Demiröz, A. (2023). Enhancement of the Strength and Permeability Properties of an Expansive Soil Using Chopped Basalt Fibers and Silica Fume. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 9(1), 9. doi: 10.1007/s40891-023-00431-4

Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., & Fang, Z. (2015). A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. Construction and Building Materials, 101, 741-751. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088

Skoglund, P., & Johansson, L. (2003). "Research Regarding the Automatic Correction (Self-Healing) of Cracks in Concrete," Project No. 2003-75, Swedish Cement and Concrete Institute.

Tibbetts, C. M., Riding, K. A., & Ferraro, C. C. (2021). A critical review of the testing and benefits of permeability-reducing admixtures for use in concrete. Cement, 6, 100016. doi: 10.1016/j.cement.2021.100016

MÜHENDİSLİK MİMARLIK FAKÜLTESİ

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

UMAGD, (2023) 15(2), 484-496.

10.29137/umagd. 1159523

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Sahaya Özgü Yer Hareketinin Tarihi Yığma Yapıların Doğrusal Olmayan Dinamik Davranışı ve Sismik Kırılganlığı Üzerindeki Etkisi

The influence of Site Specific Ground Motion on the Nonlinear Dynamic Response and Seismic Vulnerability of Historical Masonry Structures

Özden Saygılı[1]

[1]*Yeditepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26 Ağustos Yerleşimi, Kayışdağı Cad. 34755 Ataşehir, İstanbul, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 08/08/2023* ***Kabul / Accepted**:22/03/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 06/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: xx/xx/xxxx*

Öz

Sismik olarak aktif bölgelerde yer alan ve çok sayıda tarihi yığma anıta sahip ülkelerde bu yapıların korunması büyük önem taşımaktadır. Bu yapıların korunması ve bakımı kültürel, ekonomik ve sosyal bir ihtiyaç olduğundan, tarihi yığma yapıların sismik performansının değerlendirilmesi ele alınması gereken çok önemli bir konudur. Bu tür yapıların yatay deprem yükleri altındaki davranışı, dolgulu ve dolgusuz duvarların etkileşimi nedeniyle karmaşıktır. İstanbul'daki tarihi ve aletsel depremlerin ardından, bu yapıların deprem yüklerine karşı savunmasızlığını gösteren çok sayıda ciddi hasar ve göçme meydana geldiği görülmüştür. Bu çalışmada, İstanbul' un Üsküdar semtinde bulunan Rumi Mehmed Paşa adlı tarihi bir kâgir yapının sismik performansı araştırılmıştır. 3DEC programı kullanılarak tarihi yığma türbenin üç boyutlu sayısal modeli Ayrık Elemanlar Yöntemi (AEY) ile oluşturulmuştur. Bu tarihi yapının sismik performansını değerlendirmek için 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne uygun 11 deprem yer hareketi seçilmiş ve ölçeklendirilmiştir. Statik, modal ve birbirine dik iki yatay doğrultudaki deprem kayıtları altında doğrusal olmayan dinamik analizler yapılmıştır. Bu çalışma, ayrık eleman modellerinin yığma yapıların performans değerlendirmesi için uygun bir yöntem olduğunu göstermektedir. Ayrıca, kuvvetli yer hareketleri altında, ayrık eleman modelinin beklenen hasar seviyeleri ve göçme mekanizmaları hakkında bir fikir verdiği görülmektedir. Çalışma, yığma yapıların sismik davranışının yapısal tasarım özelliklerine çok bağlı olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler

"Sismik kırılganlık, Kültürel miras, Olasılıksal sismik tehlike analizi, Ayrık elemanlar yöntemi"

Abstract

There are countries with a significant number of historic masonry monuments located in seismically active areas and the preservation of these structures is of great importance. Because the preservation and upkeep of these structures is a cultural, economic, and social need, seismic performance evaluation of historical masonry structures is a crucial issue to address. The behavior of such structures under lateral seismic loads is complicated because of the interaction of the grouted and ungrouted masonry. A wide number of severe damages and collapses have been observed after historical and instrumental earthquakes in Istanbul, highlighting the vulnerability of these structures to seismic loads. This research investigates the seismic performance of a historical masonry structure named Rumi Mehmed Pasha located in the city center of Istanbul (Turkiye). A three-dimensional Discrete Element Model (DEM) of the historical tomb was created in 3DEC. Eleven earthquake ground motions compatible 2018 Turkish Building Seismic Code were selected and scaled to evaluate the seismic performance of the numerical model. Static, modal, and nonlinear dynamic analyses were performed. This study shows that discrete element models are very appropriate tools for the safety evaluation of masonry structures. Furthermore, under strong ground motions, the DEM model provides an insight into the levels of damage and the collapse patterns to be expected. The study shows that the seismic behavior of masonry structures is very dependent on their structural design features.

Key Words

***Sorumlu Yazar:** ozden.saygili@yeditepe.edu.tr*

1. Giriş

Rumi Mehmed Paşa Türbesi, İstanbul Boğazı'nın Anadolu kıyısında, Üsküdar semtinde bulunan Rumi Mehmed Paşa Cami Külliyesi' nin bir parçasıdır (Tchernega 2018)(Şekil 1). Türbenin kesin yapım tarihi bilinmemekle birlikte, yaklaşık inşa tarihi cami külliyesinin inşasıyla bağlantılıdır. Bazı kaynaklara göre türbe, Rumi Mehmed Paşa'nın ölümünden sonra yaptırılmıştır (Babinger 1992, Goodwin 2003, Kafescioğlu 2009). Sekizgen bir plana sahip olan türbenin duvarları kesme taş, moloz taş ve tuğla ile örülmüştür. Boşluklar harçla doldurulmuştur. Dış yüzey beyaz/açık gri renkli ince kesme taş ile kaplanmıştır. Duvarların iç yüzeyi moloz taş ve tuğladan yapılmıştır. Taşların kabaca kesilmiş olduğu, küçük yuvarlak parçalardan büyük dikdörtgen bloklara kadar çeşitli boyutlarda oluştuğu görülmektedir. Yaşanan depremlerden ve çevresel koşullardan kaynaklı yapının dış cephesinde bazı yapısal çatlaklar ve hasarlar bulunmaktadır.



Şekil 1. Rumi Mehmed Paşa Türbesi (Tchernega 2018).

Kuzey Anadolu Fay (KAF) zonunda özellikle son deprem serilerinin dikkate değer analizleri, KAF'ın Marmara Denizi bölümünün gerilme birikimine eğilimli olduğunu ortaya koymaktadır. Önümüzdeki 30 yıl içinde KAF boyunca büyük bir deprem olasılığının %50 olduğunu göstermektedir (Şengör vd. 2005). Jeolojik ve paleosismolojik veriler, son 103-105 yılda KAF üzerindeki kayma hızının 15-22 mm/yıl olduğunu göstermektedir (Hubert-Ferrari vd. 2000, Kozacı vd. 2009, Rockwell 2009). GPS çalışmaları, fay zonu boyunca kayma hızını 15–25 mm/yıl olarak göstermektedir (McClusky vd. 2000, Meade 2002). Son çalışmalarda, KAF bölgesi boyunca doğudan batıya 25 mm/yıl' dan 17 mm/yıl'a yavaşlayan bir eğilim olduğu görülmektedir (Reilinger vd. 1997, Tatar vd. 1995). Bu çalışma, beklenen Marmara depreminin etkilerini en aza indirmek amacı ile Tarihi Rumi Mehmed Paşa türbesinin yapısal performansını bölgenin sismik aktivite özelliklerini de dikkate alarak araştırmayı hedeflemektedir. Çalışmanın ilk aşamasında yer hareketinin belli bir yerde ve belli bir zaman periyodu içerisinde meydana gelme olasılığının belirlenmesi için olasılıksal sismik tehlike analizi yapılmıştır. Olasılıksal tehlike analizinde depremlerin zamansal oluşumları için hafızalı veya hafızasız şeklinde iki farklı tahmin modelleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada deprem oluşumunun hafızasız olduğu bir tahmin modeli olarak, depremlerin zaman içindeki oluşumlarını birbirinden bağımsız kabul eden Poisson modeli kullanılmıştır. Bu modele göre bir depremin olma olasılığı, zaman aralığının uzunluğu ile doğru orantılıdır ve kısa bir zaman aralığında birden fazla olayın oluşma olasılığı ihmal edilebilir küçüklüktedir. Çalışmanın bu aşamasında seçilen inceleme bölgesinde etki yaratabilecek her bir kaynakta oluşabilecek her büyüklük ve her uzaklıktaki depremin oluşturacağı her bir senaryo için yer hareketi seviyesi ve her bir parametre için yer hareketi seviyesindeki yıllık aşılma olasılıkları belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar kullanılarak yapının bulunduğu bölgenin yer hareketi düzeyi, deprem büyüklüğü, yerel zemin koşulları gibi özellikler dikkate alınarak hedef tasarım spektrumu ile uygun olacak yer hareketi kayıtları seçilmiştir. Ayrık elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan sayısal modelde zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların, kültür varlığının devamlılığına, aynı zamanda ekonomik olarak da tarihi yapıların korunmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. Çalışma Bölgesinin Tektonik Yapısı

Anadolu Levhası, Arap ve Afrika Levhalarının Avrasya ile çarpışma bölgesinde ve Alp Himalaya sismik kuşağı üzerinde bulunmaktadır. Arap ve Afrika Levhalarının Avrasya ile çarpışması Anadolu levhasının batıya doğru hareketine yol açmakta ve batıda açılma doğuda sıkışma oluşturmaktadır. Marmara Bölgesi, Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) tarafından meydana gelen doğrultu atımı ve Batı Anadolu'da kuzey güney yönlü açılma rejiminin etkisindedir. Türkiye' nin batısında bulunan Mudurnu'dan doğusunda yer alan Karlıova'ya kadar devam eden KAFZ, Mudurnu'da üç kola ayrılmakta ve Marmara Bölgesi'nden geçmektedir. Saros Körfezi'nin batısında başlayan açılma rejimi Ege Denizi'nin kuzeyinden Yunanistan'a kadar devam etmektedir (Barka 1992, Görür vd. 1997, Yaltırak ve Okay 2000, Anastasia ve Louvari 2001). Karmaşık bir tektonik yapıya sahip olan bu bölgede KAFZ, Marmara Denizi'nde kuzey ve güney olmak üzere iki koldan oluşmaktadır. Kuzey kolu KAFZ'nin etkisindedir ve bu kol üzerinde, 1100 m derinlik üzerinde, Çınarcık Havzası, Orta Marmara Havzası ve Tekirdağ Havzası bulunmaktadır (Le Pichon vd. 2001, Imren vd. 2001). Türkiye'nin kuzeybatısındaki açılma ve doğrultu atımlı rejimin bilinmesi Marmara Denizi'ndeki havza gelişiminin ve mekanizmasının anlaşılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu rejim ile ilgili çeşitli araştırmacılar farklı görüşler ortaya atmıştır. Seyitoğlu ve Scott (1991) tarafından Batı Anadolu'daki açılma rejimi erken Miyosen döneminde başladığı ve halen devam ettiği öne sürülürken, Koçyiğit vd. (1999) tarafından, Batı Anadolu'daki açılma rejimi erken Miyosen döneminden beri aktif olduğu, ancak erken Piliyosen dönemindeki sıkışma ile yarıda kesildiği ortaya konmuştur. KAFZ'nin yaşı ile ilgili ortak fikir ise, Geç – Orta Pliyosen dönem olduğudur. Kuzey Marmara havzası 70 km genişliğindeki iki doğrultu atımlı fay arasında yer almaktadır. Bu havza her ikisi de benzer büyüklükte (M 7.4) olan son depremler sırasında tamamen sağ yanal hareketle ve net yüzey yırtılması ile kırılmıştır. Bu depremlerden biri Marmara Denizi'nin batısında Çanakkale Boğazı'nı parçalayan 1912 Ganos depremi; ikincisi 1999 yılında Marmara Denizi'nin doğusunda kırılan İzmit depremidir. Daha küçük ölçekte, kuzey Marmara'daki eğik fay sistemi, Marmara'nın geri kalanından daha güçlü olan ve aktif çökmeye sahip üç derin havzayı sınırlayan daha küçük basamaklardan oluşmaktadır. Alternatif tektonik çalışmaların bir kısmı Marmara'daki genişlemenin, yerel çek-ayır gerilme ile değil, Ege'deki yaygın genişleme ile ilişkili olduğunu vurgulanmaktadır (Parke vd. 2002). Ancak yeni gözlemler bu tür görüşleri desteklememektedir. Bölgesel ölçekteki jeoloji, morfoloji ve GPS sonuçları, Marmara Denizi bölgesinin sonlu deformasyonunda önemli bir rol oynadığı için önemli Ege uzantısını hariç tutmaktadır. Başka bir çalışma grubu, Marmara boyunca uzanan tek bir fay üzerinde alternatif olarak saf doğrultu atımı önererek hâlihazırda aktif olan genişlemeyi reddetmektedir (Le Pichon vd. 2001). Bu fay için art arda karmaşıklığı artan farklı geometriler önerilmiştir (Le Pichon vd. 2001, Imren vd. 2001). Ayrıca doğrultu atımlı faylanmanın, KAF'nın Marmara Denizi'ndeki büyük bir tektonik yeniden yapılanma ile eş zamanlı olarak bölgeyi yakın zamanda (200 bin) geçeceği iddia edilmiştir. Dolayısıyla, bu bölgedeki KAF üzerindeki hareket, yalnızca küçük bir toplam kayma (4 km sağ yanal kayma) üretmiştir (Şengör vd. 2005). Le Pichon vd. (2001) tarafından önerilen saf doğrultu atımlı fayın yorumuna uygun olarak, rijit bir "Marmara bloğu" tanımlayan kinematik modeller çıkarılmıştır. Bu modeller, GPS vektörlerine iyi bir uyum üretirken, kinematik olarak o fayın iyi bilinen hareketiyle ve bölge için mevcut en iyi kısıtlı deprem mekanizmasıyla (1999 İzmit depremi; Mw 7.4) tutarsız olduğu görünmektedir. Çünkü genişlemeli Marmara basamağı içinde elde ettikleri saf doğrultu atımlı hareket, doğrultu atımlı İzmit fayı boyunca büyük bir sıkıştırma üretmektedir (5–6 mm/yıl'a kadar). Ancak tek başına GPS verileri kesin bir değerlendirme sonucu sağlamamaktadır. GPS vektörlerine iyi bir uyum sağlayan, ancak aynı zamanda Marmara bölgesindeki net kinematik kısıtlamaları da içeren modellerin çek-ayır uzatma ve kaymalı bölümleme gerektirdiği gösterilmiştir (Flerit vd. 2004). 1912 Ganos ve 1999 İzmit depremleri, normal ve sağ yanal hareketi birleştiren, kuzey Marmara boyunca adım atan 160 km uzunluğundaki birbirine bağlı denizaltı fay segmentlerini kapsamaktadır. Daha önce, bu denizaltı uzantısının 20. yüzyılda yırtılmadığı ve bu nedenle kuzey Marmara bölgesindeki tektonik yüklemenin muhtemelen eşit derecede yüksek olacağı varsayılmıştı (Hubert-Ferrari vd. 2000). Ancak 1912 ve 1999 depremlerinin her ikisinin de Marmara Denizi'ne uzandığı görülmektedir. İzmit depremi için, denizaltı batı ucu, jeodezisi, özellikle İzmit Körfezi'ni çevreleyen kara alanlarındaki uzak alan yüzey deformasyonunu belgeleyen SAR interferometrisi ile oldukça iyi bir şekilde çözülmüştür. Yırtılma, 2 m'den sıfıra doğru sivrilen kayma ile Hersek yarımadasının en fazla 30 km batısında Marmara Denizi'ne yayılmıştır. 1912 Ganos depremi için karadaki yırtılmanın doğrudan gözlemleri esas olarak Mihailovich tarafından rapor edilmiştir (Mihailovich 1927). Hasar dağılımını ve saha gözlemlerini kullanan daha sonraki revizyonlar yırtılmanın bilinmeyen ölçüde olsa da Marmara Denizi'ne doğru yayıldığını göstermektedir (Ambraseys and Finkel 1987). Nitekim büyük tarihi depremlerin (1509, 1719, Mayıs 1766, Ağustos 1766, 1894) kuzey Marmara Denizi'nin altında kısmen veya tamamen parçalandığı öne sürülmüştür. Ancak denizaltı kopma geometrileri ve konumlarına ilişkin somut kanıtlar eksiktir. Genel olarak 18. yüzyıl istifinin KAF'ın bu bölümünü tamamen kırdığı ve bu nedenle o zamandan beri tektonik yüklemenin biriktiği ve Kuzey Marmara havzasında önemli bir kırılma ile rahatlamadığı varsayılmaktadır (Le Pichon vd. 2001). Bu görüş, büyük tarihi depremlerin olası yerlerini yeniden değerlendiren ve orta ve batı Marmara'da çok daha uzun bir durgunluk olduğunu öne süren Ambraseys ve Jackson (2002) tarafından sorgulanmıştır.

17 Ağustos 1999 İzmit depremi, 1939 Erzincan depreminden bu yana Kuzey Anadolu fayı boyunca batıya göç eden depremlerin yedinci depremidir. 17 Ağustos 1999 İzmit depreminin kırılma bölgesi, her biri 1-4 km genişliğinde basamaklar bırakılarak ayrılan beş geometrik parçadan oluşmaktadır. Basamak alanları İzmit Körfezi'ndeki göller veya havzalar ile ifade edilmektedir. Çek-ayır alanlarda doğrultu atımlı segmentleri birbirine bağlayan normal faylar boyunca maksimum 235 cm düşey öteleme oluşmuştur. Bu ötelemenin, İzmit-Gölcük havzası ve Karamürsel havzasındaki açık denizlerde daha fazla olabileceği düşünülmektedir (Barka 1992). GPS çalışmaları Kuzey Anadolu fayının bu bölümündeki kayma hızının yaklaşık 23 mm/yıl olduğunu ve bu miktarın yaklaşık 20 mm/yılının kuzey kolu tarafından alındığını göstermektedir (McClusky vd. 2000). Kuzey kolun bu bölümünde bilinen son büyük artçı deprem 1719 depremidir. O zamandan beri bu segmentte 5-6 m'lik kayma birikmiş olabileceği düşülmektedir. Yüzeyde ölçülen maksimum kayma, Gölcük'te 470 cm ve Arifiye yakınlarında 520 cm, 1719'dan bu yana biriken miktarla karşılaştırılabilmektedir. 1719 depreminden sonra 1754, Mayıs 1766 ve Ağustos 1766 depremleri, Adapazarı'ndan Saroz Körfezi'ne kadar olan kuzey kolunun segmentleri boyunca Marmara Denizi'ni bir sıra halinde geçerek tam bir kopmaya neden olmuştur.

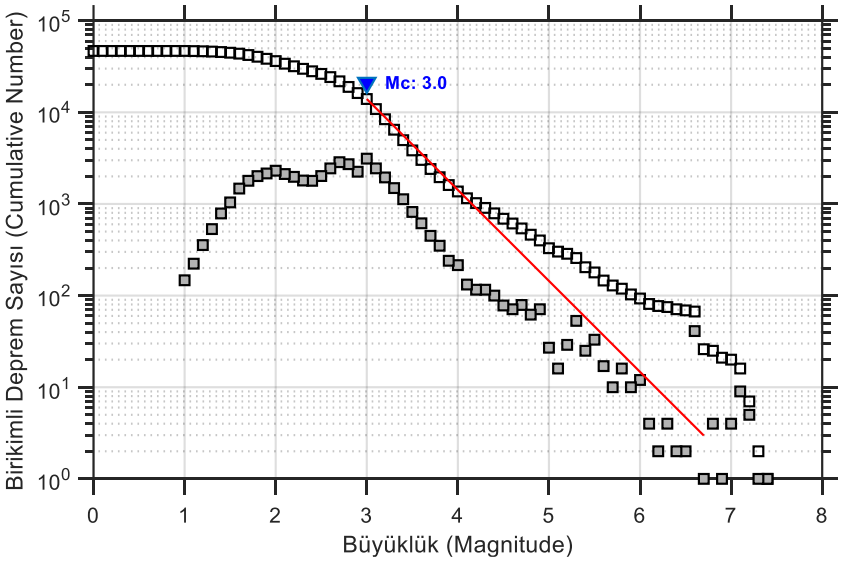
2. Çalışma Bölgesinin Depremselliği

Tarihsel (aletsel olmayan) depremlerin tanınması, çeşitli tarihi belge ve kaynaklardan ve saha gözlemlerinden elde edilmiştir. Ancak, belirlenen şiddet ve büyüklükler çok doğru değildir ve yalnızca bölgenin sismisitesinin bir açıklamasıdır. Bu bağlamda, tarihi depremlerin incelenmesi, bir fay boyunca meydana gelen depremlerin dönüş periyodu gibi önemli faktörlerin belirlenmesinde etkili olabilir. Tarihsel depremler konum, şiddet ve büyüklük açısından çok daha yüksek belirsizliğe sahip olsa da bölgedeki sismisite hakkında genel bir bakış elde etmek için faydalıdırlar. Bu depremlerden bazıları yüzeysel kırıklarla ilişkilendirilirken, bazılarında yüzey kırığı oluştuğuna dair bir kanıt bulunmamıştır. Tarihsel depremlerden en önemlileri ve Marmara Denizi ve çevresinin tektonik özelliklerini ortaya çıkaracak nitelikteki depremleri 1509, 1766, 1894 tarihlerinde oluşanlardır. Marmara Denizi'ndeki son depremler sırasıyla Mayıs 1766 ve 1894'te Orta Marmara Denizi ve Çınarcık havzasında meydana gelmiştir. Tarihsel dönem içerisinde, KAF zonundan 46 büyük depremin meydana geldiği tahmin edilmektedir ve bu depremlerin çoğu Marmara bölgesinde yoğunlaşmaktadır (Ambraseys and Jackson 2002). Bu veriler 967 ile 1050 yılları arasında Merkez KAF boyunca ve 1719 ile 1766 yılları arasında Batı KAF boyunca meydana geldiğini göstermektedir. Aletsel depremler, bilgileri sismik cihazlarla elde edilen depremlerdir. Yirminci yüzyılın ilk on yıllarına ait aletsel verilerde depremin merkez üssü, büyüklüğü, derinliği ve zamanıyla ilgili çeşitli hatalar bulunmaktadır. Aletsel hataları bilimsel yöntemlerle düzeltilen depremlere düzeltilmiş depremler denir. Cihazların tamamlanması ve sismik istasyon sayısının artması ile özellikle büyük depremlerde bu hatalar azalmıştır.

KAFZ'nun kuzey kolunda meydana gelen depremlerin ağırlıklı olarak doğrusal dağılım gösterirken, güney ve orta kolu üzerinde meydana gelen depremlerin daha dağınık olduğu görülmektedir. Bu kollar üzerinde 1953, 1964, 1969, 1983 yıllarında büyük depremler yaşanmıştır. KAFZ üzerinde büyüklüğü 7'den fazla olan depremlerin doğudan batıya doğru göç ettiği yaklaşımı ortaya konulmaktadır (Hubert-Ferrari vd. 2000). Bu depremlerin ilki, 26 Aralık 1939'da Erzincan'da meydana gelmiştir (M=7.9). Bununla beraber sırasıyla 1912 yılında Mürefte (M=7.3), 20 Aralık 1942 Erbaa – Niksar (M=7), 26 Kasım 1943 Tosya-Ladik (M=7.2), 1 Şubat 1944 Bolu-Gerede (M=7.2), 26 Mayıs 1957 Bolu-Abant (M=7.1), 22 Temmuz 1967 (M=7.2) olarak sıralanmışlardır. Gölcük Depremi, 17 Ağustos 1999 Mw=7.4 büyüklüğünde meydana gelmiştir. Depremin odak merkezi İzmit Gölcük'tür. Yüzey dalgası büyüklüğü Ms=7.8'dir. Meydana gelen depremin odak derinliği ise 17 km'dir. Deprem 125 km uzunluğunda sağ yanal atımlı bir yüzey kırığı meydana getirmiştir. 1999 İzmit depreminin modellemesi, bu depremin, kuzey kolun batı devamı olan Yalova segmenti ve Marmara Denizi'ndeki diğer segmentler üzerindeki deprem tehlikesini artırdığını göstermektedir (Hubert-Ferrari vd. 2000). Yaklaşık 3 ay sonra 12 Kasım 1999'da M 7.2 Düzce depremi olarak kırılan Düzce-Hendek fayının doğu kesiminde Düzce-Bolu segmenti üzerindeki stresi de artırmıştır. 17 Ağustos 1999 İzmit depremi çalışması, GPS kayma oranı, tarihi deprem kayıtları ve Coulomb modellemesi, Marmara Denizi'nde önemli bir deprem tehlikesi olduğunu göstermektedir (Hubert-Ferrari vd. 2000).

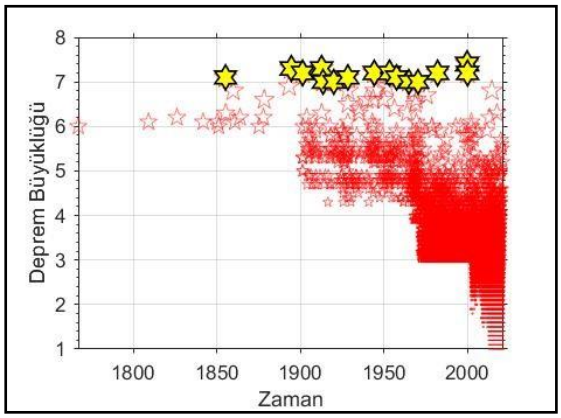
3. Sismik Tehlike Analizi

Bu çalışma MÖ 342-1894 yılları arasında 38°-45°K enlemleri ile 25°-33°D boylamlarının sınırladığı Marmara Bölgesinde meydana gelmiş tarihi depremleri ve 1900-2021 yılları arasında meydana gelmiş aletsel depremlerle ilgili bilgileri içermektedir. Deprem kataloğunun oluşturulmasında ulusal, uluslararası ve çalışma alanındaki diğer mevcut kaynaklar kullanılmıştır (Boğaziçi Üniversitesi 2021, Tan vd. 2008, Tan 2021). Tarihi depremlerin şiddet değerlerinin büyüklük değerlerine dönüştürülmesinde Aleksandrova vd. (2019) yaklaşımı kullanılmıştır. Oluşturulan deprem kataloğundaki depremlerin büyüklüklerinin homojenleştirilmesi Kadirioğlu vd. (2016) çalışmasına göre yapılmıştır. Sismik parametrelerin doğru şekilde belirlenmesinin bir aşaması olan deprem kataloğunun tamamlılık analizi, kümesizleştirilmiş katalog ve bölgenin tektonik yapısı dikkate alınarak yapılmaktadır (Şekil 2).

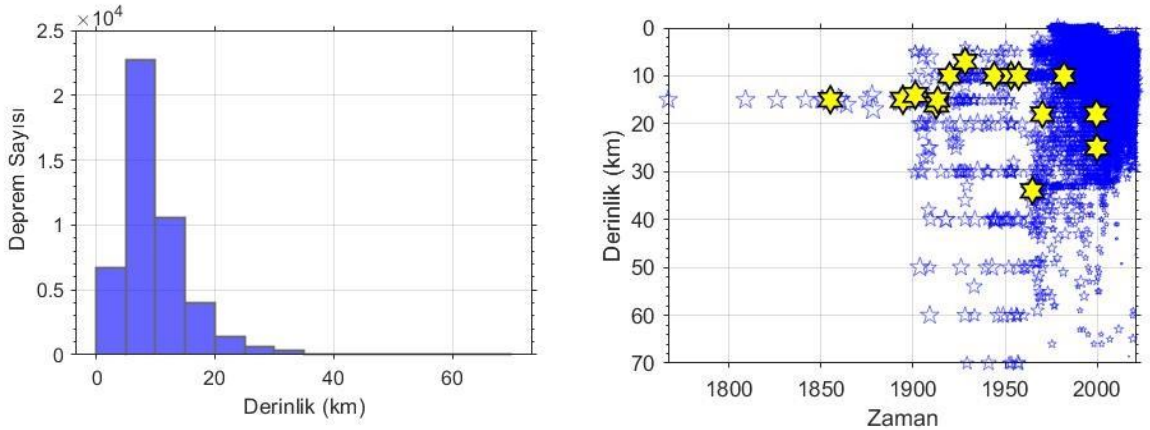


Şekil 2. Deprem Kataloğunun Tamamlılık Analizi.

Sismik bölgelerde meydana gelen her deprem birbirlerini belirli ölçüde tetikleme olasılığına sahiptir ve bu durum depremlerin zamanda ve uzayda kümelenmelerine neden olmaktadır. Bu çalışmada olasılıksal sismik tehlike analizi için Poisson modeli tercih edilmiştir. Bu modele göre sismik kaynakların zamandan bağımsız olduğu kabul edilmiştir. Kabule göre katalogda yer alan ana depremlerin öncü ve artçı depremlerden ayrıştırılması yani deprem kayıtlarının kümesizleştirilmesi (declustering) gerekmektedir. Kümesizleştirme işlemi için Gardner ve Knopoff (1974) yöntemi kullanılmıştır. Kümesizleştirme (declustering) işlemi uygulanmış deprem kataloğu Şekil 3' te verilmiştir. Depremlerin odak derinliğinin belirlenmesinde büyük depremler için odak merkez derinlikleri veya yerel sismik ağların verilerinden elde edilen küçük depremlerin verileri kullanılmaktadır. Bölgedeki bütün depremlerin Deprem büyüklüğünün zamana göre dağılımı ve derinliğe göre dağılımı sırasıyla Şekil 4' te verilmiştir.



Şekil 3. Deprem Büyüklüğünün Dağılımı.



Şekil 4. Bölgedeki Depremlerin **(a)** Derinliğe ve **(b)** Zamana Göre Dağılımı.

Bu çalışmada 38-45°K ve 25-33°D koordinatları ile sınırlanan Marmara Bölgesinin depremselliğini araştırmak için magnitüd-frekans ilişkisi belirlenmiş ve tekrarlanma periyodu hesaplanmıştır. Magnitüd-frekans bağıntıları deprem istatistiğinin temelini oluşturmaktadır. Magnitüdün fonksiyonu olarak depremlerin oluş frekansının logaritmiği incelendiğinde, genellikle doğrusal bir ilişki izlediği görülmekte ve bu ilişki

$$LogN(M) = a - bM \quad (1)$$

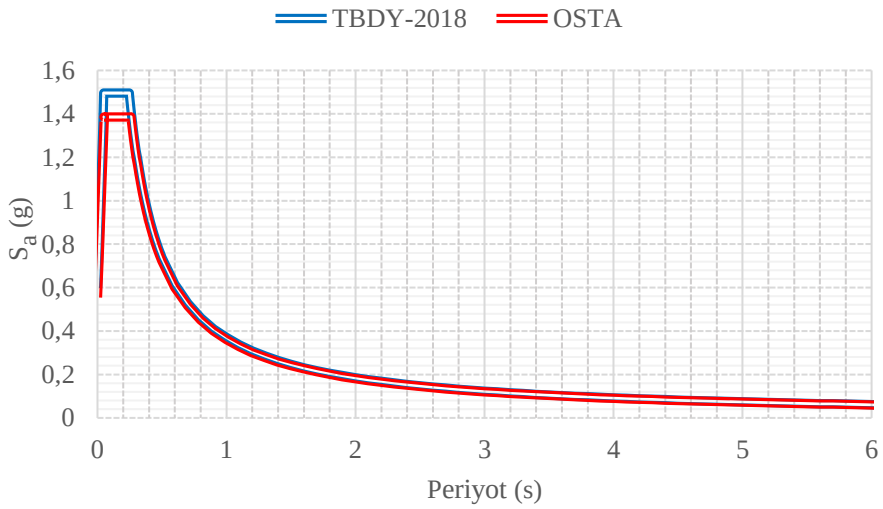
şeklinde ifade edilmektedir. Burada N, birikimli (kümülatif) deprem sayısını, M ise magnitüdü göstermektedir. Olasılıksal sismik tehlike analizinin önemli bir bölümünü bölgenin deprem aktivitesini belirleyen sismik kaynakların belirlenmesi oluşturmaktadır. İnceleme alanında çok sayıda orta ve büyük büyüklükteki depremler en belirgin sismik özelliklerdir. Bu bölgedeki depremlerin odak derinliği düşüktür ve yerkabuğunun üst kısmı ile sınırlıdır. Çalışma alanındaki en büyük deprem, çalışma alanının doğusunda aynı adı taşıyan fay hareketiyle bağlantılı olarak 1999 İzmit 7.4 büyüklüğündeki depremdir. Çalışma alanının batısındaki Ganos Fayının hareketi ile bağlantılı olarak 1912 yılında 7.4 büyüklüğünde benzer bir deprem meydana gelmiştir. Çalışma bölgesindeki fayların modellemesinde maksimum büyüklük tahmin edilirken fayın gerçekleştirdiği maksimum büyüklükteki depremler ve Öztürk (2014) ve Wells ve Coppersmith (1994) ilişkilerinin verdiği en büyük deprem dikkate alınmıştır. Bu çalışmada tehlike analizleri OpenQuake

yazılımı ile yapılmıştır. Bu program, Evrensel Deprem Modeli Vakfı'nın (GEM) iş birliği içinde deprem tehlikesi ve risk modellemesi için geliştirilmiş açık kaynaklı bir yazılımdır. Türkiye kuvvetli yer hareketi verilerinin Batı ABD verileriyle bir karşılaştırması Erdik vd. (1985) de verilmektedir. Bu çalışmada Türkiye'de kaydedilen en büyük ivme (PGA) değerlerinin Batı ABD verilerinin gözlemlenen dağılımı içinde güvenli bir şekilde yer aldığı gösterilmiştir. Tepki spektrumlarının karşılaştırması Türkiye'nin çeşitli yerlerindeki yer hareketinin ampirik tepki spektrumlarının mühendislik toleransları dahilinde, Batı ABD tabanlı azalım ilişkileri tarafından tahmin edilebileceği belirtilmiştir. Bu olumlu tahmin karşılaştırmalarına dayanarak ve Anadolu'nun Kaliforniya'ya (Kuzey ve Doğu Anadolu Faylarına benzer doğrultu atımlı faylar) ve Nevada'ya (Havza ve Menzil bölgesi Ege Bölgesi'ne benzer) jeolojik ve jeotektonik benzerliği bulunmaktadır.

Mantık ağacı yönteminde azalım ilişkisine, sismik parametrelerinin değerlerine, sismik kaynakların mevcut konumuna ve deprem veri tabındaki her varsayıma, o varsayımın diğerlerine göre doğru olma olasılığını ifade eden öznel olasılık değerleri verilmektedir. Varsayım grupları için hesaplanan birleşik olasılıkların toplamının bire eşit olması ve en iyi tahminlerden oluşan varsayım grubunun birleşik olasılık değerinin de diğerlerinden daha büyük olması gerekmektedir. Her bir varsayım için sismik tehlike analizi yapılarak bulunan aşılma olasılığı, o varsayım grubu için hesaplanan birleşik olasılık değeri ile çarpılmaktadır. Bu çalışma kapsamında verilen deprem büyüklüğü ve uzaklık çiftleri için yer hareketi tahminlerindeki epistemik belirsizlikler, tehlike modelinin yer hareketi tahmin denklemleri (GMPE) seviyesinde bir mantık ağacı aracılığıyla ele alınmıştır. Böylece birleşik olasılık değerleri ile çarpılan aşılma olasılıklarının toplamı ile sismik tehlike değeri elde edilmiştir. Olasılıksal tehlike analizi için bir yer hareketi parametresi olan IM'nin belirli bir x değerini aşma olasılığı toplam olasılık teoremi kullanılarak aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:

$$\lambda(IM > x) = \lambda(IM > m_{min}) \int_{m_{min}}^{m_{max}} \int_{0}^{r_{max}} P(IM > x|m,r)\, f_M(m)\; f_R(r)\, dr\, dm \qquad (2)$$

Bu denklemde f_M (m) ve f_R(r) sırasıyla deprem büyüklüğü ve uzaklığın olasılık yoğunluk fonksiyonlarını ifade etmektedir. Denklemde yer alan, belirli bir yer hareketi parametresi IM'nin, belirli bir uzaklık ve deprem büyüklüğü için belirli bir x değerini aşma olasılığını temsil eden P[IM >x|m,r] ifadesi ise azalım ilişkilerinden elde edilmektedir. Yer hareketi tahmin denklemlerine, mantık ağacı yöntemi ile eşit ağırlıklar uygulanmış ve tekerrür periyotları T=2475 yılı temsil eden %5 sönüm oranına sahip elastik ivme spektrumları elde edilmiştir. Zemin Vs30'a bağımlı tekerrür periyotları için elde edilen sahaya özel deprem spektrumları ile TBDY2018 Deprem Tehlike Haritası spektrumlarının karşılaştırılması Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Zemin Vs30'a Bağımlı 2475 Yıllık Ortalama Yinelenme Süresi için %5 Sönümlü Eş-Tehlike Spektrumu ile TBDY2018 Deprem Tehlike Haritası Spektrumunun Kıyaslanması.

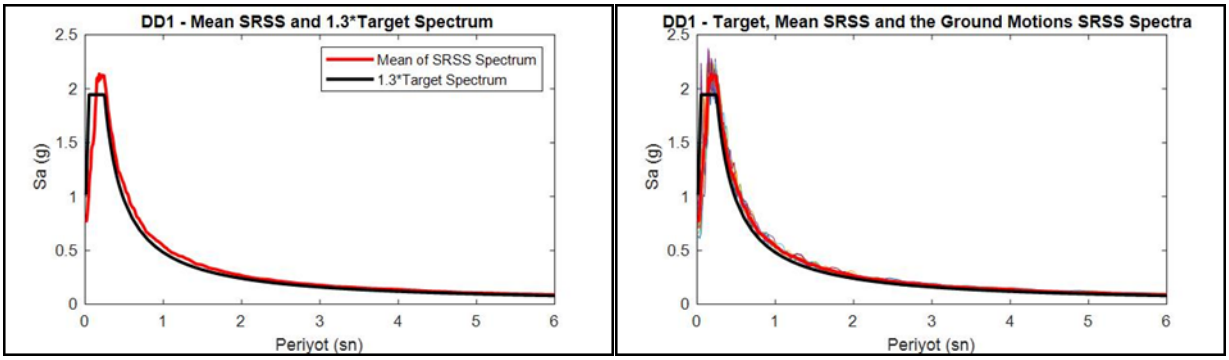
4. Yer Hareketi Seçimi

TBDY 2018'e göre bina taşıyıcı sistemlerinin zaman tanım alanında bir veya iki boyutlu ve üç boyutlu deprem hesabında gerekli deprem yer hareketlerinin tanımlanması için kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi ve basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmesi veya spektral uyuşum sağlanacak şekilde dönüştürülmesi gerekmektedir. Ayrıca seçilecek deprem kaydı takımlarının sayısı en az 11 olmalıdır ve aynı depremden seçilecek kayıt veya kayıt takımı sayısı üçü geçmemelidir (TBDY 2018). Bu kurallara uygun olarak, bölgede daha önce meydana gelmiş olan ve sismik tehlike analizinde kullanılan on bir adet yer hareketi seçilmiştir. Tüm kayıtlara ait spektrumların ortalamasının 0,2Tp ve 1,5Tp periyotları arasındaki genliklerinin, tasarım spektrumunun aynı periyot

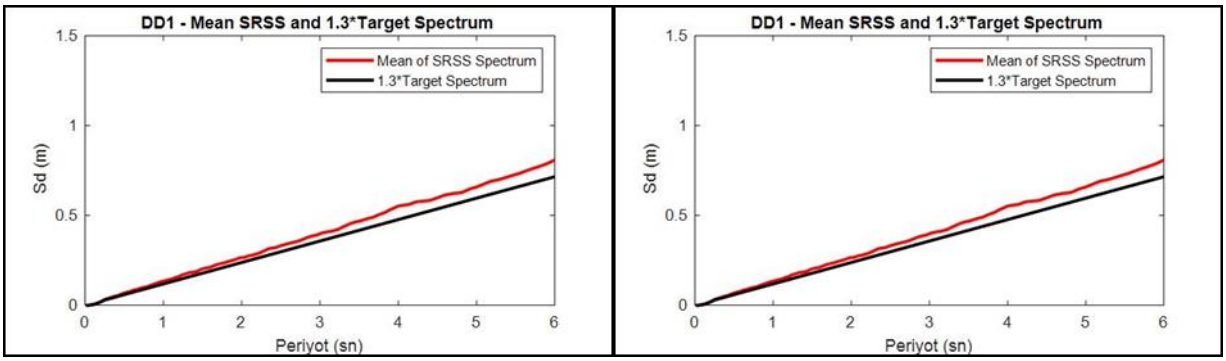
aralığındaki genliklerinden daha küçük olmaması kuralına göre, deprem yer hareketlerinin genlikleri ölçeklendirilmiştir. İki yatay bileşenine ait spektrumların kareleri toplamının karekökü alınarak bileşke yatay spektrum elde edilmiştir. Seçilen tüm kayıtlara ait bileşke spektrumların ortalamasının 0,2Tp ve 1,5Tp periyotları arasındaki genliklerinin, tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1.3'ten daha küçük olmaması kuralına göre deprem yer hareketi bileşenlerinin genlikleri ölçeklendirilmiştir. T=2475 yıl dönüşüm periyotları için seçilen ve ölçeklendirilen depremlere ait özellikler Tablo 1'de verilmiştir. 2475 yıllık ortalama yinelenme süresi için %5 sönümlü eş-tehlike spektrumu ile uyumlu 11 adet 2 yönlü deprem yer hareketlerinin spektral ivme (Sa) ve spektral yer değiştirme (Sd) bileşkelerinin ortalamalarının karşılaştırılması sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7' de verilmiştir.

Tablo 1. T=2475 yıl dönüşüm periyodu için seçilen ve ölçeklendirilen depremlere ait özellikler

No	Deprem	Yıl	Mw	Rrup (km)	Vs30 (m/s)
1	Tabas_ Iran	1978	7.35	2	767
2	Loma Prieta	1989	6.93	9	730
3	Loma Prieta	1989	6.93	18	714
4	Tottori_ Japan	2000	6.61	16	967
5	Northridge-01	1994	6.69	19	706
6	Northridge-01	1994	6.69	16	715
7	Kocaeli_ Turkey	1999	7.51	7	811
8	Chi-Chi_ Taiwan	1999	7.62	26	704
9	Manjil_ Iran	1990	7.37	12	723
10	Hector Mine	1999	7.13	11	726
11	L'Aquila_ Italy	2009	6.3	5	717



Şekil 6. 2475 Yıllık Ortalama Yinelenme Süresi için %5 Sönümlü Eş-Tehlike Spektrumu ile Uyumlu 11 Adet 2 Yönlü Deprem Yer Hareketlerinin Spektral İvme Bileşkelerinin Ortalamalarının Karşılaştırılması.



Şekil 7. 2475 Yıllık Ortalama Yinelenme Süresi için %5 Sönümlü Eş-Tehlike Spektrumu ile Uyumlu 11 Adet 2 Yönlü Deprem Yer Hareketlerinin Spektral Yer Değiştirme (Sd) Bileşkelerinin Ortalamalarının Karşılaştırılması.

5. Rumi Mehmet Paşa Türbesinin Dinamik Davranışı

Yığma yapı türü en eski yapım tekniklerinden biridir. Genel olarak tuğla ve harçtan oluşan kompozit ve heterojen bir yapıya sahipken, kesme taş gibi herhangi bir bağlayıcı malzeme içermeyen yığma yapı türleri de bulunmaktadır. Harç, yığma yapıların çekme ve kesme kuvvetlerine, düzlem dışı veya düzlem içi yüklere karşı mukavemetini belirlemektedir. Yığma yapılarda yapısal elemanların mekanik özelliklerindeki farklılıklar, dış yükler veya zemin oturmaları, sıcaklık değişimleri, büzülme veya geri dönüşü olmayan genleşme veya nem değişiklikleri gibi deformasyonlardan çatlaklar meydana gelebilmektedir. Literatürde sunulan yığma yapılar için nümerik hesap modelleri, temel olarak makro ve mikro modelleme olarak kategorize edilebilen sürekli ve süreksiz sonlu elemanlar analizine dayanmaktadır. Makro modellemede, duvarın mekanik özellikleri, plastisite veya hasar ile ilişkilendirilebilen homojen bir ortam olarak oluşturulmaktadır. Mikro modellemede ise, duvar elemanları (harç ve tuğla) ve tuğla-harç ara yüzü, farklı malzeme özellikleri ve davranış yöntemleri ile temsil edilebilmektedir. Bu yaklaşımda, doğru sayısal tahminler sağlanmasına rağmen, birçok girdi parametresi ve büyük ölçekli modellerde analiz süresi gibi yöntemin uygulanabilirliğini olumsuz yönde etkileyen faktörler bulunmaktadır. Bu problemlerin üstesinden gelmek için yığma birimleri temsil eden sürekli bloklar ve tuğla-harç ara yüz elemanları oluşturulmaktadır. Ayrık elemanlar yaklaşımı olarak tanımlanan bu yöntemin en büyük avantajları yığma bloklar ile harç arasında meydana gelen çatlakların tahmin edilmesini sağlaması ve bloklar arasında meydana gelen dönmeleri ve deformasyonları ölçebilmesidir.

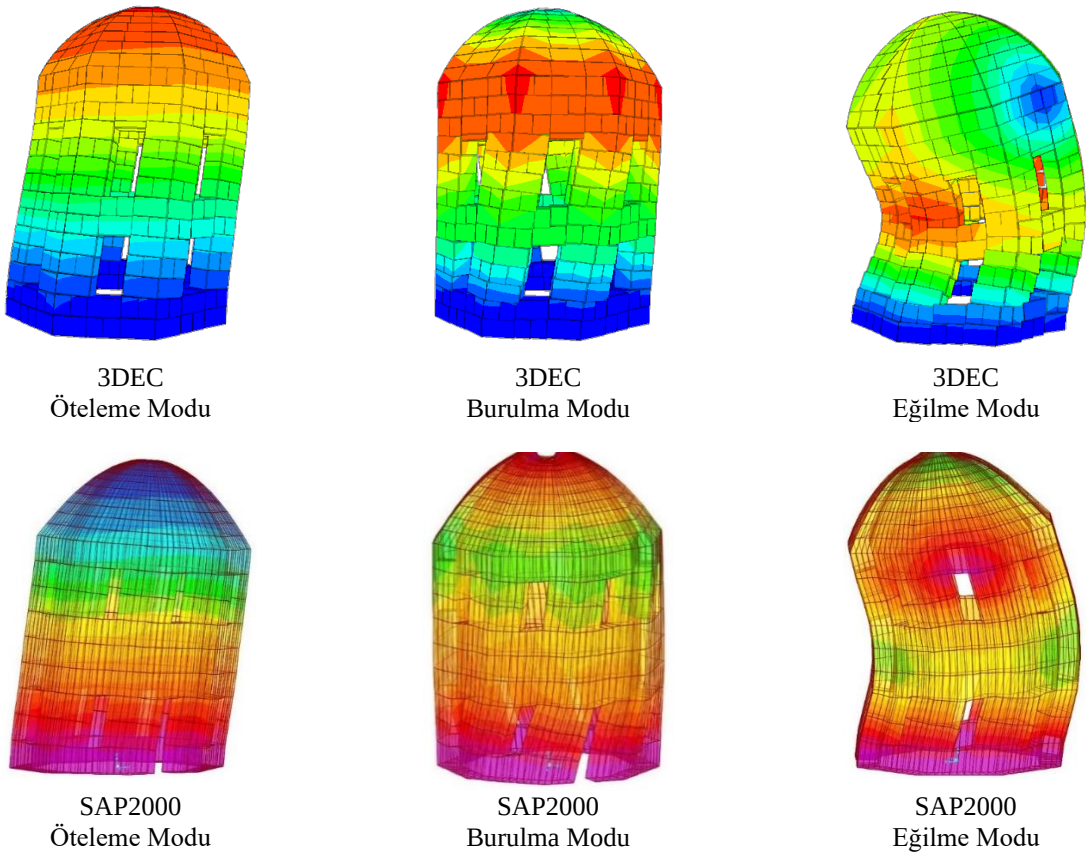
Rumi Mehmed Paşa Türbesinin kubbesi 25x25x18 cm boyutlarında tuğladan yapılmıştır. Çatı bölümü, her iki tarafta yarım parabolik bir eğri ile kesişen aşağı bakan yarım daireden oluşmaktadır. Dış yüzey çamur ve kurşun levhalarla kaplıdır. Kurşun levhaların şeritleri çevresel olarak yerleştirilmiş ve birleşme yerlerinde katlanmıştır. Çatı, bronz bir hilalin yerleştirilmesi gereken zirvede yarı küresel detayla taçlandırılmıştır. Yerden zirveye maksimum seviye +9.62 metredir. Ana gövde sağlam kaya temeller üzerine oturmaktadır. Giriş cephesinde olduğu gibi, sekizgen türbenin her cephesinde duvarın orta eksenine göre konumlanmış birer alt ve bir üst pencere bulunmaktadır. Tüm kotlarda dış duvarlarda görünür yapısal çatlaklar mevcuttur. Çatlaklar, tamburdan başlayarak zemin seviyesine kadar açıklıktan geçen duvarların orta ekseninde de görülmektedir. Bu çalışmada üç boyutlu nümerik model, yığma duvar modellerinde yaygın olarak kullanılan ve ayrık elemanlar yöntemi programı olan 3DEC ile oluşturulmuştur (Saygılı 2019, Saygılı ve Lemos 2019, 2020, 2021, Erdoğmuş vd. 2020). 3DEC programı, süreksizliklerin bloklar arasındaki ara yüzler olarak ele alındığı, ayrı blokların bir topluluğu olarak süreksiz ortamı temsil etmektedir (Itasca 2016). Bu program blokların büyük yer değiştirmelerine ve dönüşlerine izin vermekte, böylece yapısal göçme mekanizmasının simüle edebilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada, deformasyon ve göçme modlarının süreksizlikler boyunca kayma veya ayrılma tarafından oluşmasına izin veren rijit bloklar kullanılmıştır. Nümerik modelde, bloklar rijit olduğundan, yapının global deforme olabilirliğini temsil eden blokların ara yüzünde normal ve kesme rijitliği parametreleri tanımlanmıştır. Elastisite modülü (E) ve kayma modülü (G), normal (k_N) ve kesme (k_S) rijitliği değerlerini hesaplamak için kullanılmıştır. Duvarların ve kubbenin Elastisite modülü (E) benzer tarihlerde bölgede yapılmış yığma yapılardaki malzeme özelliklerini ve türbede bulunan mevcut yapısal hasarları dikkate alarak sırasıyla 3.5 GPa, ve 0.5 GPa olarak belirlenmiştir. 3DEC yazılımında tekrarlanan hesaplamalar, ara yüzlerde Newton'un ikinci yasası ve düğüm noktalarında kuvvet-yer değiştirme yasası kullanılarak yapılmaktadır. Düğüm noktalarına etki eden toplam normal ve kesme kuvvetleri, hem ara yüz kuvvetleri, hem de bloğa etki eden gövde kuvvetleri dikkate alınarak her bir zaman adımında hesaplanmaktadır. Her bir düğüm noktasında oluşan kuvvetler belirlendikten sonra Newton'un ikinci hareket yasası uygulanmaktadır. Birbirini takip eden iki zaman adımı arasında, her bir elemanın ivmesi, hızı ve yer değiştirmesi hesaplanmaktadır. Bu yaklaşımda, blokların hareket denklemlerini entegre etmek için kullanılan rijit bir bloğun kütle merkezi için üç öteleme hareket denklemi aşağıdaki gibidir:

$$m\ddot{u}_i + \propto m\dot{u}_i = f_i \tag{3}$$

burada $\ddot{u}_i$, blok merkezinin yer değiştirme vektörü; m, blok kütlesi; ve $\propto$, sistemdeki enerji kayıplarını sürtünme yayılımının ötesinde yeniden üreten kütle orantılı viskoz sönümleme parametresidir. Elastik kuvvetler, kendi ağırlığı da dâhil olmak üzere uygulanan kuvvetlerin ve ilgili blok yer değiştirmelerinin bir fonksiyonu olan temas kuvvetlerinin toplamı olan kuvvet vektörü f_i'ye dâhil edilmektedir. Euler denklemleri, bloğun ana eylemsizlik eksenlerinde temsil edilen üç serbestlik derecesini kontrol etmektedir:

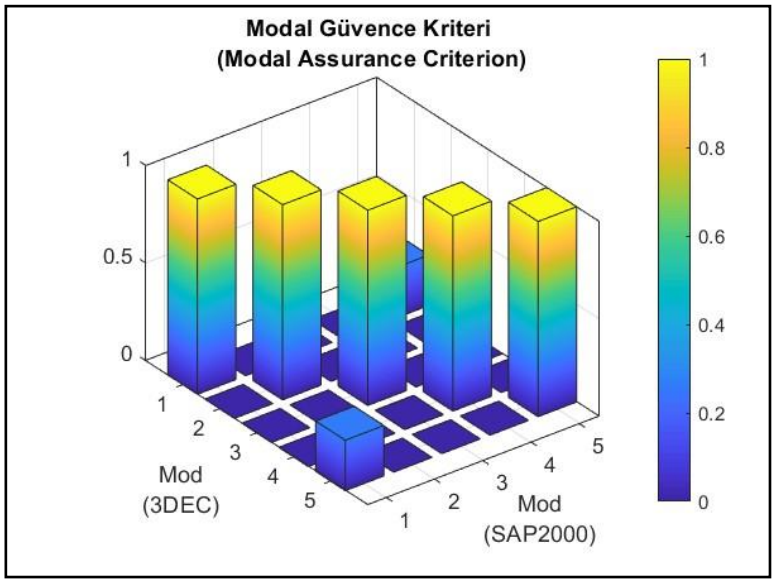
$$\begin{aligned} I_1\dot{\omega}_1 + \propto I_1\omega_1 + (I_3 - I_2)\omega_3\omega_2 &= m_1 \\ I_2\dot{\omega}_2 + \propto I_2\omega_2 + (I_1 - I_3)\omega_1\omega_3 &= m_2 \\ I_3\dot{\omega}_3 + \propto I_3\omega_3 + (I_2 - I_1)\omega_2\omega_1 &= m_3 \end{aligned} \tag{4}$$

burada ω_i dönme hızı vektörü; I_i, atalet momenti; m_i, momentlerin toplamıdır. Çalışmanın bu aşamasında ayrık elemanlar modeline ek olarak türbenin makro modelleme stratejisi kullanılarak sonlu elemanlar modeli de SAP2000 programı ile oluşturulmuştur. SAP2000 ve 3DEC modellerinde yapı zemin bağlantısı tam rijit kabul edilmiştir. İlk olarak, hem süreklilik hem de süreksizlik yaklaşımları kullanılarak oluşturulan sayısal modellerin doğal frekansları ve titreşim modlarını hesaplamak için öz değer (eigenvalue) hesaplamaları yapılmıştır. Yapının öteleme, burulma ve eğilme modu Şekil 8 'de verilmiştir.



Şekil 8. Öteleme, Eğilme ve Burulma Modlarının Karşılaştırılması.

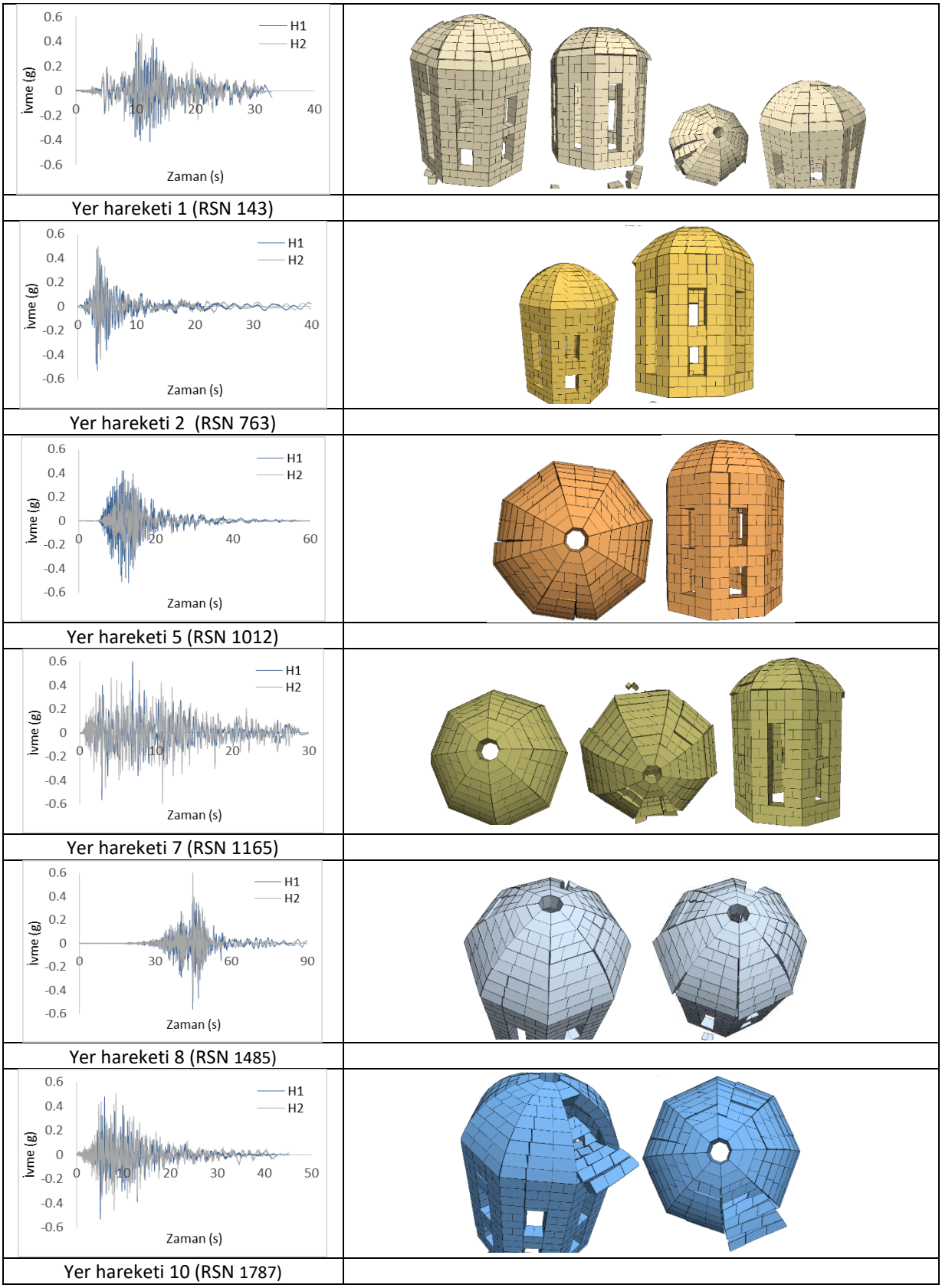
İlk beş mod dikkate alınarak iki sayısal model arasındaki uyumu belirlemek için Modal Güvence Kriteri (Modal Assurance Criterion, MAC) uygulanmıştır. 3DEC modelinde tüm deformasyonun elastik düğüm noktalarında toplandığı rijit blok modeli, blok sayısı yeterince büyük olduğundan, Eigen modlarının doğru hesaplanmasını sağlamıştır. Modal analiz sonuçlarında elde edilen frekanslar karşılaştırıldığında ayrık eleman modelinin sonlu elemanlar modeli ile iyi bir şekilde eşleştiği görülmüştür (Şekil 9). Makro modelleme yaklaşımı kullanılarak oluşturulan sonlu elemanlar modeli sadece elastik analizde iki yaklaşım ile oluşturulan modellerin dinamik özelliklerinin karşılaştırılması için kullanılmıştır. Doğrusal olmayan analizlerde, sismik etkinin neden olduğu duvar göçme mekanizmalarını simüle edebilmek için ayrık elemanlar modeli kullanılmıştır.



Şekil 9. Modal Güvence Kriteri Analizi.

6. Sonuçlar

Doğrusal olmayan dinamik analizler, 3DEC programında ölçeklendirilmiş kayıtlar altında gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları yığma yapının dönüş periyodu 2475 yıl (yaklaşık 0,5 g) olan depremlerde önemli ölçüde savunmasız olduğunu ve yıkılabileceğini göstermiştir. Birbirine dik yatay doğrultuda uygulanan yer hareketleri altında, Rumi Mehmet Paşa türbesinin blokları arasında büyük yer değiştirmelerin meydana gelmesi ve blokların yerinden çıkmasıyla büyük hasar aldığı gözlenmiştir. Ayrıca, tipik olarak göçme mekanizmasının başladığı kubbede önemli hasarlar gözlemlenmiştir. Şekil 10' da 2018 TBDY' ye uygun olarak, T=2475 yıl dönüşüm periyotları için seçilen ve ölçeklendirilen deprem kayıtlarından altı tanesi altındaki davranışları ve göçme mekanizmaları verilmiştir. Bu depremlerden en büyüklüğü 1999 İzmit depremidir. Seçilen depremlerin süresi yaklaşık 30-90 saniye arasında olup büyüklükleri Mw 6.3 ile Mw 7.51 arasında değişmektedir. Bu yer hareketleri altında yapıda en büyük yer değiştirmeler kubbede oluşmuştur. Pencere ve kapı kenarlarında meydana gelen bloklar arasındaki göreli yer değiştirmelerinin artması ve kubbe blokları arasında oluşan açılmalar ile birlikte göçme yaşanmıştır. Tüm bu doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçları yapının bölgede oluşabilecek bu büyüklükteki depremler karşısında savunmasız kalacağını ve göçme yaşanacağını göstermiştir. Bu çalışmanın beklenen hasar seviyeleri ve göçme mekanizması hakkında bir fikir vermesi, ayrık eleman yaklaşımının yığma yapıların güvenlik değerlendirmesi için çok uygun bir yöntem olduğunu göstermektedir. Tarihi yığma yapıların dayanım performans düzeylerinin belirlenmesi ve sismik güvenliğini artırmak için uygulanacak yöntemler hakkında daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.



Şekil 10. Seçilen ve Ölçeklendirilen Depremler Kayıtları Altında Yığma Yapının Göçme Mekanizmaları.

Referanslar

Aleksandrova, I., Solakov, D., Simeonova, S., Raykova, P. (2019). Empirical relations converting seismic intensity to moment magnitude. In 10th Congress of the Balkan Geophysical Society (Vol. 2019, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.

Ambraseys, N.N., and Finkel., C. (1987). The saros–marmara earthquake of 9 August 1912, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 15: 189-211.

Ambraseys, N. N., Jackson., J. A. (2002). Seismicity of the Sea of Marmara (Turkey) since 1500, Geophysical Journal International, 141: F1-F6.

Anastasia, K., Louvari, E. K. (2001). On active tectonics of the Agean sea and surrounding land. Symposia on seismotectonics of the North-Western Anatolia-Agean and recent Turkish Earthquakes. Proceeding, pp. 88-95.

Babinger, F. (1992). Mehmed the Conqueror and his time. Princenton: Princenton University Press.

Barka, A. A. (1992). The North Anatolian Fault Zone, Annales Tectonicae, 6: 164-95.

Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi BDTİM (http://www.koeri.boun.edu.tr).

Erdik, M., Doyuran, V., Akkas, P., Gulkan, P. (1985). Assessment of the Earthquake Hazard in Turkey and Neighboring Regions, Tectonophysics 117, 295-344.

Erdoğmuş, E., Pulatsu, B., Gaggioli, A., Hoff, M. (2020). Reverse engineering a fully collapsed ancient roman temple through geoarchaeology and DEM. International Journal of Architectural Heritage, 1-21.

Flerit, F., Armijo, R., King, G., Meyer, B. (2004). The mechanical interaction between the propagating North Anatolian Fault and the back-arc extension in the Aegean. Earth and Planetary Science Letters, 224(3-4), 347-362.

Gardner, J. K., Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian?. Bulletin of the seismological society of America, 64(5), 1363-1367.

Goodwin, G. (2003). A history of Ottoman architecture. London: Thames and Hudson.

Görür, N., Çağatay, M. N., Sakınç, M., Sümengen, M., Şentürk, K., Yaltırak, C., Tchapalyga, A. (1997). Origin of sea of Marmara as deduced from Neogene to Quaternary paleogeographic evolution of its frame. International Geology Review 39, 342-352.

Hubert-Ferrari, A., Barka, A., Jacques, E., Nalbant, S. S., Meyer, B., Armijo, R., ... & King, G. C. (2000). Seismic hazard in the Marmara Sea region following the 17 August 1999 Izmit earthquake. *Nature*, *404*(6775), 269-273.

Imren, C., Le Pichon, X., Rangin, C., Demirbağ, E., Ecevitoğlu, B., Görür, N. (2001). The North Anatolian Fault within the Sea of Marmara: a new interpretation based on multi-channel seismic and multi-beam bathymetry data. Earth and Planetary Science Letters, 186(2), 143-158.

Itasca Consulting Group, Inc, 2016. 3DEC 5.2 Command Reference. (Minneapolis, Minnesota, USA).

Kadirioğlu, F.T., Kartal, R.F. (2016). The new empirical magnitude conversion relations using an improved earthquake catalogue for Turkey and its near vicinity (1900–2012). Turk J Earth Sci 25(4):300–310.

Kafescioğlu, C. (2009). Constantinopolis/Istanbul. University Park, Pa.: Pennsylvania State University Press.

Koçyiğit, A., Yusufoğlu, H., Bozkurt, E. (1999). Evidence from the Gediz graben for episodic two-stage extension in western Turkey. Journal of the Geological Society, 156(3), 605-616.

Kozacı, Ö., Dolan, J. F., Finkel, R. C. (2009). A late Holocene slip rate for the central North Anatolian fault, at Tahtaköprü, Turkey, from cosmogenic 10Be geochronology: Implications for fault loading and strain release rates. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 114(B1).

Le Pichon, X., Şengör, A. M. C., Demirbağ, E., Rangin, C., Imren, C., Armijo, R., ... & Tok, B. (2001). The active main Marmara fault. Earth and Planetary Science Letters, 192(4), 595-616.

McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., ... & Veis, G. (2000). Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 105(B3), 5695-5719.

Meade, B. J., Hager, B. H., McClusky, S. C., Reilinger, R. E., Ergintav, S., Lenk, O., ... & Ozener, H. (2002). Estimates of seismic potential in the Marmara Sea region from block models of secular deformation constrained by Global Positioning System measurements. Bulletin of the Seismological Society of America, 92(1), 208-215.

Mihailovich, J. (1927). Trusne katastrofe na Mramornome moru', Posebno Izdan, 65 (16): 303.

Öztürk, S. (2014). A new empirical relation between surface wave magnitude and rupture length for Turkey earthquakes. Earth Sciences Research Journal, 18(1), 15-26.

Parke, J. R., White, R. S., McKenzie, D., Minshull, T. A., Bull, J. M., Kuşçu, I., ... Şengör, C. (2002). Interaction between faulting and sedimentation in the Sea of Marmara, western Turkey. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 107(B11), EPM-2.

Reilinger, R. E., S. C. McCLusky, M. B. Oral, R. W. King, and Toksoz, M. N. (1997). Global Positioning System measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone, J. Geophys. Res., 102, 9983– 9999.

Rockwell, T., Ragona, D., Seitz, G., Langridge, R., Aksoy, M. E., Ucarkus, G., Akbalik, B. (2009). Palaeoseismology of the North Anatolian Fault near the Marmara Sea: implications for fault segmentation and seismic hazard. Geological Society, London, Special Publications, 316(1), 31-54.

Saygılı, Ö. (2019). Estimation of structural dynamic characteristics of the Egyptian obelisk of Theodosius. Earthq. Struct., 16, 311–320.

Saygılı, Ö., & Lemos, J. V. (2020). Investigation of the structural dynamic behavior of the Frontinus Gate. *Applied Sciences*, *10*(17), 5821.

Saygılı, Ö., & Lemos, J. V. (2021). Seismic vulnerability assessment of masonry arch bridges. In *Structures* (33, 3311-3323). Elsevier.

Seyitoğlu, G., Scott B. (1991). Late Cenozoic crustal extension and basin formation in west Turkey. Geological Magazine 128, 155-166.

Şengör, A.M.C., Tüysüz, O., İmren, C., Sakınç, M., Eyidoğan, H., Görür, N., Le Pichon, X., and Rangin, C. (2005). The North Anatolian Fault: A New Look: Annual Review of Earth and Planetary Sciences.

Tan, O., Tapirdamaz, M. C.,Yörük, A. (2008). The earthquake catalogues for Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences, 17(2), 405-418.

Tan, O. (2021). A homogeneous earthquake catalogue for Turkey, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 21: 2059-73.

Tatar, O., Piper, J. D. A., Park, R. G. and Gursoy, H. (1995). Paleomagnetic study of block rotations in the Niksar overlap region of the North Anatolian fault zone, central Turkey, Tectonophysics, 244, 251– 266.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018(TBDY-2018, Afet ve Acil Durum Başkanlığı, Ankara.

Tchernega, N. (2018). Restoration project of the tomb of Rumi Mehmed Pasha and cistern-public kitchen building, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Wells, D. L., Coppersmith, K. J., (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bulletin of the seismological Society of America, 84(4), 974-1002.

Yaltırak, C. M., Okay, F. Y. (2000). Kinematics and evoluation of the northern segment of the North Anatolia Fault Zone (Ganos Fault) in the area between Marmara and Gulf of Saroz. Tatar, o., Kavak, K. S., Özden. S. (Eds). Tektonik Araştırma Grubu 3. Toplantısı, Atag-3 Proceedings. 77-89.

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

UMAGD, (2023) 15(2), 497-516.

10.29137/umagd.1221976

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Sağlık Çalışanlarının İş Sağlığı ve Güvenliği Algılarının Araştırılması: Çankırı İli Örneği

Investigation of Occupational Health and Safety Perceptions of Health Workers: The Case of Çankırı Province

Ercüment Neşet Dizdar[1], Hakan Önder [2]

[1]Çankırı Karatekin Üniversitesi Sosyal Bilimler MYO Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, 18100 Merkez/Çankırı, TÜRKİYE
[2]Çankırı Karatekin Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü İş Sağlığı ve Güvenliği ABD, 18100 Merkez/Çankırı, TÜRKİYE

***Başvuru/Received**: 20/12/2022* ***Kabul / Accepted**: 22/03/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Öz

İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) çalışmaları, uygulama alanları da göz önüne alındığında çok disiplinli bir araştırma alanıdır. Sağlık çalışanlarının İSG algısını araştırmak amacıyla yapılan bu çalışmada, ilgili sektörde istihdam olan 450 kişiye anket yapılmış olup (kullanılabilir nitelikte olan) 270'i değerlendirmeye alınmıştır. Araştırmada cinsiyet, yaş, medeni durum, eğitim düzeyi, unvan, çalışma türü, mesleki deneyim süresi, gelir düzeyi, İSG eğitimi almaları, meslek hastalığı geçirme, iş kazası geçirme, İSG memnuniyet düzeyleri, kurum yönetimince alınmış tedbirler, çalışma ortamı ergonomisi vb. değişkenlerin etkileri istatistiksel olarak analiz edilmiştir. İSG memnuniyeti ve ergonomi ölçeklerinin Cronbach Alpha değeri = 0,929; meslek hastalıkları ve İSG tedbirleri ölçeklerinin Cronbach Alpha değeri = 0,963; iş kazaları ölçeğinin Cronbach Alpha değeri= 0,977 olarak hesaplanmış olup, güvenirliğine ilişkin her ölçek için istenilen düzeyde yüksek olduğu anlaşılmıştır. Yapısal olarak geçerlilik analizlerinin yapılması ve elde edilen veriler ışığında tanımlayıcı istatistikler yorumlanarak, bağımlı ve bağımsız değişkenlerin demografik özellikler üzerindeki dağılımını tespit etmek için t-testi, ANOVA analizi, değişkenler arasındaki farklılığın tespitine yönelik Tukey Testi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre sağlık kurum yönetimlerince iş doyumu ve motivasyon artırıcı uygulamaların yanı sıra alınması öngürülebilen diğer tedbirler çalışmanın sonunda özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler
"İş Sağlığı ve Güvenliği, İSG Algısı, İSG Kültürü, Sağlık Çalışanları, Çankırı"

Abstract

Occupational Health and Safety (OHS) studies are a multidisciplinary field of research, considering its application areas. In this study, which was conducted in order to investigate the OHS perception of health workers, a survey was conducted on 450 people employed in the relevant sector and 270 of them (who are of an available nature) were taken into consideration. Research gender, age, marital status, level of education, job title, type of work, length of professional experience, income level, OHS training, occupational disease, you don't have just don't work, the level of satisfaction the measures taken by the administration of the

***Sorumlu Yazar: endizdar@karatekin.edu.tr**

institution OHS working environment, ergonomics, etc. the effects of the variables were analyzed statistically. In the study, Cronbach Alpha value of OHS satisfaction and ergonomics scales = 0.929; Cronbach Alpha value of occupational diseases and OHS measures scales = 0.963; the Cronbach Alpha value of the occupational accidents scale was calculated as = 0.977 and it was understood that it was high at the desired level for each scale related to its reliability. Descriptive statistics and analysis of structural validity in the light of the data obtained by interpreting demographic variables on dependent and independent variables to determine the distribution, t-test, ANOVA analysis, Tukey Test to determine differences between variables were reviewed. According to the results obtained, in addition to job satisfaction and motivation-enhancing practices, other measures that can be foreseen to be taken by health institution administrations were summarized at the end of the study.

Key Words
"Occupational Health and Safety, OHS Perception, OHS Culture, Health Workers*, Çankırı"*

Bu makale, birinci yazarın danışmanlığında ikinci yazar tarafından …. Üniversitesi, …. Enstitüsü, …. ABD yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

1. Giriş

İş Sağlığı ve Güvenliği'nin (İSG) genel manada, çalışanlara sağlıklı ve güvenli bir çalışma ortamı oluşturulabilmesi adına alınacak önlemler ve uygulanacak faaliyetler (Caner, 2021; Durgut & Kıvanç, 2021; Gürsoy & Kabul, 2020) olarak tanımlanmaktadır. İSG'ye geniş bir pencereden bakılacak olursa, birey olan kişinin, toplumsal huzur ve mutluluğunu temin etmeyi amaçladığı görülecektir (İpek, 2020).

İSG'nin amacı, birey açısından birinci sırada önemde bulunan yaşam hakkını tehdit etmesi muhtemel riskler ile tehlikeleri, çalışanları korumak maksadıyla ortadan kaldırmak, tehlikeleri önceden tespit etmek suretiyle, önlem alınamayacak durumdaki risklerin neticelerini en alt seviyeye indirmek, insanlara güvenli bir çalışma alanı sunmaktır (Bhagawati, 2015; Küçük, 2017; Taş, 2021; Van & Koç, 2020).

İSG yaklaşımları, sanayi devrimi ile aynı anda başlamış, gelişen bilim, teknik, finans, toplum ile birlikte büyümeye başlamıştır (Ünver, 2013). Önceleri önemi anlaşılmayan İSG, zamanla düşük verim ve ekonomik kayıpların artması üzerine, önemli bir kavram olduğu anlaşılarak, bu alanda ciddi çalışmalar yapılmaya başlanılmıştır (Kale, 2019; Karabulut, 2020). Son yüzyılda üretim, hizmet vb. süreçlerde yaşanan global dönüşümlerle birlikte, İSG yaklaşımları yeni durumlara göre sürekli bir dönüşüm ve gelişim göstermektedir (Çiçek & Öçal, 2016; Demirkaya, 2014).

İSG'ye yardımcı bir kavram olan "güvenlik kültürü, çalışma sahalarındaki muhtemel riskler ile bunların gerçekleşme durumunu en aza düşürme konusunda kuruluşa ait eylemler, kurallar, alışkanlıklar" olarak tanımlamaktadır (Dursun, 2013; Robbins & Judge, 2017).

Çalışma ortamlarında "güvenlik kültürü ortak paydadır" anlayışının kabullendiği günümüzde, "güvenlik algısı" kavramı İSG kültürü önemli bir parçası olmuştur. Artık güvenlik algısı davranış şekillerinin çalışanlar ile yöneticilerin özümsemesi ve içsel bir hareket olarak gerçekleştirilmesi gereken İSG kültürünün önemli bir parçası olmuştur (Çağlar, 2019; Dizdar & Koçar, 2020; Çiftçi, 2016; Gümüş, 2017; Kılkış & Alper, 2015; Yelekçi, 2019).

İSG kültüründe güvenlik algı düzeylerinin yükseltilebilmesi için, bireysel olarak sağlıklı ve güvenli davranışların kazandırılması ve alışkanlık hale getirilmesi çok önemlidir (Cumhur & Ahıskalı, 2018). Dolayısıyla, artık İSG kültürünün çalışanlara benimsetilmesi çalışmalarında güvenlik algısı kavramı üzerinde durulur hale gelmiştir (Olcay & diğ., 2021; Uncu, 2022).

Bu çalışmada, Çankırı ilinde bulunan sağlık çalışanlarının İSG algıları araştırılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde sağlık kurumlarında İSG kavramı, üçüncü bölümünde ise konuyla ilgili literatür araştırmasına yer verilmiştir. Araştırmanın dördüncü bölümünde yapılan çalışma evreler halinde (veri toplama, örneklem, geliştirilen hipotezler vb) ile elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Son bölümde ise bu araştırma sonunda elde edilen sonuçlar (karşılaştırmalı olarak) paylaşılmıştır.

2. Literatür Araştırması

2.1. Sağlık Kurumlarında İş Sağlığı ve Güvenliği

Sağlık sektörü, insanın hayatını yürütebilmesi için gerekli olan sağlığa kavuşabilmesi ve devamlılığının sağlanabilmesi, bu alanda mücadele eden çalışanları ve kurumları ile bütün olan yapılardır (Karaca, 2013; Sarıtaç, 2014). Sağlık kurumları ise, bireylerin ve toplumun sağlıklı hallerinin sürdürülmesi amacıyla, hastalıkların önlenmesi, önlenemiyorsa teşhis, tedavi ve rehabilitasyon yapılması hizmetleridir (Devebakan, 2018).

Sağlık kurumları ile ilgili halk arasında çok fazla ayrım yapılmamakta, ancak Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) tarafından yapılan çalışmalarda bu ayrım, çıkarılan bir mevzuat ile açıklanmıştır. SGK'nın çıkardığı "Sağlık Uygulama Tebliği"nde sağlık hizmeti sunucuları basamaklara ayrılmıştır (SGK Sağlık Uygulama Tebliği, 2013).

Sağlık sektörü içerisinde bulunan kurumlar, aslında birer işyeridir. Dolayısıyla bu iş yerlerindeki İSG şartları aslında hizmet sunulanlara (hasta ve yakınlarına) verilen hizmetin verimliliği anlamına gelmektedir (Devebakan & Paşalı, 2015; Öğüt, 2022; Sayım & Salman, 2016). Dolayısıyla sağlık kurumlarına başvuran bireylere kaliteli hizmet sunulabilmesi, aslında sağlık mesleğini icra edenlerin moral ve motivasyonu ile sağlık ve güvenliği (İSG) ile direkt ilişkilidir (Atasoy & Yorgun, 2013; Davenport & diğ., 2003; Erkan, 2014; Mollaoğlu & diğ., 2009; Sarıtaç, 2014).

2.2. Sağlık Çalışanları ve Maruz Kaldıkları İş Sağlığı ve Güvenliği Riskleri

Sağlık sektöründe hizmet verenlerin tümü "sağlık çalışanları" olarak bilinmektedir. Sağlık çalışanları devlet ve özel kişilere ait kurumlarda sağlık hizmeti sunan kişilerdir (Urhan & Etiler, 2011; Ütük, 2013). Sağlık çalışanları, ilgili kurumlarda insanlara çok yönlü ve nitelikli hizmet verilmesini amaç edinmiş, bu amaç doğrultusunda, farklı meslek çalışanlarının toplandıkları, herkesin uzmanlık alanına göre görevini yaptığı, birbirleri ile tecrübelerin paylaşıldığı ve ortak alınan kararların birlikte uygulandığı topluluktur (Birgili vd., 2010; Can, 2019; Ütük, 2013; Taş, 2016).

Çalışanlarının İSG yönünde riskli bir çalışma ortamında faaliyetlerini yürütmek zorunda kalması halinde, hizmet vereceği kesimin alacağı hizmetin de kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır (Altun & diğ., 2012; Eravcı, 2019; Günal, 2018; Kaplan & Eren, 2018). Sağlık sektörü çalışanlarının amaçları, toplumdaki bireylerin sağlığı bozulduğunda tedavilerini yapmak, tedavi sonrası kaliteli yaşamasına yol göstermek, sağlıklı ise sağlığını korumasına yardımcı olmaktır (Öğüt, 2022; Zöhra, 2019).

Sağlık sektöründe sunulan hizmetlerle ilgili her adımda çalışanların ve hizmet alanların güvenliklerinin garanti altına alınması ve tıbbi açıdan İSG risk ve tehlikelerine karşı alınacak tedbirler çok önemlidir (Songur & diğerleri, 2018; Yelekçi, 2018). Bununla beraber sağlık çalışanlarının "Biyolojik", "Kimyasal", "Fiziksel", "Ergonomik" ve "Psikososyal" risklere maruz kaldıklarına dair birçok araştırma bulunmaktadır (Hedge & diğ., 2011; Beşer, 2012; Saygun, 2012; Akgün, 2015; Solmaz ve Solmaz, 2017; Karabiber, vd., 2018; Dizdar ve Koçar, 2018; Chirico & diğ., 2019; Mohanty & diğ., 2019; Ağuş & Akbel, 2020).

Sağlık sektöründeki bu risklerin çeşitliliği ve fazlalığı, mesleki ortamlarında tehlike seviyesini yükseltmekte olup, neticede (İSG mevzuatımıza göre) "Çok Tehlikeli Sınıf"" kapsamında değerlendirilmektedir. Zaten birçok iş alanını barındıran sağlık çalışmaları içerdiği tehlike ve risklerin fazlalığından ötürü, diğer iş alanlarına göre nispeten yüksek miktarda iş kazası ve özellikle meslek hastalığı görülmektedir (Beşer, 2012; Caymaz, 2015; Cebeci, 2014; Devebakan & Paşalı, 2015; Yıldız, 2017; Kavgacı & Çicek, 2019; Bulut ve diğerleri, 2020; Yanık & Kurul, 2020).

2.3. Sağlık Çalışanlarının İş Sağlığı ve Güvenliği Algıları

Bilindiği üzere İSG, tüm işveren ve çalışanları, hatta toplumu, devletleri ilgilendiren, insan hayatında olmazsa olmaz konumunda bir kavramdır. Dolayısıyla çalışanlara "İSG algısı", bireysel olarak sağlıklı ve güvenli davranışın kazandırılması ve alışkanlık hale getirilmesi ile mümkündür (Dizdar, 2014; Dinçer & Utlu, 2017; Cumhur & Ahıskalı, 2018).

Faklı sektörlerin yanı sıra, sağlık sektöründe İSG tedbirlerine ışık tutması açısından yürütülen akademik çalışmalarda anket metotları kullanılmıştır. Çoğunlukla, kişilerin belli konulardaki tutum, düşünce, duygu ve önerilerini almak üzere hazırlanan soru listeleri ile oluşturulan anketlerin betimsel değer taşıması ile geçerli ve güvenli sonuçlar vermesi beklenmektedir. Tablo, grafiklerin yanı sıra sayı, yüzde, ortalama gibi tanımsal istatistik sonuçlarına yer verilen bu akademik çalışmalarda, sağlık sektöründe İSG kültürünün, farkındalığın ve algısının oluşup oluşmadığı konusunda farklı sonuçlara varılmıştır.

Gür (2020) tarafından yapılan çalışmada İSG algısı seviyesinin yüksek olduğu ortaya koyulmuştur. Er (2020) tarafından yapılan çalışmada, demografik verilere göre personelin İSG algısında belirgin bir farkın olduğu ve İSG kavramı açısından pozitif algıların bulunduğu vurgulanmıştır. Günal (2018), Çanakçı (2019) ve Yurtseven (2020) ile Sudan (2020) tarafından yapılan çalışmalarda, İSG algısının ileri seviyede olduğu ve yapılan hizmet içi eğitimler vasıtasıyla da sürekli ilerletildiği tespitine yer verilmiştir. Elçin (2020)

tarafından yapılan çalışmada, İSG kavramı memnuniyet seviyeleri yükseldikçe, güvenlik ölçeği puan ortalamalarının yükseldiği görülmüştür. Kara (2020) tarafından yapılan çalışmada, sayısal ağırlıklı eğitim alanların daha duyarlı oldukları sonucuna yer verilmiştir.

Diğer taraftan Kılıç (2014), Han (2015), Çelik (2016), Küçük (2017), Bingölbali (2020) ve Babaoğlu'nun (2020) çalışmalarında ise sağlık çalışanlarında İSG algı düzeyinin yetersiz olduğu ancak verilen eğitim ile algı seviyeleri arasında olumlu bir ilişki bulunduğu, kısmen yükselebileceği sonuçları paylaşılmıştır.

İSG'deki hızlı gelişmelere Türkiye'de kayıtsız kalmayarak, mevzuatımıza kazandırılan İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu sonrası, İSG algısı (dolayısıyla İSG kültürü) çalışmaları artmış ve özellikle sağlık sektöründe, kendisine başvuran kişilerin ve çalışanların sağlık ve güvenliği ile yakından ilgili olduğu için bu ortam ve çalışanlarının mesleki çalışma şartlarının düzeltilmesi babında yapılan akademik araştırmaların daha ileri boyutlara taşınması, konuyla ilgili daha derinleştirilmesine ve daha spesifik (sağlık hizmetlerinin verildiği yerler ve pandemi de göz ardı edilmeyecek bulgulara) ulaşılması ihtiyacı doğmuştur (Baybora, 2012; Çelik, 2016; Dayan ve Öngel, 2016; Cumhur ve Ahıskalı, 2018; Baysal vd., 2019; Can, 2019; Buzak vd., 2019; Gündüz, 2019; Körükmez, 2020; Çelik, 2020; Baygutalp, 2020; Elçin, 2020; Ağuş vd., 2020; Kocay ve Küçük, 2022). Bu bağlamda İSG kültüründe güvenlik algı düzeylerinin yükseltilebilmesi, güvenlik ikliminin geliştirilmesi, dolayısıyla iş kazaları ve meslek hastalıklarının önlenmesine katkı sağlanması ve ayrıca bu sektörde daha güvenli hizmet sunulması amacıyla Çankırı ilindeki sağlık çalışanlarının İSG algıları araştırılmıştır.

3. Sağlık Çalışanlarının İş Sağlığı ve Güvenliği Algılarının Araştırılması

İnsanların belli konulardaki düşünceleri, tutumları, algıları, tercihleri vb. eğilimlerini ve özelliklerini ortaya çıkarmak ve sonrasında konuyla ilgili yapılacak çalışmalara katkı vermesi için kullanılan anketler, sistematik veri toplama tekniği olarak bu tür araştırmalarda sıklıkla kullanılmakta olup (Öztürk ve Babacan, 2012; Butgel vd., 2016; Er, 2020; Parlak, 2020; Bulut vd., 2020; Elçin, 2020; Biber, 2022; Korkusuz, 2022), bu araştırma çerçevesinde de betimsel tarama yöntemi kullanılmış olup, Çankırı ilindeki sağlık çalışanlarının İSG algıları ölçülmüştür. Bu çalışmada nicel araştırma yöntemi olarak (ilgili sağlık çalışanlarının İSG kültürüne ilişkin literatürde tercih edilen) anket yöntemi ile istenilen verilere ulaşılmak amaçlanmıştır. Geçerliliği önceki çalışmalarda kanıtlanmış olan ankette, sağlık çalışanlarının İSG algıları belirlenmeye çalışılmıştır.

3.1. Veri Toplama Araçları

Çalışmada öncelikle kapsamlı bir alan taraması yapılmış olup, katılımcıların demografik bilgilerine erişmek üzere hazırlanan kişisel bilgi formu ile literatür taramasında çıkan ölçekler dikkate alınarak ve gerekli uzman görüşleri dikkate alınarak yeni bir ölçek hazırlanmıştır.

Çalışmada demografik verileri ölçen 14 ifade, İSG memnuniyetini ölçen 9 ifade, meslek hastalıklarını ölçen 12 ifade, iş kazalarını ölçen 27 ifade, İSG tedbirleri algısını ölçen 13 ifade ve ergonomi algısını ölçen 22 ifade bulunmaktadır. İSG memnuniyeti, meslek hastalıkları, iş kazaları, İSG tedbirleri ve algısını ölçmeye yönelik oluşturulan ifadeler; Öztürk & Babacan'ın (2012) çalışmalarından yararlanarak Elçin (2020) tarafından geliştirilen ölçekten uyarlanmıştır.

Geliştirilen anketin, geçerlilik ve güvenilirlik analizi yapılması sonrasında İş Sağlığı ve Güvenliği Algı Ölçeği olarak uygulanabilir şeklini almıştır.

Anketin uygulanması için Çankırı Karatekin Üniversitesinden Etik Kurul Raporu sonrası, çalışma kapmasında bilgi derlenen sağlık kurumlarından gerekli izin ve onaylar alınmıştır.

Araştırmada, yüz yüze görüşme yapılmak suretiyle uygulanan anket çalışmalarında, örneklemde bulunan katılımcılara çalışmanın amacı, anket formunun doldurulmasına yardımcı olmak için açıklamalar yapılmıştır. Katılımcılara kimlik bilgilerini anket formuna yazmalarına gerek olmadığı bilgisi verilerek, elde edilen verilerin genel olarak değerlendirmeye alınacağı bildirilmiştir.

3.2. Evren ve Örneklem

Evreni çalışmanın yürütüldüğü dönemlerde Çankırı'da görev yapmakta olan sağlık çalışanları oluşturmaktadır. Araştırmada evrenin tamamı üzerinde çalışmak imkan dahilinde olmamasından dolayı, temsil edecek sayıda bir örneklem belirleme gereksinimi doğmuştur.

Örneklem büyüklüğü %95 güvenlikle Cohen, Manion ve Morrison'un (2000) örneklem büyüklüğü tablosuna göre belirlenmiş olup, basit örneklem yöntemi ile bilimsel araştırmalarda tüm evrene genellenen örneklem büyüklüğünü saptayabilmeye olanak sunan tablodan hareketle, örneklem büyüklüğünün 450 olmasının yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu doğrultuda minimum örneklem sayısının üzerinde bir sayıya ulaşılmaya çalışılmış, 1 Ağustos 2021-15 Aralık 2021 tarih aralığında gönüllü bir şekilde araştırmaya katılım sağlayan 450 sağlık çalışanına anket ulaştırılmış, kullanılabilir nitelikte olan 270 adedi değerlendirmeye alınmıştır (Cohen & diğ. 2000; Kalaycı, 2016; Kılıç, 2016; Sarıçam & diğ., 2014).

Ankete ait geçerlilik ve güvenilirlik analizi yapılarak Tablo 1'de yer verilmiştir. Cronbach'ın alpha katsayısı bir ölçeğin güvenilirliğini test etmek, içinde bulunan maddelerin homojen olma durumunu ve iç tutarlığın ölçülmesi için kullanılır. Ankette kullanılan verilerin faktör analizi açısından uygun olup olmadığını belirlemeye yarayan, kullanılan modeldeki değişkenlerin örnekleme için yeterliliğini istatistiksel olarak ölçen Kaiser Meyer Olkin (KMO) testidir (Köklü & diğ., 2006; Çokluk & diğ., 2010; Field, 2000).

Tablo 1'deki sonuçlara göre; İSG memnuniyeti ve ergonomi ölçeklerinin Cronbach Alpha değeri = 0,929; meslek hastalıkları ve İSG tedbirleri ölçeklerinin Cronbach Alpha değeri = 0,963; ve iş kazaları ölçeğinin Cronbach Alpha değeri= 0,977 olarak bulunmuştur.

Elde edilen sonuçlar her birinin güvenilir olarak yüksek derecede bir ölçek ($0,80 \leq \alpha < 1,00$) olduğu şeklinde yorumlanabilir.

Tablo 1. Ölçeklere İlişkin Güvenilirlik Analizi Sonuçları

Ölçek/Boyut	İfade sayısı	Ortalama	Cronbach's Alpha
İSG Memnuniyet	9	3,64	0,929
Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)= ,917; Bartlett testi:$\chi 2$ = 1773,346; p=0,000			
Meslek Hastalıkları	12	2,81	0,963
Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)= ,931; Bartlett testi:$\chi 2$ = 3743,838; p=0,000			
İş Kazaları	27	3,52	0,977
Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)= ,952; Bartlett testi:$\chi 2$ = 9278,363; p=0,000			
İSG Tedbirleri	13	3,58	0,963
Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)= ,933; Bartlett testi:$\chi 2$ = 4034,617; p=0,000			
Ergonomi	22	3,60	0,929
Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)= ,930; Bartlett testi:$\chi 2$ = 5545,297; p=0,000			

Literatürde (değişkenler arasındaki farklılıkların analizi için) sıklıkla kullanılan (ANOVA, T testi vb) parametrik testlerin temel varsayımlardan birisi (parametre kestirimi yapılmasında kilit rol oynayacak olan) verilerin normal dağılımda bulunmasıdır (Tablo 9-Tablo 11). Normallik analizi ortaya çıkan sonuçların normal dağılım gösterip göstermediğini bulabilmek amacıyla uygulanan bir yöntemidir. Bazı analizleri yapmadan önce uygulanması gereken ve hangi analizlerin yapılacağına karar vermemize yardım eden bir yöntemdir. Çarpıklık ve basıklık, normal dağılımın değerlendirilebileceği ölçütlerdir. Bunlar sırasıyla dağılımın ortalama etrafındaki simetriden ne kadar saptığını ve verilerin tepe noktalarının durumunun normalden sapması hakkında bilgi verirler. Bu ölçütler yorumlanarak bir veri seti dağılımının normal bir dağılım olup olmadığı hakkında bir fikir edinilebilir. Bu yüzden yapılan anket çalışmasından elde edilen verilerin normal dağılım gösterip göstermediğini anlayabilmek için -Merkezi Limit Teorimine göre kullanılabilir olmakla beraber- "Çarpıklık ve Basıklık" değerleri ayrıyeten kontrol edilmiştir (Dizdar, 2004; George ve Mallery, 2010; Oppong ve Agbedra, 2016; Kalaycı, 2016; Uysal ve Kılıç, 2022).

Araştırmaya ait bu değerlerin -1,5 ve +1,5 arasında yer aldığına ulaşılarak, çalışmada kullanılan ölçeğin normal dağılım ile analiz edilebileceğini görülmüştür. Yani, bu değerlerin bulunması ile araştırmanın devamında (Çarpıklık ve Basıklık ± 1 olarak çıktığı için) parametrik testler yapılabilecektir. Yapılan analizler neticesinde ölçekte yer alan maddelerin (ilgili ifadelere ait sonuçların) normal dağılımda olduğu tespiti yapılarak devam edilmiştir. Özetle, araştırmaya katılanlardan alınan cevaplardan çıkan sonuçlar, normal dağılım göstermesinden dolayı parametrik analizler kullanılmıştır.

3.3. Hipotezler

Araştırma kapsamında sağlık çalışanlarının İSG algılarını araştırmaya yönelik oluşturulan hipotezler aşağıda oluşturulmuştur.

- H1: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları yüksektir.
- H2: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları cinsiyete göre anlamlı farklılık gösterir.
- H3: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları yaşa göre anlamlı farklılık gösterir.
- H4: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları medeni duruma göre anlamlı farklılık gösterir.
- H5: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları eğitim düzeyine göre anlamlı farklılık gösterir.
- H6: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları unvana göre anlamlı farklılık gösterir.
- H7: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları çalışma türüne göre anlamlı farklılık gösterir.
- H8: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları mesleki deneyimi süresine göre anlamlı farklılık gösterir.
- H9: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları gelir düzeyine göre anlamlı farklılık gösterir.
- H10: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları İSG ile ilgili eğitim almaları durumuna göre anlamlı farklılık gösterir.
- H11: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları çalışma ortamında herhangi bir meslek hastalığı geçirme durumuna göre anlamlı farklılık gösterir.

- H12: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları çalışma ortamında iş kazası geçirme durumuna göre anlamlı farklılık gösterir.
- H13: Sağlık çalışanlarının kurumlarındaki İSG çalışmalarına yönelik memnuniyet düzeyleri ile unvanları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar vardır.
- H14: Sağlık çalışanlarının kurum yönetimince alınmış, alınacak İSG tedbirleri ile eğitim durumları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar vardır.
- H15: Sağlık çalışanlarının kurumdaki çalışma ortamı ergonomisi ile kurumda çalışma süresi arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar vardır.

3.4. Araştırmanın Etik Boyutu

Çankırı Karatekin Üniversitesi Etik Kurulundan (03/06/2021 tarihli ve 20 sayılı toplantı) bu araştırmanın yapılabileceğine dair Etik Kurul Onayı alınmıştır.

Sürecin devamında, Etik Kurulunun onayı sonrasında araştırmanın (anketlerin) Çankırı Devlet Hastanesi, Çankırı Ağız ve Diş Sağlığı Merkezi, Çankırı Aile Sağlığı Merkezleri, Kurşunlu Devlet Hastanesi, Kurşunlu Aile Sağlığı Merkezleri, Ilgaz Devlet Hastanesi, Ilgaz Aile Sağlığı Merkezlerinde yapılabilmesi için Çankırı İl Sağlık Müdürlüğünden kamu hastaneleri için (ve ayrıca özel hastaneler için ise Çankırı Karatekin Özel Hastanesinden vb.) gerekli onay ve izinler alınmıştır.

3.5. Bulgular

Araştırmanın bu bölümünde, Çankırı ilindeki sağlık çalışanlarının İSG algıları ölçülmesi amacıyla toplam 270 sağlık çalışanına (yüzyüze uygulanan anket yöntemi ile elde edilen) bulgulara (verilere) yer verilmiştir (Tablo 2-Tablo 11). Araştırmanın kriterleri ve anket formunda yer alan sağlık çalışanlarının İSG memnuniyetlerine yönelik algıları için oluşturulan kavram ve ifadeler) için literatürde yer alan anketlerden ve (araştırmada yer alacak maddelerin olgusal/yargısal verileri kapsamadaki yeterlilikleri) çalışma öncesinde derlenen uzman görüşlerinden (ön uygulama sonuçlarından) faydalanılmıştır (Büyüköztürk, vd., 2013; Öztürk ve Babacan, 2012; Elçin, 2020).

Sağlık çalışanları için ankette yer alan -farklı bölümler altında geliştirilen- sorular "İSG memnuniyet algıları" (Tablo 2), "mesleki hastalık algıları" (Tablo 3), "iş kazaları algıları" (Tablo 4), "İSG tedbirleri algıları" (Tablo 5), "Ergonomi algıları" (Tablo 6), "İSG algıları" (Tablo 7), "İSG algılarının Cinsiyet, Medeni Durum, İSG Eğitimi Almış Olma, Meslek Hastalığı Geçirmiş Olma ve İş Kazası değişkenlerine göre" sonuçları (Tablo 8), "İSG algılarının Yaş, Eğitim Durumu, Unvan, Çalışma Türü, Mesleki Deneyim ve Gelir Düzeyi farklılıklarına göre" sonuçları (Tablo 9), "Eğitim Durumlarına Göre, Kurum Yönetimince Alınmış, Alınacak İSG Tedbirleri Algılarına Yönelik Farklılıklarına göre" sonuçları (Tablo 10), "Kurumdaki Çalışma Sürelerine Göre, Kurumdaki Çalışma Ortamı Ergonomisi Algılarına göre" analiz sonuçları (Tablo 11) bu bölümde sırayla sunulacaktır.

Araştırmaya katılan sağlık çalışanları ile ilgili cinsiyet, yaş, medeni durumu, eğitim durumu, unvanı, çalışma türü, mesleki deneyimi süresi, kurumda çalışma süresi, gelir düzeyi, İSG ile ilgili eğitim alıp almadığı, İSG ile ilgili eğitim aldıysa nerede aldığı, çalışma ortamında herhangi bir mesleki hastalık geçirip geçirmeme ve yine çalışma ortamında iş kazası geçirip geçirmeme durumları demografik özellikleri aşağıda gösterilmiştir.

Araştırmaya katılan sağlık çalışanlarının %42,6'sının (115) erkek, %57,4'ünün (155) kadın olduğu görülmektedir. %14,4'ünün 18-24 yaş aralığında, %39,3'ünün 25-35 yaş aralığında, %30,0'ının 36-45 yaş aralığında, %12,6'sının 46-55 yaş aralığında, %3,7'sinin 56 ve üzeri yaş aralığında olduğu görülmektedir. Katılımcıların, %66,7'sinin evli, %33,3'ünün bekar olduğu görülmektedir. %2,6'sının ilköğretim mezunu, %24,8'inin lise mezunu, %25,6'sının önlisans mezunu, %35,9'unun lisans mezunu, %11,1'inin lisansüstü mezunu olduğu görülmektedir.

Katılımcıların unvan olarak, %17,4'ünün doktor, %25,9'unun hemşire, %6,7'sinin sağlık memuru, %4,8'inin acil tıp teknikeri, %0,7'sinin anestezi teknisyeni, %4,8'inin ebe, %0,4'ünün ebe yardımcısı, %4,4'ünün anestezi teknikeri, %1,1'inin radyoloji teknikeri, %7,8'inin daimi işçi, %6,3'ünün memur, %3,0'ının röntgen teknikeri, %0,4'ünün röntgen teknisyeni, %1,9'unun sağlık teknikeri, %2,6'sının VHKİ, %2,6'sının tıbbi sekreter, %0,4'ünün fizyoterapist, %0,7'sinin laboratuvar teknikeri, %0,4'ünün ilk ve acil yardım teknikeri, %3,0'ının ağız ve diş sağlığı teknikeri, %2,2'sinin sağlık teknisyeni, %1,1'inin tekniker, %1,5'inin stajyer olduğu görülmektedir.

Katılımcıların çalışma türüne bakıldığında, %54,8'inin gündüz çalıştığı, %31,9'unun nöbet usulü çalıştığı, %8,1'inin hepsinde çalıştığı, %2,2'sinin gündüz ve gece çalıştığı, %3,0'ının gündüz ve nöbet usulü çalıştığı görülmektedir. Katılımcıların mesleki deneyimi süresine bakıldığında, %8,5'inin 1 yıldan az, %26'sının 1-4 yıl arası, %18,9'unun 5-9 yıl arası, %17,8'inin 10-14 yıl arası, %28,9'unun 15 yıl ve üzeri olduğu görülmektedir. Katılımcıların kurumda çalışma süresine bakıldığında, %11,5'inin 1 yıldan az, %35,6'sının 1-4 yıl arası, %18,9'unun 5-9 yıl arası, %19,7'sinin 10-15 yıl arası, %14,4'ünün 15 yıl ve üzeri olduğu görülmektedir. Katılımcıların gelir düzeyine bakıldığında, %23,3'ünün düşük, %69,3'ünün orta, %6,7'sinin yüksek, %0,7'sinin çok yüksek olduğu görülmektedir.

Katılımcılar İSG ile ilgili eğitim aldınız mı sorusuna, %88,9'unun evet, %11,1'inin hayır olarak cevap verdiği görülmektedir. Katılımcıların İSG ile ilgili eğitim aldıysanız nerede aldınız sorusuna, %22,2'sinin okul döneminde, %10,7'sinin seminer, kurs, kongrede, %33,3'ünün kurum içi oryantasyonunda, %0,4'ünün okul döneminde, %56,3'ünün hizmetiçi eğitimde, %1,9'unun diğer olarak cevap verdiği görülmektedir.

Katılımcıların çalışma ortamında herhangi bir mesleki hastalık geçirdiniz mi sorusuna, %74,8'inin hayır, %7,8'inin sindirim sistemi hastalıkları (ülser, kolit, kabızlık vb.), %9,6'sının pisiko-sosyal bozukluklar (panik atak, depresyon vb.), %10'unun cilt hastalıkları (egzama, dermatitler, saç dökülmesi vb.), %6,7'si kardiyo-vasküler hastalıklar (hipertansiyon-varis vb.), %10,4'ünün kas-eklem hastalıkları (bel fıtığı, carpal tunners. vb.), %3,7'sinin sinir sistemi hastalıkları (sebro-vas., bel fıtığı vb.), %3'ünün enfeksiyon hastalıkları (tüberküloz, hepatit AIDS vb.), %1,5'inin üreme sistemi hastalıkları (kısırlık, olumsuz gebelik sonuçları) cevaplarını vermişlerdir.

Katılımcıların, çalışma ortamında iş kazası geçirdiniz mi ifadesine, %65,2'sinin hayır, %20'sinin yumuşak doku travması, %11,9'unun bel, kas, eklem yaralanmaları, %0,7'sinin elektrik çarpmaları ve yanıklar, %5,9'unun travmalar, %2,6'sının fiziksel şiddete maruz kalma, %19,3'ünün sözel şiddete maruz kalma, %11,1'inin psikolojik şiddete maruz kalma, %9,6'sının kronik rahatsızlıklar, %6,7'sinin alerjik rahatsızlıklar, %3,3'ünün radyasyona maruz kalma olarak cevap verdiği ve bu soruda birden fazla seçeneği işaretlediği görülmektedir.

3.5.1 Sağlık çalışanlarının İSG memnuniyet algıları

Araştırmanın ön uygulamasından (uzman görüşlerinden) ile ilgili literatürden derlenen bilgilerle oluşturulan anket formunda, sağlık çalışanlarının İSG memnuniyetine yönelik algılarını belirlemek üzere dokuz (9) ifadeye yer verilmiştir. Gerçekleştirilen anket sonucu elde edilen bilgiler, bilgisayar destekli bir istatistik programından faydalanılarak istatistiksel analizler (ve tabloları) oluşturulmuştur (Tablo 1-11). Araştırmada kullanılan nicel veri analizleri, verilerin toplanarak incelenmesi neticesinde anlamlı sonuçlar bulunması yönetimlerdir.

Katılımcıların yapılan anketteki ifadelere (sorulara) verdikleri cevap düzeyleri ile ortalama ($\bar{X}$) ve standart sapma (s.s.) değeri Tablo 2'de yer almaktadır. Bu tabloda sağlık çalışanlarının İSG memnuniyetleri algısı konusundaki duygu ve düşünceleri (hiç memnun değilim – çok memnunum ölçekleri arasında puanlandırılmak suretiyle) ölçülmeye çalışılmıştır.

Tablo 2. Sağlık Çalışanlarının İSG memnuniyet Algıları Bulgular

İSG Memnuniyeti	**Ortalama ($\bar{X}$)**	**Standart Sapma (s.s.)**	**Cevapların Dağılımı** 1	2	3	4	5
Çalışma saatleri/nöbetler/vardiyalar	3,41	1,123	24	31	58	123	34
Bu kurumda çalışıyor olmanın verdiği memnuniyet	3,57	1,045	16	22	67	121	44
Çalışanlar arası ilişkiler	3,49	1,041	17	22	81	111	39
Kişisel Koruyucu Donanım (eldiven, maske vb.) malzemelerinin kalitesi	3,74	,993	13	14	56	133	54
Çalışma ortamının donanımı ve dizaynı (Ergonomisi)	3,54	1,015	13	23	82	109	43
Kullanılan araç-gereçlerin ergonomisi	3,67	,928	8	18	73	127	44
İş kazası, meslek hastalığında kurumsal sorumluluk desteği	3,74	,965	11	15	59	134	51
Aşı, koruyucu malzeme, araç-gereç vb. sağlık önlemleri	3,94	,860	5	10	48	140	67
Kullanılan temizlik malzemelerinin kalite ve güvenliği	3,69	,961	9	17	75	118	51

Not: 1-Hiç memnun değilim, 2-Memnun değilim, 3-Kısmen Memnunum, 4-Memnunum, 5-Çok Memnunum

$\bar{X}$: Aritmetik Ortalama, s.s. Standart Sapma

Tablo 2'de sunulduğu üzere, sağlık çalışanlarının İSG memnuniyetine yönelik algılarını belirlemek üzere sorulan ifadelerden elde edilen sonuçlarda en yüksek ortalama değer, "Sağlık güvenliği önlemleri (aşı, koruyucu malzeme, araç-gereç vb.)" sorusunda elde edilen cevap dağılımı ile 3,94 olarak elde edilmiş, en düşük ortalama değer ise, "Çalışma saatleri/nöbetler/vardiyalar" sorusunda elde edilen cevap dağılımı ile 3,41 olarak elde edilmiştir.

3.5.2 Sağlık çalışanlarının mesleki hastalık algıları

Anket formunda sağlık çalışanlarının meslek hastalıklarına yönelik algılarını belirlemek üzere oniki (12) ifadeye yer verilmiştir. Katılımcıların ifadelere verdikleri cevap düzeyleri ve ortalama değerler Tablo 3'te yer almaktadır.

Tablo 3. Sağlık Çalışanlarının mesleki hastalık algıları bulguları

Meslek Hastalıkları	Ortalama	Standart Sapma	Cevapların Dağılımı				
			1	2	3	4	5
Duygusal sorunlar görülmüyor	2,74	1,223	58	52	83	57	20
Ruhsal sorunlar (depresyon vb.) görülmüyor	2,79	1,266	57	55	70	64	24
Aşırı yorgunluk görülmüyor	2,59	1,239	66	66	70	48	20
Uykusuzluk sorunu görülmüyor	2,73	1,255	62	55	66	69	18
Zihinsel yorgunluk (koordinasyon eksikliği vb.) görülmüyor	2,66	1,242	62	60	79	46	23
Çalışanlarda varisler görülmüyor	2,75	1,312	66	48	72	56	28
Ağrıları (kol ve bacak) sorunları görülmüyor	2,69	1,316	66	62	60	54	28
Sinir sistemi hastalıkları (bel fıtığı vb.) görülmüyor	2,77	1,284	58	61	61	65	25
Sindirim sistemi (kabızlık, ülser vb.) görülmüyor	2,91	1,280	55	42	70	77	26
Enfeksiyon hastalıkları (hepatit, AIDS vb.) görülmüyor	3,20	1,259	37	42	61	91	39
Solunum yolu hastalıkları görülmüyor	3,10	1,278	41	48	61	85	35
Alerjik sorunlar (dermatit vb.) görülmüyor	2,90	1,347	56	57	49	74	34

Sağlık çalışanlarının meslek hastalıklarına yönelik algılarını belirlemek üzere sorulan ifadelerden elde edilen sonuçlarda en yüksek ortalama değer, "Enfeksiyon hastalıkları (hepatit, AIDS vb.) görülmüyor" sorusunda elde edilen cevap dağılımı ile 3,20 olarak elde edilmiş, en düşük ortalama değer ise, "Aşırı yorgunluk görülmüyor" sorusunda elde edilen cevap dağılımı ile 2,59 olarak elde edilmiştir.

3.5.3 Sağlık çalışanlarının iş kazaları algıları

Anket formunda sağlık çalışanlarının iş kazalarına yönelik algılarını belirlemek üzere 27 ifadeye yer verilmiştir. Katılımcıların ifadelere verdikleri cevap düzeylerini gösteren ortalamalar ve dağılımları Tablo 4'te yer almaktadır.

Tablo 4. Sağlık Çalışanlarının İş Kazaları Algıları Bulguları

İş kazaları	Ortalama	Standart Sapma	Cevapların Dağılımı				
			1	2	3	4	5
Şiddet vakaları (hasta, hasta yakınları vb.) yaşanmıyor (bu tip kazalar olmuyor)	2,80	1,365	62	60	55	56	37
Travmatik (çok ağır, yoğun bakım gerektiren) iş kazaları görülmüyor	3,42	1,234	27	36	58	94	55
İğne batması görülmüyor	2,83	1,312	54	62	66	53	35
Kan-vücut sıvıları ile maruziyet görülmüyor	2,78	1,390	68	54	55	55	38
Alerjik reaksiyon (akut, subakut veya kronik) görülmüyor	3,15	1,247	36	44	74	76	40
Zehirlenme (etilen oksit, besin, ilaç, radyasyon vb.) görülmüyor	3,52	1,197	25	26	60	101	58
Kimyasal madde ve ilaçla maruziyet (akut ve kronik sağlık sorunları) görülmüyor	3,49	1,237	27	31	55	97	60
Yanık vakaları görülmüyor	3,62	1,169	21	25	53	107	64
Çalışırken yanma kazası görülmüyor	3,66	1,190	23	23	45	111	68
Elektrik çarpması görülmüyor	3,78	1,060	13	19	52	116	70
Patlama sonucu iş kazası yaşanmıyor	3,82	1,111	16	19	42	114	79
Çalışırken düşme ve incinme kazası görülmüyor	3,43	1,241	28	33	60	92	57
Çalışırken parça, malzeme düşmesi kazası görülmüyor	3,51	1,194	22	33	59	97	59
Çalışırken çarpma kazası görülmüyor	3,51	1,222	26	29	55	100	60
Çalışırken uzuv sıkışması (kol, bacak, el vb.) kazası görülmüyor	3,59	1,191	22	30	47	109	62
Çalışırken uzuv kopması (kol, bacak, el vb.) kazası görülmüyor	3,81	1,120	16	21	40	114	79
Çalışırken toksik madde sıçraması kazası görülmüyor	3,69	1,172	19	25	50	102	74
Çalışırken boğucu/zehirleyici gaz solunum kazası görülmüyor	3,72	1,125	17	23	48	113	69
Çalışırken göze yabancı cisim kaçması kazası görülmüyor	3,45	1,251	27	36	56	91	60
Çalışırken kafa yaralanmaları (baş, göz, yüz vb.) görülmüyor	3,65	1,152	19	25	53	107	66
Çalışırken boyun ve omurga yaralanmaları görülmüyor	3,73	1,117	17	22	47	116	68
Çalışırken göğüs kafesi, solunum organları yaralanmaları görülmüyor	3,75	1,115	18	20	41	123	68
Çalışırken kalça, diz kapağı, uyluk kemiği yaralanmaları görülmüyor	3,66	1,149	21	22	48	117	62
Çalışırken omuz, üst kol, dirsek yaralanmaları görülmüyor	3,63	1,162	20	28	47	113	62
Çalışırken ön kol, el bileği, el içi, parmak yaralanmaları görülmüyor	3,60	1,202	23	27	51	103	66
Çalışırken diz kapağı, baldır, ayak yaralanmaları görülmüyor	3,66	1,164	21	23	49	11	66
Çalışırken iç organ yaralanmaları görülmüyor	3,84	1,112	16	19	39	115	81

Sağlık çalışanlarının iş kazalarına yönelik algılarını belirlemek üzere sorulan ifadelerden elde edilen sonuçlarda en yüksek ortalama değer, "Çalışırken iç organ yaralanmaları görülmüyor" sorusundaki cevap dağılımı ile 3,84 olurken, en düşük ortalama değer ise, "Kan-vücut sıvıları ile maruziyet görülmüyor" sorusundaki ile 2,78 olarak elde edilmiştir.

3.5.4 Sağlık çalışanlarının İSG tedbirleri algıları

Anket formunda sağlık çalışanlarının İSG tedbirlerine yönelik algılarını belirlemek üzere oniki (13) ifadeye yer verilmiştir. Katılımcıların ifadelere verdikleri cevap düzeyleri ve ortalama değerler Tablo 5'te yer almaktadır.

Tablo 5. Sağlık Çalışanlarının İSG Tedbirleri Algıları Bulguları

İSG Tedbirleri	Ortalama	Standart Sapma	Cevapların Dağılımı				
			1	2	3	4	5
Motivasyon (iş doyumu) arttırıcı uygulamalar yapılmaktadır.	2,80	1,362	67	50	54	68	31
İSG sorunları ile yakından ilgilenmektedir	3,33	1,187	33	21	81	95	40
İSG soruları iletildiğinde, acilen çözümlenmektedir	3,41	1,206	32	19	73	98	48
İş kazası vuku bulması durumunda, gerekli sorumlukları üstlenmektedir	3,49	1,150	28	13	74	108	47
Meslek hastalığı durumunda, gerekli sorumlukları üstlenmektedir	3,48	1,159	26	20	71	104	49
Sağlık taraması ve muayenesi düzenli yapılmaktadır	3,90	1,128	20	9	39	112	90
Çalışanların İSG yönelik eğitimler yapılmaktadır	3,84	1,070	15	12	53	111	79
İSG için yasal zorunluluk olan eğitim programları düzenlenmektedir	3,88	1,079	14	15	46	110	85
İSG için yasal zorunluluklar dışında eğitim programları düzenlenmektedir	3,60	1,181	22	24	60	99	65
İş kazası bilgi tutanakları kullanılmaktadır	3,85	1,085	15	18	38	121	78
Yaralanmaya formaları kullanılmaktadır	3,77	1,138	20	15	48	112	75
Meslek hastalıkları formları kullanılmaktadır	3,69	1,160	21	18	56	104	71
İSG kayıt sistemi bulunmaktadır	3,67	1,158	21	20	54	105	70

Sağlık çalışanlarının İSG tedbirlerine yönelik algılarını belirlemek üzere sorulan ifadelerden elde edilen sonuçlarda en yüksek ortalama değer, "Sağlık taraması ve muayenesi düzenli yapılmaktadır" sorusundaki cevap dağılımı ile 3,90 olurken, en düşük ortalama değer ise, "Motivasyon (iş doyumu) arttırıcı uygulamalar yapılmaktadır" sorusundaki ile 2,80 olarak elde edilmiştir.

3.5.5 Sağlık çalışanlarının ergonomi algıları

Anket formunda sağlık çalışanlarının ergonomiye yönelik algılarını belirlemek üzere yirmi iki (22) ifadeye yer verilmiştir. Katılımcıların ifadelere verdikleri cevap düzeyleri ve ortalama değerler Tablo 6'da yer almaktadır.

Tablo 6. Sağlık Çalışanlarının Ergonomi Algıları Bulguları

Ergonomi	Ortalama	Standart Sapma	Cevapların Dağılımı				
			1	2	3	4	5
İSG'ye yönelik kayıt sistemi vardır (sağlık formu vb.).	3,73	1,129	19	17	52	111	71
Araçlar sık bozulmaktadır.	2,37	1,254	83	80	54	31	22
Araçların kadranları okunması zordur.	2,53	1,233	67	72	77	29	25
Koridorlarda yönlendirme levhaları vardır.	2,42	1,252	72	91	55	25	27
Zemin döşemesi düzgündür.	3,89	1,131	16	16	44	99	95
Giriş kapıları otomatik açılıp, kapanır.	3,70	1,223	22	21	58	83	86
Merdivenlerin her iki tarafı parmaklıdır	3,70	1,283	26	23	49	80	92
Kapılar acil çıkış yönüne doğru açılır.	3,72	1,196	19	22	61	82	86
Engelli tuvaleti vardır.	3,96	1,090	12	16	45	94	103
Malzemeler (eldiven vb.) çok rahat bulunmaktadır.	4,04	1,093	16	8	35	100	111
Koruyucu malzemeler çok rahat bulunmaktadır.	3,81	1,113	13	18	65	85	89
Satın alınan malzeme ve araç kalitelidir (sağlam/güvenilir vb.)	3,81	1,112	16	14	58	98	84
Satın alınan ve kullanılan ekipman İSG açısından değerlendirilmektedir.	3,62	1,120	13	23	69	98	63
Hasta taşıma kuralları vardır ve uygulanmaktadır.	3,68	1,082	15	21	62	110	62
Hasta kaldırma kuralları vardır ve uygulanmaktadır.	3,79	1,095	15	20	45	116	74
Özel ilaçlar (kemoterapi vb.) için özel talimatlar uygulanmaktadır.	3,78	1,115	17	16	54	106	77
Kan vb. sıvılarından korunmak için önlemler alınmaktadır	3,71	1,159	21	18	51	108	72
Toksik, tıbbi, atıklar vb. için önlemler alınmaktadır.	3,82	1,074	14	15	55	108	78
Işık/aydınlık uygun ve yeterlidir.	3,94	1,033	9	18	44	108	91
Çalışma ortamında ısı ve nem takibi yapılmaktadır	3,83	1,118	14	20	51	98	87
Isı/ısınma uygun ve yeterlidir.	3,70	1,217	21	25	50	91	83
Havalandırma uygun ve yeterlidir.	3,64	1,223	24	26	46	102	72

Sağlık çalışanlarının ergonomiye yönelik algılarını belirlemek üzere sorulan ifadelerden elde edilen sonuçlarda en yüksek ortalama değer, "Kullanılan malzemeler (eldiven/gözlük vb.) çok rahat bulunmaktadır" sorusundaki cevap dağılımı ile 4,04 olurken, en düşük ortalama değer ise, "Araçlar sık bozulmaktadır" sorusundaki ile 2,37 olarak elde edilmiştir.

3.5.6 Sağlık çalışanlarının İSG algıları

Bu çalışmada da katılımcıların İSG'ye yönelik algı düzeyini belirleyebilmek üzere aritmetik ortalama değerler ortaya çıkarılmıştır. Aritmetik ortalamalar üzerinde yorumlama yapılırken aralıklar;

- $1,0 \leq \bar{X} < 1,8$ ise katılımcıların algılarının çok olumsuz; (Oldukça Düşük)
- $1,8 \leq \bar{X} < 2,6$ ise katılımcıların algılarının olumsuz; (Düşük)
- $2,6 \leq \bar{X} < 3,4$ ise katılımcıların algılarının kararsız; (Orta)
- $3,4 \leq \bar{X} < 4,2$ ise katılımcıların algılarının olumlu; (Yüksek)
- $4,2 \leq \bar{X} < 5,0$ ise katılımcıların algılarının çok olumlu; (Oldukça Yüksek) olduğu şeklinde değerlendirilmiştir.

Sağlık çalışanlarının İSG algıları Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7. Sağlık Çalışanlarının İSG Algıları Bulguları

Katılımcıların İş Sağlığı ve Güvenliği Algıları	Cinsiyet	n	Ortalama	Standart Sapma	Algı Düzeyi
Çalışma saatleri/nöbetler/vardiyalar	Erkek	115	3,63	1,096	Yüksek
	Kadın	155	3,26	1,121	Orta
Bu kurumda çalışıyor olmanın verdiği memnuniyet	Erkek	115	3,79	1,096	Yüksek
	Kadın	155	3,41	0,979	Yüksek
Çalışanlar arası ilişkiler	Erkek	115	3,64	1,078	Yüksek
	Kadın	155	3,38	1,002	Yüksek
Kişisel Koruyucu Donanım (eldiven, maske vb.) malzemelerinin kalitesi	Erkek	115	3,87	1,022	Yüksek
	Kadın	155	3,65	0,964	Yüksek
Çalışma ortamının donanımı ve dizaynı (Ergonomisi)	Erkek	115	3,72	1,064	Yüksek
	Kadın	155	3,41	0,958	Yüksek
Kullanılan araç-gereçlerin Ergonomisi	Erkek	115	3,83	0,985	Yüksek
	Kadın	155	3,55	0,869	Yüksek
İş kazası-meslek hastalığı durumunda kurumun sorumluluk alması/desteği	Erkek	115	3,92	0,870	Yüksek
	Kadın	155	3,60	1,010	Yüksek
Sağlık güvenliği önlemleri (aşı, koruyucu malzeme, araç-gereç vb)	Erkek	115	4,06	0,930	Yüksek
	Kadın	155	3,85	0,796	Yüksek
Kullanılan temizlik malzemelerinin kalite ve güvenliği	Erkek	115	3,85	1,019	Yüksek
	Kadın	155	3,56	0,898	Yüksek

Tablo 7'de gösterilen sonuçlarda, katılımcıların değerlendirmelerine göre, sağlık güvenliği önlemleri ifadesi en yüksek ortalama puanı almıştır. Genel olarak bir ifade haricinde hem kadınlarda, hem de erkeklerde İSG algı düzeyi yüksek olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre "H1: Sağlık çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği algıları yüksektir." hipotezi doğrulanarak kabul edilmiştir.

3.5.7 Sağlık çalışanlarının İSG algısının cinsiyet, medeni durum, İSG eğitimi almış olma, meslek hastalığı geçirmiş olma ve iş kazası geçirmiş olması değişkenlerine göre karşılaştırılması

Katılımcıların İSG'ye yönelik algılarının cinsiyet, medeni durum, İSG eğitimi almış olma, meslek hastalığı geçirmiş olma ve iş kazası geçirmiş olması değişkenlerine göre istatistiksel olarak farklılaşma durumuna bakmak için t-testi yapılmıştır. Test sonuçları Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 8. Sağlık Çalışanlarının İSG Algısının Cinsiyet, Medeni Durum, İSG Eğitimi Almış Olma, Meslek Hastalığı Geçirmiş Olma ve İş Kazası Değişkenlerine Göre Sonuçlar

	Grup	n	Ortalama	Standart Sapma	t	p
İş Sağlığı Ve Güvenliğine Yönelik Algı	Erkek	115	3,8126	,84227	2,978	,216
	Kadın	155	3,5197	,73702		
	Evli	180	3,6821	,81538	1,130	,286
	Bekar	90	3,5691	,75264		
	İSG Eğitimi almış	240	3,6935	,77602	2,702	,004*
	İSG Eğitimi almamış	30	3,2519	,85218		
	Meslek hastalığı geçirmemiş	202	3,7354	,76120	3,144	,002*
	Meslek hastalığı geçirmiş	68	3,3742	,83830		
	İş kazası var	176	3,8121	,72594	4,709	,000*
	İş kazası yok	94	3,3357	,82847		

Tablo 8'de gösterilen sonuçlara göre, İSG algı ortalamalarının cinsiyet ve medeni durumlarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılaşma olmadığı görülmüştür. Buna karşın İSG eğitimi almış olma (p=,004<0,05), meslek hastalığı geçirme durumu (p=,002<0,05) ve iş kazası yaralanma durumu (p=,000<0,05) değişkenleri açısından anlamlı farklılıklar belirlenmiştir.

İSG eğitimi almış bireylerin ortalamalarının (3,69), almamış olan bireylerin algı ortalamalarından (3,25); meslek hastalığı geçirmemiş olanların ortalamalarının (3,73), meslek hastalığı geçirmiş olanlardan (3,37) ve iş kazası yaşamış olanların algı ortalamalarının (3,81), yaşamamış olanların algı ortalamasından (3,33) daha yüksek olarak çıktığı tespit edilmiştir.

Bu sonuçlara göre: "H2: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları cinsiyete göre anlamlı farklılık gösterir." ve "H4: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları medeni duruma göre anlamlı farklılık gösterir." hipotezleri red edilmiştir. Diğer yandan "H10: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları İSG ile ilgili eğitim almaları durumuna göre anlamlı farklılık gösterir.", "H11: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları çalışma ortamında herhangi bir meslek hastalığı geçirme durumuna göre anlamlı farklılık gösterir." ve "H12: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları çalışma ortamında iş kazası geçirme durumuna göre anlamlı farklılık gösterir." Hipotezleri doğrulanarak kabul edilmiştir.

3.5.8 Sağlık çalışanlarının İSG algısının yaş, eğitim durumu, unvan, çalışma türü, mesleki deneyim ve gelir düzeyi değişkenlerine göre karşılaştırılması

Bağımsız değişkende çok sayıda grup olduğu durumlarda ANOVA analizi kullanıldığından, araştırmaya katılan sağlık çalışanlarının yaş, eğitim durumu, unvan, çalışma türü, mesleki deneyim ve gelir düzeyine göre İSG algılarına ait farklılıkları incelemek amacıyla ANOVA analizi (Tablo 9-11) kullanılmıştır. Tablo 9-11'de, ANOVA testlerine ait bu sonuçlar aktarılmıştır.

Tablo 9. Sağlık Çalışanlarının İSG Algılarının Yaş, Eğitim Durumu, Unvan, Çalışma Türü, Mesleki Deneyim ve Gelir Düzeyi Farklılıklarına Göre ANOVA Analizi Sonuçları

	Yaş	n	Ortalama	Standart Sapma	F	p	Tukey
İş Sağlığı ve Güvenliği Algısı	a-18-24	39	3,7550	,67547			
	b-25-35	106	3,4088	,85526			
	c-36-45	81	3,8326	,72481	4,231	,002	b-c
	d-46-55	34	3,8137	,74547			
	e-56 ve üzeri	10	3,6111	,77910			
	Eğitim Durumu						
	a-İlköğretim	7	3,5079	,73942			
	b-Lise	67	3,9154	,68250			
	c-Önlisans	69	3,6248	,70043	3,545	,008	b-e
	d-Lisans	97	3,5819	,88450			
	e-Lisansüstü	30	3,3185	,81060			
	Unvan						
	Doktor	47	3,6619	,69387			
	Hemşire	70	3,4460	,94952			
	Sağlık Memuru	18	3,8580	,89686			
	Acil tıp teknikeri	13	3,8291	,70509			
	Anestezi teknisyeni	2	3,7778	1,41421			
	Ebe	13	3,1624	,60112			
	Ebe yardımcısı	1	3,3333	.			
	Anestezi teknikeri	12	3,5093	,58691			
	Radyoloji teknikeri	3	3,1481	,66975			
	Daimi işçi	21	3,7884	,51628			
	Memur	17	4,0392	,73487			
	Röntgen Teknikeri	8	3,6389	1,08826	1,351	,140	-

Röntgen Teknisyeni	1	3,3333	.			
Sağlık Teknikeri	5	3,5778	,34605			
V.H.K.İ	7	4,0952	,44179			
Tıbbi Sekreter	7	3,6508	1,02525			
Fizyoterapist	1	3,3333	.			
Labaratuar Teknikeri	2	3,5556	2,04275			
İlk ve acil yardım teknikeri	1	4,7778	.			
Ağız ve diş sağlığı teknikeri	8	3,7500	,27698			
Sağlık Teknisyeni	6	3,9074	,40010			
Tekniker	3	2,9630	,35717			
Stajyer	4	4,3889	,54810			
Çalışma türü						
Gündüz	148	3,7680	,71398			
Nöbet	86	3,5194	,81942			
Hepsi	22	3,3283	,95734			
Gündüz ve Gece	6	3,6852	1,19343	2,379	,052	-
Gündüz ve Nöbet	8	3,5417	,91901			
Mesleki Deneyim						
a-1 yıldan az	24	3,9130	,69708			
b-1-4 yıl arası	69	3,3671	,84540			
c-5-9 yıl arası	51	3,5882	,78828	3,335	,006	a-b
d-10-14 yıl arası	48	3,7940	,75568			
e-15 yıl ve üzeri	78	3,7664	,74624			
Gelir düzeyi						
a-Düşük	63	3,3898	,93600			
b-Orta	187	3,7308	,72200			a-b
c-Yüksek	18	3,5432	,81462	3,877	,010	
d-Çok yüksek	2	4,5000	,70711			

Tablo 9'da gösterilen test sonucunda İSG algısı ile yaş, eğitim durumu, mesleki deneyim ve gelir düzeyi değişkenleri arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıkların olduğu ($p<0.05$) belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre; "H3: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları yaşa göre anlamlı farklılık gösterir."; "H5: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları eğitim düzeyine göre anlamlı farklılık gösterir."; "H8: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları mesleki deneyimi süresine göre anlamlı farklılık gösterir." ve "H9: Sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları gelir düzeyine göre anlamlı farklılık gösterir." hipotezleri doğrulanarak kabul edilmiştir.

3.5.9 Sağlık çalışanlarının kurum yöntemince alınmış, alınacak İSG tedbirleri algısının, eğitim durumlarına göre farklılıkları

Araştırmaya katılan sağlık çalışanlarının eğitim durumlarına göre, kurum yönetimince alınmış, alınacak İSG tedbirleri algı farklılıklarını değerlendirmek için ANOVA analizi kullanılmıştır. ANOVA analizi sonuçları (gruplardaki örneklem sayılarının eşit olduğu durumlarda değişkenler arasındaki karşılaştırmaların yapıldığı istatistiksel analiz (Tukey) değerleri ile beraber) alttaki tablolarda (Tablo 9-11'de) aktarılmıştır.

Tablo 10. Sağlık Çalışanlarının Eğitim Durumlarına Göre, Kurum Yönetimince Alınmış, Alınacak İSG Tedbirleri Algılarına Yönelik Farklılıkları ANOVA Analizi Sonuçları

	Eğitim Durumu	**n**	**Ortalama**	**Standart Sapma**	**F**	**p**	**Tukey**
Kurum yönetimince alınmış, alınacak İSG tedbirleri	a-İlköğretim	7	3,5595	,57477	2,441	,047	b-e
	b-Lise	67	3,8955	,82500			
	c-Önlisans	69	3,5278	,93264			
	d-Lisans	97	3,4837	1,09553			
	e-Lisansüstü	30	3,3639	,96849			

Tablo 10'da gösterilen test sonucunda kurum yönetimince alınmış/alınacak İSG tedbirleri algısı ile eğitim düzeyi değişkeni arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıkların olduğu ($p<0.05$), belirlenmiştir. Söz konusu farklılığın tespitine yönelik yapılan Tukey testinde bu farklılığın, lise düzeyi eğitim seviyesinde olanlar ile lisansüstü eğitim seviyesi düzeyinde olanların algılarından kaynaklandığı belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre; H14 hipotezi doğrulanarak kabul edilmiştir.

3.5.10 Sağlık çalışanlarının kurumdaki çalışma ortamı ergonomisine yönelik algının, kurumdaki çalışma sürelerine göre farklılıkları

Araştırmaya katılan sağlık çalışanlarının kurumdaki çalışma sürelerine göre, kurumdaki çalışma ortamı ergonomisine yönelik algı farklılıklarını değerlendirmek için ANOVA analizine başvurulmuştur. Tablo 11'de ANOVA analizi sonuçlarına yer verilmiştir.

Tablo 11. Sağlık Çalışanlarının Kurumdaki Çalışma Sürelerine Göre, Kurumdaki Çalışma Ortamı Ergonomisi Algılarına Yönelik ANOVA Analizi Sonuçları

	Çalışma Süresi	n	Ortalama	Standart Sapma	F	p	Tukey
Kurumdaki çalışma ortamı ergonomisi	a-1 yıldan az	31	3,6364	,80426	1,955	,086	b-e
	b-1-4 yıl arası	96	3,4413	,76652			
	c-5-9 yıl arası	51	3,6194	,68556			
	d-10-15 yıl arası	53	3,7911	,70102			
	e-15 yıl ve üzeri	39	3,6643	,61883			

Tablo 11'de gösterilen test sonucunda kurumdaki çalışma ortamı ergonomisi algısı ile kurumdaki çalışma süresi ifadesi arasında istatistiksel açıdan anlamlı farklılıkların bulunduğu ($p<0.05$), belirlenmiştir. Söz konusu farklılığın tespitine yönelik yapılan Tukey testinde bu farklılığın 1-4 yıl arası çalışmakta olanlar ile 15 yıl ve üzerinde çalışan bireylerin algılarından kaynaklandığı belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre; H15 hipotezi doğrulanarak kabul edilmiştir.

4. Sonuçlar, Tartışma ve Öneriler

Sağlıklı ve güvenli olmak, çalışan açısından bulunduğu kuruma çok daha fazla verimli olabilmesi, mutlu ve refah bir topluluk, işveren açısından ise işlerinin aksamadan, sürekliliğinin olması, ülke ekonomisine olumlu yönde katkıda bulunabilmesidir (Çeltik, 2020).

Sağlık Çalışanlarının İş Sağlığı ve Güvenliği Algılarının Araştırılması, Çankırı İli Örneği başlıklı bu çalışmada, Çankırı'da bulunan sağlık çalışanlarının İSG algıları araştırılmıştır.

4.1. Sonuçlar

Çalışmada, sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algılarının yüksek olduğu; İSG'ye yönelik algıları yaşa göre anlamlı farklılık gösterdiği; İSG'ye yönelik algıları eğitim düzeyine göre anlamlı farklılık gösterdiği; İSG'ye yönelik algıları mesleki deneyimi süresine göre anlamlı farklılık gösterdiği; İSG'ye yönelik algıları gelir düzeyine göre anlamlı farklılık gösterdiği; İSG'ye yönelik algıları İSG eğitimi almaları durumuna göre anlamlı farklılık gösterdiği; İSG'ye yönelik algıları çalışma ortamında herhangi bir meslek hastalığı geçirme durumuna göre anlamlı farklılık gösterdiği; İSG'ye yönelik algıları çalışma ortamında iş kazası ya da yaralanma geçirme durumuna göre anlamlı farklılık gösterdiği; kurumlarındaki İSG çalışmalarına yönelik memnuniyet düzeyleri ile unvanları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olmadığı; kurum yönetimince alınmış, alınacak İSG tedbirleri ile eğitim durumları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olduğu; kurumdaki çalışma ortamı ergonomisi ile kurumda çalışma süresi arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır.

Çalışmada İSG'ye yönelik algıları cinsiyete göre anlamlı farklılık göstermediği; İSG algıları medeni duruma göre anlamlı farklılık göstermediği; İSG'ye yönelik algıları unvana göre anlamlı farklılık göstermediği; İSG'ye yönelik algıları çalışma türüne göre anlamlı farklılık göstermediği sonuçlarına ulaşılmıştır.

4.2. Tartışma ve Öneriler

Sağlık sektöründe, çalışanlarının ve kendilerine müracaat edenlerin sağlık ve güvenliğinin korunabilmesi bakımından çalışanların İSG algılarının yüksekliği ciddi önem arz etmektedir. Bu bölümde, çalışmadan elde edilen sonuçları destekleyen literatürdeki diğer çalışmalar gerçek hayatta (çalışanların İSG algılarını artırmaya yönelik) sağlık kurum yönetimlerince iş doyumu ve motivasyon artırıcı uygulamaların yanı sıra alınması öngürülebilen diğer tedbirler ile harmanlanarak sunulmuştur.

Çelik (2016), Günal (2018) ve Çanakçı'nın (2019) yaptıkları çalışmalarda da sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algılarının yüksek olduğunu bildirilmiştir. Bayer ve Günal (2018), Günal (2018) ile Bulut ve arkadaşlarının (2020) yaptığı çalışmalarda, cinsiyet ile İSG algısı arasında bu araştırmaya benzer olarak anlamlı farklılık olmadığı sonucunu elde edilmiştir. Kocaay ve Biçer'in (2022) yaptıkları çalışmada, İSG algısı ile yaş durumu arasında bu araştırmaya benzer olarak anlamlı farklılık olduğu sonucunu elde edilmiştir.

Günal'ın (2018) yaptığı çalışmalarda, sağlık çalışanlarının İSG algısı ile medeni durum arasında bu çalışmaya benzer olarak anlamlı bir farklılık olmadığı sonucuna yer verilmiştir. Köse (2016), Günal (2018) ve Çanakçı'nın (2019) yaptıkları çalışmalarda, İSG algısı ile eğitim düzeyi arasında bu çalışmadakine benzer olarak anlamlı bir farklılık olduğunu savunmaktadır. Çelik (2016) ve Dayan'ın (2016) yaptığı çalışma neticesinde de bu çalışmadikine benzer olarak, İSG algısının unvan değişkenine göre anlamlı olarak farklılık göstermediği yargısına ulaşılmıştır.

Güzel (2017) ve Ocak'ın (2019) yaptıkları çalışmalar sonucunda bu çalışmadakine benzer olarak sağlık çalışanlarının İSG algısı ile çalışma türü arasında anlamlı farklılık göstermediği sonucuna ulaşılmıştır. Bulut ve arkadaşları (2020) ile Çelik'in (2016) yaptıkları çalışmalarda elde edilen sonucun bu çalışmadakine benzer olarak İSG algısının mesleki deneyim süresine göre aralarında anlamlı bir farklılık olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Altay'ın (2015) yaptığı çalışmada elde ettiği sonuca benzer olarak İSG algısının gelir düzeyine göre aralarında anlamlı farklılık gösterdiği sonucu elde edilmiştir.

Ütük (2013), Çelik (2016) ile Bulut ile arkadaşlarının (2020) yaptıkları çalışmalarda elde edilen sonuca benzer olarak sağlık çalışanlarının İSG algısı ile İSG eğitimi almaları durumu arasında anlamlı bir farklılık olduğu sonucu elde edilmiştir. Cebeci'nin (2014) yaptığı çalışma neticesinde elde edilen veriler ile bu çalışmada elde edilen sonuca benzer olarak İSG'ye yönelik algı, çalışma ortamında herhangi bir meslek hastalığı geçirme durumuna göre anlamlı farklılık gösterdiği sonucu elde edilmiştir.

Cebeci'nin (2014) yaptıları çalışmalarda, bu çalışmada elde edilen sonuca benzer olarak sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları edilmiştir. Yine Cebeci'nin (2014) yaptığı çalışmada da bu çalışmadakine benzer olarak anlamlı farklılık olmadığı sonucu elde edilmiştir. Dayan'ın (2016) yaptığı çalışmada çıkan sonuca benzer olarak bu çalışmadada kurum yönetimince alınmış, alınacak İSG tedbirleri ile eğitim durumları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olduğu sonucu elde edilmiştir. Sarıtaç (2014) ve Çabuk'un (2020) yaptıkları çalışmaların sonucuna benzer olarak, kurumdaki çalışma ortamı ergonomisi ile kurumda çalışma süresi arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olduğu sonucuna varılmıştır.

Yapılan çalışma ile literatürdeki diğer çalışmaların birçok bakımdan örtüşüyor olması anlamlı bulunmakta olup, sağlık çalışanlarının İSG algılarının geliştirilmesi çalışmalarına yön verecek niteliktedir. Bununla beraber, literatürle örtüşmeyen yönlerinin sonraki çalışmalarda araştırılmasında fayda bulunmaktadır.

Diğer taraftan İSG'ye yönelik algıları cinsiyete, medeni duruma, unvana ve çalışma türüne göre anlamlı farklılık göstermesi durumları, konuyla ilgili gerçek hayattaki uygulamaları ile kıyaslanabilir.

Cinsiyet ile İSG algısı arasında anlamlı bir farklılık bulunmaması, bu sonucun gerçek hayat uygulamalarıyla kıyaslandığında, dikkate alınması gereken birkaç faktör vardır. Öncelikle, cinsiyet ile İSG algısı arasında anlamlı bir farklılık olmadığı sonucu, bireylerin İSG algısının cinsiyetlerine göre değişmediği anlamına gelir. Ancak, bu sonuç, cinsiyetin İSG uygulamalarındaki rolü hakkında herhangi bir bilgi sağlamaz. Örneğin, bir işyerinde erkeklerin çoğunlukta olduğu bir ortamda, bayanların İSG uygulamalarına karşı daha az ilgi göstermesi mümkündür. Benzer şekilde, bayanların çoğunlukta olduğu bir ortamda, erkeklerin İSG uygulamalarına karşı daha az ilgi göstermesi de mümkündür. İkinci olarak, cinsiyet ile İSG algısı arasında anlamlı bir farklılık olmadığı sonucu, işyerlerinde cinsiyet ayrımcılığı yapılması gerektiği anlamına da gelmez. Son olarak, cinsiyet ile İSG algısı arasında anlamlı bir farklılık olmadığı sonucu, İSG uygulamalarının herkes tarafından aynı şekilde takip edilmesi gerektiği anlamına gelir. Ancak, farklı cinsiyetlerin farklı ihtiyaçları ve zorlukları olabileceği göz önünde bulundurularak, İSG uygulamalarının bu farklılıklara göre uyarlanması gerekebilir. Özetle, cinsiyet ile İSG algısı arasında anlamlı bir farklılık olmadığı sonucu, İSG uygulamalarının cinsiyetlere göre farklılaştırılmasını gerektirmez. Ancak, cinsiyetler arasındaki farklılıkların işyerlerinde ve İSG uygulamalarında dikkate alınması önemlidir.

Bu araştırmanın sonucu, sağlık çalışanlarının İSG algısı ile medeni durumları arasında anlamlı bir farklılık olmadığıdır. Bu sonucun gerçek hayat uygulamalarıyla kıyaslandığında, bazı faktörler dikkate alınmalıdır. Öncelikle, İSG algısı ile medeni durum arasında anlamlı bir farklılık olmaması, herhangi bir medeni durumun İSG uygulamaları için dezavantajlı olduğu anlamına gelmez. İSG uygulamalarının herhangi bir medeni duruma göre uyarlanması veya farklı şekilde uygulanması gerektiğini göstermez. İkinci olarak, sağlık çalışanlarının İSG algısı ile medeni durumları arasında anlamlı bir farklılık olmaması, herhangi bir sağlık çalışanının İSG uygulamalarına karşı daha az ilgi gösterdiği anlamına gelmez. Ancak, farklı medeni durumlarda olan sağlık çalışanları, farklı sosyoekonomik koşullarda yaşayabilirler ve bu nedenle, İSG uygulamalarına erişimleri ve kullanımları farklılık gösterebilir. Son olarak, sağlık çalışanlarının İSG algısı ile medeni durumları arasında anlamlı bir farklılık olmaması, İSG uygulamalarının eşit bir şekilde uygulanması gerektiği anlamına gelir. Ancak, farklı medeni durumlarda olan sağlık çalışanları, farklı ihtiyaçlara sahip olabilirler ve bu nedenle, İSG uygulamalarının bu farklılıklara göre uyarlanması gerekebilir. Özetle, sağlık çalışanlarının İSG algısı ile medeni durumları arasında anlamlı bir farklılık olmaması, İSG uygulamalarının medeni duruma göre farklılaştırılması gerektiği anlamına gelmez. Ancak, farklı medeni durumlarda olan sağlık çalışanlarının farklı ihtiyaçları olabileceği göz önünde bulundurularak, İSG uygulamalarının bu ihtiyaçlara göre uyarlanması gerekebilir.

Bu araştırmanın sonucu, sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algılarının unvana göre anlamlı farklılık göstermediği şeklindedir. Bu sonucun gerçek hayat uygulamalarıyla kıyaslandığında bazı faktörlerin göz önünde bulundurulmasını gerektirir. Öncelikle, İSG uygulamaları, sağlık çalışanlarının unvanına göre farklılık göstermez. Tüm sağlık çalışanları, İSG kurallarına uymakla yükümlüdürler. Bununla birlikte, farklı unvanlardaki sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları farklılık göstermekle birlikte, bu farklılıklar anlamlı değildir. İkinci olarak, unvanlara göre İSG'ye yönelik algılar arasında anlamlı bir farklılık olmaması, tüm sağlık çalışanlarının İSG konusunda eşit bir eğitim aldığını ve bu eğitimin etkili olduğunu gösterir. Bu, İSG konusunda farklı bir eğitime sahip olan farklı unvanlardaki sağlık çalışanlarının, İSG'ye yönelik algıları arasında anlamlı bir farklılık olmadığına dair sonucu destekler. Son olarak, bu durum sağlık kurumlarının İSG konusunda tüm çalışanlarını eşit bir şekilde bilgilendirdiğini ve bu bilgilendirme sürecinin etkili

olduğunu gösterir. Bu da, sağlık kurumlarının İSG konusunda tüm çalışanlarını eşit bir şekilde bilgilendirme ve eğitme konusunda yeterince başarılı olduklarını gösterir. Özetle, sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları unvana göre anlamlı bir farklılık göstermediği sonucu, İSG kurallarının tüm sağlık çalışanları için eşit olduğunu, sağlık kurumlarının İSG konusunda tüm çalışanlarını eşit bir şekilde bilgilendirme ve eğitme konusunda yeterince başarılı olduklarını ve İSG konusunda farklı unvanlara sahip sağlık çalışanları arasında anlamlı bir farklılık olmadığını gösterir.

Bu araştırmanın sonucunda, sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algılarının çalışma türüne göre anlamlı farklılık göstermediği şeklindedir. Bu sonuç gerçek hayat uygulamalarıyla kıyaslandığında bazı faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Öncelikle, İSG uygulamalarının herhangi bir çalışma türüne özgü olmadığı unutulmamalıdır. İSG uygulamaları, herhangi bir sağlık hizmeti sunucusu için geçerlidir ve herhangi bir sağlık hizmeti sunucusunun İSG uygulamalarına uyması gerekmektedir. Bu nedenle, sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları, çalışma türüne göre anlamlı bir farklılık göstermediği sonucu, İSG uygulamalarının tüm sağlık çalışanları için aynı olduğunu göstermektedir. İkinci olarak, sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları, çalışma türüne göre anlamlı bir farklılık göstermediği sonucu, herhangi bir sağlık hizmeti sunucusunun İSG uygulamalarına uyma konusunda eşit bir farkındalığa sahip olduğunu göstermektedir. Bu, çalışma türüne bağlı olarak farklı risklerin olabileceği durumlarda bile, tüm sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik aynı düzeyde bir farkındalığa sahip olduğunu gösterir. Son olarak bu sonuç, İSG uygulamalarının herhangi bir sağlık hizmeti sunucusu için eşit bir şekilde uygulanması gerektiğini göstermektedir. Bu, herhangi bir sağlık hizmeti sunucusunun İSG uygulamalarına uyma konusunda aynı düzeyde farkındalığa sahip olduğu anlamına gelir ve İSG uygulamalarının eşit bir şekilde uygulanması sağlanır. Özetle, sağlık çalışanlarının İSG'ye yönelik algıları, çalışma türüne göre anlamlı bir farklılık göstermediği sonucu, İSG uygulamalarının tüm sağlık çalışanları için aynı olduğunu, sağlık hizmeti sunucusu olarak çalışan herhangi bir kişinin İSG uygulamalarına eşit bir şekilde uyması gerektiğini ve İSG uygulamalarının eşit bir şekilde uygulanması sağlanacağını gösterir.

Son olarak, sağlık alanında yapılan bu çalışmanın benzeri olarak, özellikle çok tehlikeli sınıfta yer alan, madencilik ve metal sektörlerinde de, çapı daha da genişletilerek yapılabilir, alandaki çalışma (daha da) ileriye götürülerek, hastane ve sağlık kurumları özelinde veya bunların ayrı ayrı alt birimlerinde çalışanlar üzerinde yapılabilir, sağlık kurumları ve hastanelerde çalışan doktorlar, hemşireler, tekniker, teknisyenler, ebeler, sağlık memurları, ambulans şoförleri ve tıbbi sekreterler özelinde de çalışmalar yapılabilir.

Sonuç olarak, bu öneriler dikkate alınarak yapılacak bütün faaliyetler, çalışma ortamlarında, sağlıklı ve güvenli ortamların oluşmasını sağlayarak, sağlık çalışanlarının İSG algılarının artması ve devamlılığına katkısı olacağı düşünülmektedir.

Referanslar

Ağuş, M. & Akbel, E. (2020). Sağlık Çalışanlarında Fiziksel Risk Etmenlerinin Değerlendirilmesi. OHS Academy, 3(3), 230-237.

Akgün, S. (2015). Sağlık Sektöründe İş Kazaları. Sağlık Akademisyenleri Dergisi, 2(2), 67-75.

Altay, S. (2015). Türkiye'de İş Sağlığı Ve Güvenliği: İş Sağlığı Ve Güvenliğinin İş Tatmini Üzerine Etkisi: Çimento Sektöründe Bir Uygulama (Yüksek Lisans Tezi). Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Erzurum.

Altun, H. U., Eraslan, A., & Özdemir, G. (2012). İkinci Basamak Bir Hastanedeki Sağlık Çalışanlarının HBV, HCV Ve HIV Seroprevalansları. Viral Hepatit Dergisi, 18(3), 120-122.

Atasoy, A. & Yorgun, S. (2013). Sağlık Çalışanlarında İş Gerilimi Ve İş Stres Düzeyinin Değerlendirilmesi. Sağlıkta Performans Ve Kalite Dergisi, 6, 71-88.

Babaoğlu, Z. (2020). Mesleki Ve Teknik Anadolu Liselerinde Görev Yapan Öğretmenlerin İş Sağlığı Ve Güvenliği Algı Düzeyinin Belirlenmesi (Trabzon Örneği) (Yüksek Lisans Tezi). Avrasya Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı Ve Güvenliği Anabilim Dalı, Trabzon.

Baybora, D. (2012). İş Sağlığı Ve Güvenliği. Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir.

Bayer, E. & Günal, D. (2018). Hemşirelerin İş Sağlığı Ve Güvenliği Algılarının İncelenmesi, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 10(25), 503-519.

Baygutalp, H. (2020). Meslek Hastalıklarının İş Sağlığı Ve Güvenliği Açısından Analitik İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Baykul, Y. & Güzeller, C. O. (2014). Sosyal Bilimler için İstatistik (SPSS Uygulamalı). Ankara: Pegem A Yayıncılık.

Baysal, H.Y., Bilgin, S. & Öner, M. (2019). Birinci Basamaktaki Sağlık Çalışanlarının İş Sağlığı Ve Güvenliğine Yönelik Görüşleri İle İş Doyumlarının Belirlenmesi. Sağlık Bilimleri Ve Meslekleri Dergisi, 6 (2), 200-209.

Beşer, A. (2012). Sağlık Çalışanlarının Sağlık Riskleri Ve Yönetimi. Dokuz Eylül Üniversitesi Hemşirelik Yüksekokulu Elektronik Dergisi. Deuhyo Ed 2012, 5 (1), 39-44.

Bhagawati, B. (2015). Basics Of Occupational Safety And Health. Journal Of Environmental Science. Toxicology And Food Technology. 9(8). 91-94.

Biber, B. (2022). Hemşirelik Öğrencilerinin İş Sağlığı Ve Güvenliği Hakkında Bilgi Düzeylerinin Anket Yolu İle Ölçülmesi (Yüksek Lisans Tezi). Karatay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İş Sağlığı Ve Güvenliği ABD, Konya.

Bingölbali, A. (2020). Hemşirelerin Meslek Hastalığı Ve İş Kazası Geçirme Durumlarının İş Sağlığı Ve Güvenliği Açısından İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Birgili, F., Salış, F. & Özdemir, S. (2010). Sağlık Çalışanlarının İş Doyumunu Etkileyen Bazı Etmenlerin İncelenmesi. Anadolu Hemşirelik Ve Sağlık Bilimleri Dergisi, 13(2), 27-37.

Bulut, A., Ünal, E. & Şengül, H. (2020). Bir Kamu Hastanesinde İş Sağlığı ve Güvenliği Uygulamalarının Değerlendirilmesi. Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi, 23(1), 1-22.

Butgel T. S., Gözü, Ö. & Özen, G. (2016). Nitel ve nicel araştırma yöntemlerinin bir arada kullanılması "karma araştırma yöntemi". Kurgu, 24(2), 106-112.

Buzak, A., Ağuş, M., & Celep, G. (2019). Sağlık Çalışanlarında Ergonomik Risklerin Değerlendirilmesi. Uşak Üniversitesi, Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi, 3(2), 84-90.

Büyüköztürk, Ş., Akgün, Ö. E., Karadeniz, Ş., Demirel, F., & Kılıç, E. (2013). Bilimsel Araştırma Yöntemleri. Pegem Akademi, Ankara.

Can, Y. (2019). İş Sağlığı, İş Güvenliği ve Sağlık Çalışanları (Yüksek Lisans Tezi). Beykent Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

Caner, V. (2021). Fiziksel Risk Etmenleri Maruziyetine Bağlı İş Kazası ve Meslek Hastalıklarının Önlenmesinde Endüstri 4.0 Yaklaşımının Değerlendirilmesi. OHS Academy, 4(1), 55-61.

Caymaz, M. (2015). Sağlık Personelinin Tıbbi Uygulama Hataları Üzerine Bir Araştırma. Journal of International Management and Social Researches Uluslararası Yönetim ve Sosyal Araştırmalar Dergisi.

Cebeci, H. (2014). Türkiye'de Kamu Kurumlarında İş Sağlığı ve Güvenliği Uygulamaları: Karabük İle Kamu Hastanelerinde Bir Çalışma (Yüksek Lisans Tezi). Karabük Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Karabük.

Chirico, F., Heponiemi, T., Pavlova, M., Zaffina, S., & Magnavita, N. (2019). Psychosocial Risk Prevention in a Global Occupational Health Perspective: A Descriptive Analysis. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(14), 2470.

Cohen, L., Manion, L., & Morrison, K. (2000). Research Methods in Education (5th ed.). London: Routledge Falmer.

Cumhur, A. & Ahıskalı, H. (2018). İş Sağlığı Ve Güvenliği Uygulamaları: Hitit Üniversitesi Örneği. Mesleki Bilimler Dergisi (MBD). Ankara Üniversitesi, 2. Uluslararası Mesleki Bilimler Sempozyumu, IVSS 2018.

Çağlar, Z.Z. (2019). Özel Hastanelerde İş Sağlığı Ve Güvenliği Eğitimlerinin Güvenlik Kültürüne Etkileri (Yüksek Lisans Tezi). İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İzmir.

Çanakçı, T. (2019). Hastanelerde Radyoloji Birimi Çalışanlarının İş Sağlığı Ve Güvenliği Algıları (Yüksek Lisans Tezi).Tarsus Üniversitesi, İş Sağlığı Ve Güvenliği Anabilim Dalı Tarsus. Mersin.

Çelik, E. (2016). Sağlık Çalışanlarının İş Sağlığı Ve Güvenliğine Dair Farkındalıklarının İncelenmesine Yönelik Bir Alan Araştırması, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Gelişim Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü. İstanbul.

Çelik, Ş. (2020). Kamu Kurumlarında Çalışanların İş Sağlığı Ve Güvenliği Bilgi Düzeylerinin Değerlendirilmesi: Adana İli Örneği (Yüksek Lisans Tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Adana.

Çeltik, Ç. (2020). Motivasyonun İş Sağlığı Ve Güvenliği Üzerine Etkisi (Yüksek Lisans Tezi). Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çiçek, Ö. & Öçal, M. (2016). Dünyada ve Türkiye'de İş Sağlığı Ve İş Güvenliğinin Tarihsel Gelişimi. HAK-İŞ Uluslararası Emek ve Toplum Dergisi. Cilt: 5, Yıl: 5, Sayı: 11.

Çiftçi, B. (2016). Türkiye'de Toplumsal Kültürün İş Güvenliği Kültürüne Etkisi. Çalışma İlişkileri Dergisi, 7(2), 13-40.

Çokluk, Ö., Şekercioğlu, G. & Büyüköztürk Ş. (2010). Sosyal Bilimler İçin Çok Değişkenli İstatistik: SPSS ve Lisrel uygulamalı. Pegem Yayınları, Ankara.

Davenport, N., Schwartz, R.D., Elliott, G.P., (2003). Mobing; İşyerinde Duygusal Taciz. Yayın No:349. (O. C. Önertoy, çev.). İstanbul: Sistem Yayıncılık.

Dayan, S. (2016). İş Sağlığı Ve Güvenliği Uygulamalarının Sağlık Çalışanları Tarafından Değerlendirilmesi: Bir Özel Hastane Örneği, (Yüksek Lisans Tezi). Beykent Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü. İstanbul.

Dayan, S. & Öngel, V. (2016). İş Sağlığı Ve Güvenliği Uygulamalarının Sağlık Çalışanları Tarafından Değerlendirilmesi: Bir Özel Hastane Örneği. International Conference On Eurasian Economies. Session 4C: Sağlık Ekonomisi. 479-486.

Demirkaya, S. (2014). İşverenin İş Sağlığı Ve Güvenliğini Sağlama Borcu Ve İş Sağlığı Ve Güvenliği Hizmetlerini İşyeri (İşletme) Dışından Temini (Yüksek Lisans Tezi). Anadolu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü. Eskişehir.

Deniz, D., Küçük, B., Cansız, Ş., Akgün, L. Ve İşleyen, T. (2014). Ortaöğretim Matematik Öğretmeni Adaylarının Üstbiliş Farkındalıklarının Bazı Değişkenler Açısından İncelenmesi. Kastamonu Eğitim Dergisi, 22(1), 305-320.

Devebakan N., & Paşalı N., (2015). Sağlık İşletmelerinde Hizmet Kalitesi Standartlarının Çalışan Güvenliği Açısından Çalışanlar Tarafından Değerlendirilmesi: İzmir İlinde Bir Araştırma. Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi, 18(2): 123-142.

Devebakan, N. (2018). Sağlık Kurumlarında İşyeri Şiddeti Ve Dokuz Eylül Üniversitesi Uygulama Ve Araştırma Hastanesi'nde Beyaz Kod Başvurularının Değerlendirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 23(2), 383-399.

Dinçer, Ö. & Utlu, Z. (2017). Restoran Sektöründe Yaşanan İş Kazalarını Önlemede İş Sağlığı Ve Güvenliğinin Önemi. Aydın Gastronomy, 1(2), 41-50.

Dizdar E. N., Koçar O. (2020). Fuzzy Logic-Based Decision-Making System Design For Safe Forklift Truck Speed: Cast Cobblestone Production Application. Soft Computıng, 24(19), 14907-14920.,

Dizdar, E. N (2004), Uygulamalı Olasılık Ve İstatistik, ABP Yayınları.

Dizdar, E., N. (2014). İSG Mevzuatında Devletin Yetkileri, İş Güvenliği Mevzuatı, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.

Dizdar, E. N. and Koçar, O. (2018). İş Sağlığı Ve Güvenliği Yönetim Sistemlerinde Risklerin Yapay Sinir Ağlarıyla Değerlendirilmesi, Academic Platform - Journal of Engineering and Science, 6(3), pp. 73-83,

Durgut, M. & Kıvanç, A. (2021). Göğüs Hastalıkları Hastanesinde Çalışan Personelin İş Sağlığı Ve Güvenliği Durumlarının İncelenmesi. Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi, 10(4), 751-758

Dursun, S. (2013). İş Güvenliği Kültürünün Çalışanların Güvenli Davranışları Üzerine Etkisi. SGD-Sosyal Güvenlik Dergisi, 3(2).

Elçin, G. (2020). Sağlık Çalışanlarında İş Sağlığı Ve Güvenliği Algısının Belirlenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Medipol Üniversitesi. İstanbul.

Er, E. (2020). Yerel Yönetimlerde İş Sağlığı Ve Güvenliğinin Değerlendirilmesine Yönelik Çalışan Anketi Uygulaması: Ankara İlindeki Bir İlçe Belediyesi (Yüksek Lisans Tezi). Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.

Eravcı, D.B. (2019). 6331 Sayılı İş Sağlığı Ve Güvenliği Kanunu Ve İlgili Yönetmelikleri Çerçevesinde İşverenin Yükümlülükleri. Hak İş Uluslararası Emek Ve Toplum Dergisi, 8(22), 330-355.

Erkan, S. (2014). Pamukkale Üniversitesi Hastanesinde Çalışan Hemşire Ve Teknisyenlerin Mesleki Risk Algısının Belirlenmesi, (Yüksek Lisans Tezi). Pamukkale Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü. Denizli.

Field, A. (2000). Discovering Statisticsusing SPSS for Windows.Sage Publications, New Delhi.

George, D. & Mallery, M. (2010). SPSS for Windows Step by Step: A Simple Guide and Reference, 17.0 update (10a ed.) Boston: Pearson 114-115

Gültay, H. (2019). Hava Yollarında Çalışan Kabin Memurlarının İş Sağlığı Ve Güvenliği Algılarının İncelenmesine Yönelik Bir Araştırma (Yüksek Lisans Tezi). Beykent Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü. İstanbul.

Gümüş, R. (2017). Türkiye'de 2015 Yılında Meydana Gelen İş Kazalarının Analizi Ve 2014 Yılı Verileri İle Karşılaştırılması, The Journal of Academic Social Science Studies, (55), ss. 277-287.

Günal, D. (2018). Hemşirelerin İş Sağlığı Ve Güvenliği Algılarının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Sağlık Yönetimi Anabilim Dalı. Isparta.

Gündüz, R. (2019). Sağlık Çalışanlarında Görülen İş Kazalarının Değerlendirilmesi (TÜ Eğitim Ve Araştırma Hastanesi Örneği) (Yüksek Lisans Tezi). Kırklareli Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Kırklareli.

Gür, B. (2020). Yeraltı Ve Yerüstü Kömür Madenlerinde Çalışanların İş Sağlığı Ve Güvenliği Algılarının Belirlenmesi: Çorum Örneği (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Rumeli Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. İstanbul.

Güriş, S. ve Astar, M. (2015). Bilimsel Araştırmalarda SPSS İle İstatistik. 2. Basım, İstanbul: Der Kitabevi.

Gürsoy, T. & Kabul, A. (2020). Çalışanların İş Sağlığı Ve Güvenliği Eğitimlerinin Değerlendirilmesi. International Journal Of Engineering And Innovative Research, 2(1), 32-46.

Güzel, Ö. (2017). Çocuk Kliniklerinde Çalışan Hemşirelerin İş Sağlığı Ve Güvenliği (Yüksek Lisans Tezi). Mersin Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü.

Han, İ. (2015). İnşaat Sektörü Çalışanlarının İş Sağlığı ve Güvenliğine Yönelik Farkındalıklarının Belirlenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Gediz Üniversitesi. İzmir.

Hedge, A., James, T., Pavlovic-Veselinovic, S. (2011). Ergonomics Concerns And The Impact Of Healthcare Information Technology, International Journal Of Industrial Ergonomics, 41(4), pp. 345-351.

İpek, Ö. (2020). Hemşirelerin İş Sağlığı Ve Güvenliği Konusundaki Bilgilerinin Güvenlik Farkındalığı İle Güvenli Davranış Üzerine Etkisinin Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Atatürk Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü. Erzurum.

Kalaycı, Ş. (2016). SPSS Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistik Teknikleri. (7. baskı). Asil Yayın Dağıtım. Ankara.

Kale, N. (2019). 6131 Sayılı Kanun Sonrasında Yerel Yönetimlerde İş Sağlığı Ve Güvenliği Uygulamaları: Erdemli Belediye Örneği (Yüksek Lisans Tezi). Tarsus Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. Tarsus.

Kaplan, M. & Eren, M. E. (2018). İş Sağlığı Ve Güvenliği Algısının İş Stresi Üzerindeki Etkisi: Kamu Hastanesinde Bir Araştırma. Mukaddime, 9(2), 181-194.

Kara, H.E. (2020). Anadolu Lisesi Ve Mesleki Teknik Anadolu Lisesi Öğrencilerinin İş Sağlığı Ve Güvenliği Farkındalığı: Güngören Örneği, (Yüksek Lisans Tezi). Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

Karabiber, C., Sarb, G., Kerman, B. & Savaş, N. (2018). Bir Tıp Fakültesi Hastanesi Sağlık Çalışanlarında İş Sağlığı-Güvenliği Durumu Ve Risk Faktörleri. Sağlık Bilimleri Ve Meslekleri Dergisi, 5(3), 367-375.

Karabulut, B. (2020). Kamu Binaları Güvenlik Noktası Personeline Verilen İş Sağlığı Ve Güvenliği Eğitiminin İş Güvenliği Kültürüne Etkisi (Yüksek Lisans Tezi). Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Karaca, Y. (2013). Sağlık Çalışanlarında İş Sağlığı Ve Güvenliği. Beykent Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü (Doctoral Dissertation, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul.

Karasar, N. (2018). Bilimsel Araştırma Yöntemi Kavramlar İlkeler Teknikler. Nobel, Ankara.

Kavgacı, Y. & Çiçek, H. (2019). Kamu Hastanelerinde İş Sağlığı Ve Güvenliği Uygulamalarının Çalışanların İş Performansına Etkisi: Burdur İli Örneği, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 11(28), 306-331.

Kılıç, S. (2016). Cronbach'ın Alfa Güvenirlik Katsayısı, Journal of Mood Disorders Volume: 6, Number: 1.

Kılıç, T. (2014). Bir Eğitim Ve Araştırma Hastanesinde Görev Yapan Sağlık Çalışanlarının İş Güvenliği Algısının Belirlenmesi, (Yüksek Lisans Tezi). Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.

Kılkış İ. & Alper Y. (2015). 6331 Sayılı Kanun'da İş Güvenliği Uzmanlığı: Nitelikleri, Görevlendirilmeleri Ve Yetkilendirilmeleri. Sosyal Güvenlik Dergisi, 5(1), 32-67.

Kocaay F. & Küçük B. B. (2022). Sağlık Çalışanlarında İş Sağlığı Ve Güvenliği Yeterlilik Algısının Değerlendirilmesi. Sağlık Bilimlerinde Değer; 12(2): 274-279.

Kocaay, F. & Ocaktan, M. (2021). Development Of A Turkish Occupational Health And Safety Perceived Competency Scale. International Journal Of Entrepreneurship And Management Inquiries, 5(8), 1-12.

Korkusuz, R., Bağçiçek Kol, S., Polat, Ö. & Kart Yaşar, K. (2022). Pandemi Sırasında Sağlık Çalışanlarının Enfeksiyon Önleme Kurallarına Uyumunun Önemi-Bir Anket Çalışması. Aydın Sağlık Dergisi, 8 (3), 213-227.

Köklü, N., Büyüköztürk, Ş. & Çokluk Bökeoğlu, Ö. (2006). Sosyal Bilimler İçin İstatistik. Pegem A Yayıncılık, Ankara.

Körükmez, M. (2020). Sağlık Çalışanlarının İş Sağlığı Ve Güvenliği Kapsamında Mesleki Biyolojik Risklerden Tüberküloz Hakkındaki Deneyimleri Ve Bilgi Düzeyleri (Yüksek Lisans Tezi). Bezmialem Vakıf Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Köse, Y. (2016). Hastanelerde Çalışan Hemşirelerin İş Sağlığı Ve Güvenliği Konusundaki Bilgi Ve Farkındalık Düzeylerinin Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Gelişim Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü. İstanbul.

Küçük, A.S. (2017). İş Sağlığı Ve Güvenliği Eğitimlerinin Çalışanlardaki İş Sağlığı Ve Güvenliği Farkındalığına Etkisinin İncelenmesi: Yapı Sektöründe Bir Araştırma (Yüksek Lisans Tezi). Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

Mohanty, A., Kabi, A., Mohanty, A. (2019). Health Problems İn Healthcare Workers: A Review. Journal Of Family Medicine And Primary Care, 8(8), pp. 2568-2572.

Mollaoğlu, M., Fertelli, T. K. ve Tuncay, F. Ö. (2010). Hastanede Çalışan Hemşirelerin Çalışma Ortamlarına İlişkin Algılarının Değerlendirilmesi. Fırat Sağlık Hizmetleri Dergisi, 5(15), 17-30.

Ocak, G. (2019). Sağlık Kuruluşlarında İş Sağlığı Ve Güvenliği Uygulamaları "Sivas Örneği" (Yüksek Lisans Tezi). Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü Sağlık Kuruluşları Yöneticiliği Ana Bilim Dalı. Sivas.

Olcay, Z. F., Sakallı, A. E., Temur, S. (2021). İş Güvenliği Uzmanlarında İşe Bağlılığın Ve İş Stresinin İSG Performansına Etkisi: Yapısal Eşitlik Modelleme Çalışması. Sosyal Güvenlik Dergisi (Journal of Social Security). 11(1). 141-156.

Oppong, F. B. & Agbedra, S. Y. (2016). Assessing Univariate And Multivariate Normality, A Guide For Nonstatisticians. Mathematical Theory And Modeling, 6(2), 26-33.

Ozan, C. & Köse, E. (2014). Eğitim Programları Ve Öğretim Alanındaki Araştırma Eğilimleri. Sakarya University Journal Of Education, 4(1), 116-136.

Öcal, A. (2010). Sağlık Çalışanlarında İş Sağlığı Ve Güvenliği (Yüksek Lisans Tezi). Beykent Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü. İstanbul.

Öğüt, S. (2022). Hastanelerin Radyasyon Alanlarını İçeren Birilerde Görev Alan Sağlık Çalışanlarında İş Sağlığı Ve Güvenliği İkliminin Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Gelişim Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Öztürk, H., & Babacan, E. (2012). Bir Ölçek Geliştirme Çalışması: Hastanede Çalışan Sağlık Personeli İçin İş Güvenliği Ölçeği. Hemşirelikte Eğitim Ve Araştırma Dergisi, 9(1), 36-42.

Öztürk, H., Babacan, E., Anahar, E. Ö. (2012). Hastanede Çalışan Sağlık Personelinin İş Güvenliği. Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi. 1(4),252-268.

Parlak, T., Barışık, T. & Yalçın, F. (2020). Gıda Ürünleri İmalatında Çalışan Personellerin İş Sağlığı Ve Güvenliği Hakkındaki Farkındalık Durumlarının Tespiti Üzerine Bir Araştırma. OHS Academy, 3 (1), 13-27 .

Robbins, S.T. & Judge, T.A. (2017). Örgütsel Davranış, (Çev) İnci Erdem, 14. Basım, Nobel Yayıncılık, Ankara.

Sarıçam, H., Erguvan, F. M., Akın, A., & Akça, M. Ş. (2014). Belirsizliğe Tahammülsüzlük Ölçeği (BTÖ-12) Türkçe Formu: Geçerlik Ve Güvenirlik Çalışması. Route Educational And Social Science Journal, 1(3):148-57.

Sarıtaç, D. (2014). Hastanelerde İş Sağlığı Ve Güvenliği Hizmetlerinin Yönetimi (Yüksek Lisans Tezi). Beykent Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü. İstanbul.

Saygun M. (2012). Sağlık Çalışanlarında İş Sağlığı Ve Güvenliği Sorunları. TSK Koruyucu Hekimlik Bülteni, 11(4), 373 - 382.

Sayım, E. & Salman, Ş., (2016). Hastaların Çalışan Hakları Bilgi Düzeyinin, Hasta Davranışları Ve Sağlık Çalışanına Şiddet Üzerine Etkileri. Sağlıkta Performans Ve Kalite Dergisi, (11): 27-41.

Sim, J. ve Wright, C. (2002). Research İn Health Care: Concepts, Designs And Methods. United Kingdom, Cheltenham: Nelson Thornes Ltd.

Solmaz, M. & Solmaz, T. (2017). Hastanelerde İş Sağlığı Ve Güvenliği. Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi, 6 (3), 147-156.

Songur, L., Doğan, F. & Bucak, İ. H. (2019). Sağlık Çalışanlarında Sağlık Taramalarının Önemi Ve Sağlık Tarama Oranının Yükseltilmesi. Sağlık Akademisyenleri Dergisi. 6(4), 270-277.

Sosyal Güvenlik Kurumu Sağlık Uygulama Tebliği. (2013). Resmî Gazete, 28597, 24/03/2013.

Sudan, A. (2020). Sağlık Kurumlarında İş Sağlığı Ve Güvenliği Performansının Değerlendirilmesi: Bingöl İli Örneği (Yüksek Lisans Tezi). Bingöl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Bingöl.

Tabachnick, B. G. & Fidell, L. S. (2013). Using Multivariate Statistics (Sixth Edition). USA: Pearson Education Limited.

Taş, A. (2021). Mersin Bölgesindeki Alabalık Üretim İşletmelerinin İş Sağlığı Ve Güvenliği Yönünden Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Adana.

Taş, B. (2016). Ameliyathane Çalışanlarında İş Sağlığı Ve Güvenliği (Yüksek Lisans Tezi). Beykent Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü. İzmir.

Tavşancıl E. Tutumların Ölçülmesi Ve SPSS İle Veri Analizi. 5. Basım. Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.

Türkoğlu, Ç. (2020). Öğretmenlerin İş Sağlığı Ve Güvenliğine İlişkin Bilgi Düzeylerinin İncelenmesine Yönelik Bir Alan Araştırması, (Yüksek Lisans Tezi). Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Kırıkkale.

Uncu, G. (2022). Güneş Enerjisi Alanında İş Sağlığı Ve Güvenliği Uygulamalarının Etkinliği (Yüksek Lisans Tezi). Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Denizli.

Urhan, B. & Etiler, N. (2011). Sağlık Sektöründe Kadın Emeğinin Toplumsal Cinsiyet Açısından Analizi. Çalışma Ve Toplum, 2(29), 191-215.

Uysal, İ., & Kılıç, A. F. (2022). Normal Distribution Dilemma. Anadolu Journal Of Educational Sciences International, 12(1), 220-248.

Ünver, M. (2013). İş Sağlığı Ve Güvenliğinde Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemi Uygulaması (Yüksek Lisans Tezi). Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Karabük.

Ütük, O. B. (2013). İş Sağlığı Ve Güvenliği Farkındalık Değerlendirmesi: Sağlık Çalışanlarına Yönelik Alan Araştırması, (Yüksek Lisans Tezi). Yalova Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü. Yalova.

Van, M.H. & Koç, N. (2020). Kamu Yönetiminde Temel İş Sağlığı Ve Güvenliği Bilgisi (Van Milli Eğitim Müdürlüğü Örneği). Bitlis Eren Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Akademik İzdüşüm Dergisi, 5(2), 125-135.

Yanık, A. & Kurul, N. (2020). Sağlık Çalışanlarının Risk Yönetimi Algısı: Hastanelerde Bir Uygulama. Uluslararası Sağlık Yönetimi Ve Stratejileri Araştırma Dergisi, 6 (2), 287-302.

Yelekçi, S. (2018). Sağlık Kuruluşlarında Çalışanların İş Sağlığı Ve Güvenliği Kapsamında Karşılaştıkları Sorunlar. OHS Academy, 1(3), 110-117.

Yelekçi, S. (2019), Sağlık Kuruluşlarında Çalışanların İş Sağlığı Ve Güvenliği Kapsamında Karşılaştıkları Sorunlar (Yüksek Lisans Tezi). Okan Üniversitesi. İstanbul.

Yeşiltaş, A. & Gül, İ. (2016). Hemşirelerin Çalışmak İçin Tercih Ettikleri Birimler Ve Tercih Nedenleri. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 4(2), 74-87.

Yurtseven, N.C. (2020). Spor Profesyonellerinde İş Sağlığı Ve Güvenliği Bilgi Düzeyi Algısının Çok Boyutlu Olarak Değerlendirilmesi (Doktora Tezi). İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. İstanbul.

Zöhra, S. (2019). Hastane Ameliyathanelerinde İş Sağlığı Ve Güvenliğine Yönelik Çalışmalar, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul.

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

UMAGD, (2023) 15(2), 517-525.

10.29137/umagd.1257926

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Al-9Si-0,1Sr-0,6Mg Alaşımının Tornalanmasında İşlenebilirlik Karakteristiklerinin Araştırılması

Investigation of Machinability Characteristics of Al-9Si-0.1Sr-0.6Mg Alloy in Turning

Ali Paşa Hekimoğlu[1], Şenol Bayraktar[1]

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 53100, Rize, TÜRKİYE

***Başvuru/Received**: 01/03/2023* ***Kabul / Accepted**: 26/03/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 06/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: xx/xx/xxxx*

Öz

Bu çalışmada incelenen Al-9Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımı kokil kalıba döküm yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen alaşımın kimyasal bileşimi indüktif eşleşmiş plazma atomik emisyon spektroskopisi (ICP-OES) yöntemiyle doğrulanmıştır. İçyapı incelemeleri standard metalografik yöntemlerle hazırlanan numuneler üzerinde dağlama yapılmadan gerçekleştirilmiştir. Metalografik incelemelerde alaşımın içyapısının birincil alüminyum (Al) dendritlerinden, küresel morfolojiye sahip silisyum (Si) parçacıkları içeren ötektik Al-Si faz bölgelerinden, ötektik dışı Si parçacıklarından, Al_4Sr ve π fazlarından oluştuğu gözlenmiştir. İşlenebilirlik testleri, kaplamasız karbür kesici uçlar kullanılarak farklı kesme hızı (250, 400 ve 550 m/dak), ilerleme (0,05; 0,15 ve 0,25 mm/dev) ve sabit kesme derinliği şartları altında gerçekleştirilmiştir. Kesme kuvveti bileşenleri, Kistler 9257A dinamometre ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri ise izleyici uçlu Mahr Perthometer cihaz ile ölçülmüştür. Testler sonucunda kesme hızının artması ile kesme kuvveti, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve yığıntı talaş (YT) oluşumu azalırken, ilerlemenin artması ile arttığı belirlenmiştir. Kesme hızının artması ile birincil deformasyon bölgesinde kesici takım-talaş arayüzey sıcaklığın artmasına bağlı olarak kesme kuvveti azalmıştır. Bu durum, kesmeyi işlemini kolaylaştırarak takım aşınmasını ve yüzey pürüzlülüğünü azalttığı düşünülmektedir. İlerlemenin artması ile birim zamanda kaldırılacak talaş hacmi ve kesici takım-talaş temas yüzey alanı artmaktadır. Bu durumun kesme işlemini zorlaştırdığı ve takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı düşünülmektedir. Minimum kesme kuvveti, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve YT oluşumu için 550 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme parametrelerinin kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

"Al-9Si-0.1Sr-0.6Mg alaşımı, Kesme kuvveti, Ortalama yüzey pürüzlülüğü, Yığıntı talaş"

Abstract

The Al-9Si-0.1Sr-0.6Mg alloy examined in this study was produced by the permanent mold casting method. The chemical composition of the produced alloy was confirmed by the inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy method. Microstructural examinations were carried out on the samples prepared by standard metallographic methods. These samples were examined without etching and photographed. In the metallographic examinations, it was observed that the microstructure of the alloy consisted of primary aluminum (Al) dendrites, eutectic Al-Si phase regions containing spherical silicon (Si) particles, primary Si particles, Al_4Sr and π phases. Machinability tests were carried out under different cutting speeds (250, 400, and 550 m/min), feed rates (0.05; 0.15, and 0.25 mm/rev), and constant depth of cut conditions using uncoated carbide inserts. The cutting force components were measured with the Kistler 9273 dynamometer and the average surface roughness values were measured with the Mahr Perthometer device with a tracer tip. As a result of the tests, it was determined that the cutting force, average surface roughness, and built-up edge formation decreased with the increase of cutting speed, while it increased with the increase of feed rate. As a result of the increase in cutting speed, the cutting force decreased due to the increase in the cutting tool-chip interface temperature in the primary deformation region. It was thought that this situation facilitated the cutting process and reduced tool wear and surface roughness. As the feed rate increased, the chip volume to be removed in unit time, and the cutting tool-chip contact surface area increased. It was thought that this situation complicated the cutting process and increased tool wear and surface roughness. It was

***Sorumlu Yazar: ali.hekimoglu@erdogan.edu.tr**

found that a cutting speed of 550 m/min and feed rate of 0.05 mm/rev parameters could be used for minimum cutting force, average surface roughness, and built-up edge formation.

Key Words
"Al-9Si-0.1Sr-0.6Mg alloy, Cutting force, Average surface roughness, Built-up edge"

1. Giriş

Al-Si esaslı alaşımlar, birçok avantajından dolayı endüstriyel uygulamalarda demir-çelik grubundan sonra en yaygın olarak kullanılan alaşım grubudur. Al-Si alaşımlarının diğer alaşımlara göre başlıca avantajları kolay ve ekonomik bir şekilde üretilebilmeleri, yüksek korozyon direncine sahip olmaları, çoğu endüstriyel uygulamalar için yeterli mukavemet değerlerini sağlayabilmeleri, düşük yoğunluğa sahip olmaları ve özgül mukavemetlerinin (mukavemet/yoğunluk) diğer alaşım gruplarının çoğuna göre yüksek olmasıdır (Arthanari vd., 2018; Nikanorov vd., 2005; Santos vd., 2005; Shaha vd., 2015). Söz konusu alaşımlar, özgül mukavemetlerinin yüksek olması nedeniyle özellikle hafifliğin ve dolayısıyla yakıt tasarrufun ön planda olduğu otomotiv, savunma ve havacılık sanayi gibi alanlarda üretilen motor blokları, pistonlar, silindir blokları, emme manifoldları, yağ karterleri, karbüratörler, şanzıman kutusu, motor bobin sarımı, transistor soğutucuları, veri kayıt diskleri, akümülatörler, harp başlıkları, roket gövdeleri ve benzeri parçaların imalatı için yoğun bir şekilde tercih edilmektedir (Abouei vd., 2010; Campbell 2011; Davis 2001; Javidani & Larouche, 2014; Li vd., 2010; Rainen & Ekvall, 1988; Santos vd., 2005). Belirtilen ürünlerin veya bu ürünlere ait herhangi bir parçanın tasarım aşamasında sertlik değeri, mekanik özellikleri ve tribolojik karakteristikleri göz önüne alınarak kullanılabilecek en uygun Al-Si alaşımına karar verilmektedir. Al-Si alaşımlarının bu malzeme özellikleri Si oranının yanı sıra bileşimindeki diğer elementlerin türüne ve miktarına, üretim yöntemine, eğer uygulanmış ise uygulanan ısıl işlemin türüne ve yapısındaki Si parçacıklarının büyüklüğüne ve morfolojisine bağlı olarak ta değişmektedir (Hafız & Kobayashı, 1994; Hekimoğlu vd., 2019; Li vd., 2017; Prabhudev vd., 2014; Zeren 2007). Son zamanlarda yapılan bir çalışmada ikili Al-Si alaşımları içerisinde %9 oranında Si içeren Al-9Si alaşımının üstün mukavemet ve süneklik özellikleri sergilediği ortaya koyulmuştur (Hekimoğlu & Hacıosmanoğlu, 2018). Yapılan başka bir çalışmada ise Al-Si alaşımlarına %0,1 oranında stronsiyum (Sr) ve 0,6 oranında magnezyum (Mg) katıldığında mekanik özelliklerinin daha da geliştiği görülmüştür (Hekimoğlu vd., 2019). Bu iki çalışma alüminyum alaşımları ile ilgili literatürdeki diğer çalışmalar ile birlikte göz önüne alınarak Al-9Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımı geliştirilmiş olup bu alaşımın yapısal ve mekanik özellikleri detaylı olarak incelenmiştir (Ayata 2018; Hekimoğlu vd., 2018).

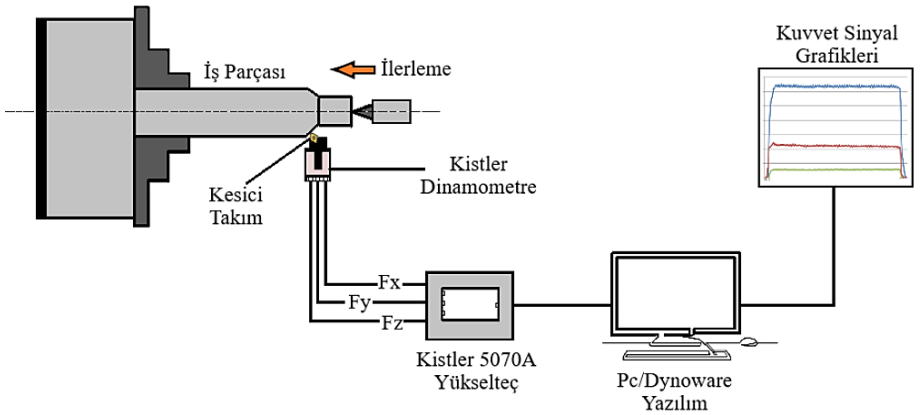
Al-Si esaslı alaşımlar, endüstriyel uygulamalarda genellikle döküm yöntemleri ile üretilmektedir. Döküm yöntemleri ile üretilen komponentlerin bazı durumlarda mekanik sistemlerde doğrudan kullanımı mümkün olmamaktadır. Özellikle, birbiri ile temas halinde çalışacak yüzeyler için tornalama, frezeleme ve delme gibi talaşlı imalat operasyonlarının uygulanması gerekmektedir. Talaşlı imalat operasyonlarında ise işlenecek olan yüzeylerin kalitesi, geometrik ve boyutsal tolerans şartlarının sağlanması mekanik bileşenlerin servis ömürleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bunun için kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması gibi işlenebilirlik çıktılarını doğrudan etkileyen kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği bağımsız değişken parametrelerinin kontrol altına alınması gerekmektedir (Hekimoğlu & Bayraktar, 2022b). Yapısal ve mekanik özelliklerinin sağlamış olduğu avantajlardan dolayı özellikle otomotiv sektöründe içten yanmalı motor bileşenleri için tercih edilen Al-Si esaslı alaşımların işlenebilirliği üzerine literatürde çalışmalar yapılmaya devam etmektedir. Bunlardan bazılarında; Bayraktar ve Demir, dökülmüş ve T6 ısıl işlemli durumdaki Al-12Si-0,6Mg alaşımının karbür kesici takımlar ile tornalanmasında kesme hızının artmasına bağlı olarak kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve yığıntı talaş (YT) oluşumu azalırken ilerlemedeki artış ile arttığını ve ısıl işlemin işlenebilirlik özelliklerini iyileştirdiğini (Bayraktar &Demir, 2020), Bayraktar ve Hekimoğlu, Al-12Si-0.1Sr alaşımının PVD-TiAlN/TiN kaplamalı karbür ile tornalanmasında kesme hızındaki artış ile kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve YT oluşumu azalırken, ilerlemedeki artış ile arttığını (Bayraktar & Hekimoğlu, 2022), Gai vd., Al-Si piston alaşımının PCD (Polycristalline Diamond) takımlar ile farklı kesme hızı (150, 200, 250 ve 300 m/dak), ilerleme (0,05; 0,1; 0,15 ve 0,2 mm/dev) ve kesme derinliği (0,1; 0,2; 0,3 ve 0.4 mm) şartları altında tornalanmasında, kesme derinliğinin artması ile kesici takım-talaş etkisine bağlı artan titreşimden dolayı yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetinin arttığını, 200-250 m/dak kesme hızı aralığı ve düşük kesme derinliği kullanılarak düşük yüzey pürüzlülüğünün elde edilebileceğini tespit etmişlerdir (Gai vd., 2022). Razin vd., Al esaslı otomotiv alaşımlarında HSS (High speed steel) takımla farklı işleme parametreleri kullanılarak işlenmiş yüzey kalitesi üzerinde Si elementinin etkisini inceledikleri çalışmada, kesme hızı ve kesme derinliğinin artması ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığını, yüzey pürüzlülüğünün azalmasında yüksek kesme hızının yüksek kesme sıcaklığı ile alaşım malzemesinin akma mukavemetini düşürmesinden dolayı daha etkili olduğunu ve Si oranının arması ile daha iyi yüzey kalitesinin elde edildiğini (Razin vd., 2022), Hekimoğlu ve Bayraktar, Al-9Si alaşımında Sr ve Mg ilavelerinin tornalama işleminde kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmada, Mg ilavesinin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve YT oluşumunu azalttığını (Hekimoğlu & Bayraktar, 2022a), Bayraktar ve Afyon, çinko (Zn) ve bakır (Cu) ilave edilmiş Al-7Si alaşımının delinmesinde Cu ilavesinin minimum ilerleme kuvveti, tork, yüzey pürüzlülüğü ve YT oluşumuna katkı sağladığını (Bayraktar & Afyon, 2020), Basavakumar vd., Al-Si esaslı alaşımların işlenmesinde parlatılmış CVD elmas kaplamalı kesicilerin kaplamasız ve PVD kaplamalı kesicilere göre daha düşük kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve YT oluşumu sergilediğini ve içyapıda ötektik elementlerin boyutundaki artış ile yüzey pürüzlülüğünün arttığını (Basavakumar vd., 2007) ve Braga vd., MQL (Minimum quantity lubricant) ile Al-Si alaşımının elmas kaplamalı matkap ile yüksek ilerleme oranlarında delinmesinde YT'nin oluştuğunu ve kaplamasız karbür kesicilerin elmas kaplamalı kesicilerden daha iyi işlenebilirlik performansı sergilediğini tespit etmişlerdir (Braga vd., 2002). Al-Si esaslı Al-9Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımı literatüre yeni sunulmuş üstün mekanik özelliklere sahip bir alaşım olup, bu alaşımın işlenebilirlik

özellikleri konusunda yeterince çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada, kesme hızı ve ilerleme değişkenlerinin Al-9Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımının tornalanmasındaki kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması gibi işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkilerinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada incelenen Al-9Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımı, %99,8 saflıkta alüminyum, %99,9 saflıkta Si ve Mg ve Al-15Sr master alaşımı kullanılarak kalıcı kalıba döküm yöntemiyle üretildi. Alaşımın üretiminde literatürde teknik detayları verilen kalıp kullanılmıştır (Hekimoglu & Çalış, 2020a; Hekimoğlu & Çalış, 2020b; Hekimoglu & Savaskan, 2014; Savaşkan & Turhal, 2003). Döküm sıcaklığı, 750 ºC olarak uygulandı ve ergimiş alaşım oda sıcaklığındaki kalıba dökülerek katılaştırıldı. Üretilen alaşımın kimyasal bileşimi, ICP-OES yöntemiyle doğrulandı. İç yapı incelemeleri, üretilen alaşım külçesinden talaşlı işlemle hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirildi. Mikroskobik incelemelerden önce metalografi numunesi standart yöntemler ile zımparalama ve parlatma işlemine tabi tutuldu. Parlatılan numuneler, dağlama yapılmadan incelendi ve içyapılarını gösteren optik mikroskop görüntüleri alındı.

İşlenebilirlik testleri, 10 kW güç ve maksimum 6000 dev/dak özelliklerine sahip Johnford TC-35 marka CNC torna tezgahında gerçekleştirilmiştir. Test alaşımının tornalanması esnasında kesme kuvvetinin tespiti için Fx, Fy ve Fz kuvvet bileşenleri dikkate alınmıştır. Bu kuvvet bileşenlerine ait titreşim sinyallerinin tespitinde Kistler 9257A dinamometre, bu sinyallerin anlamlı hale dönüştürülebilmesi için Kistler 5070A yükselteç ve grafiklere dönüştürülmesinde Dynoware yazılım kullanılmıştır (Şekil 1). Elde edilen kuvvet bileşenlerinin bileşkesi alınarak nihai kesme kuvveti belirlenmiştir (Bayraktar & Hekimoğlu, 2023; Hekimoğlu & Bayraktar, 2022a).

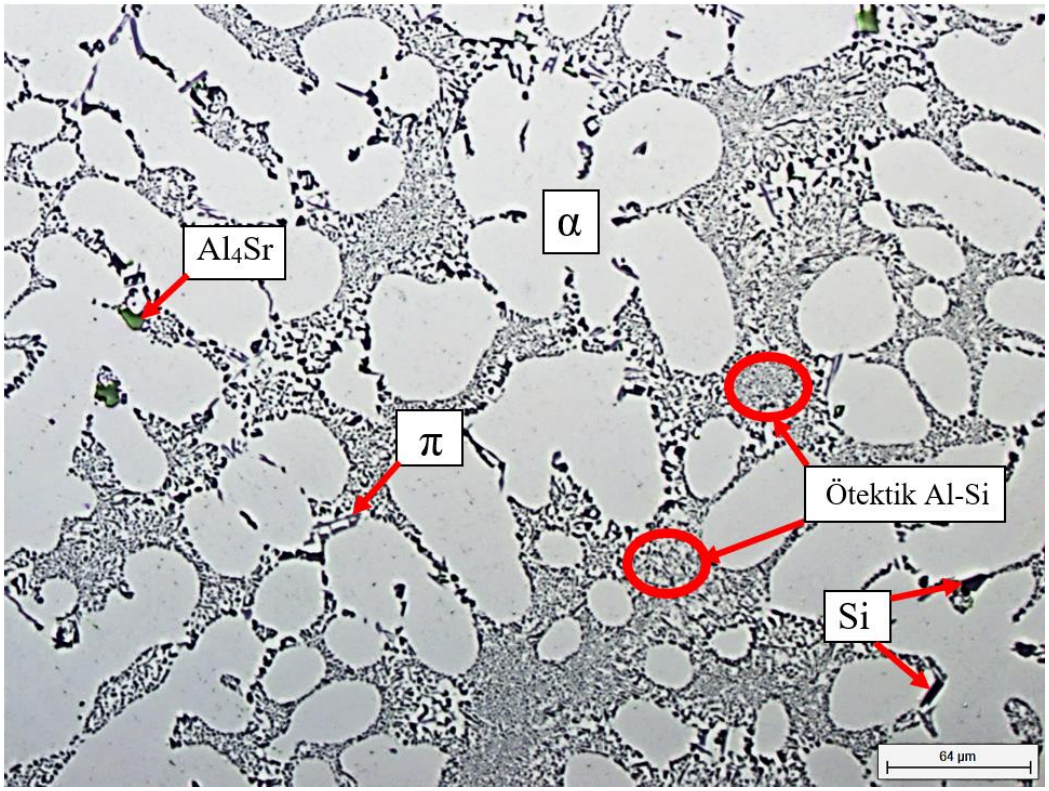


Şekil 1. Tornalama testleri için deneysel düzenek

İşlenebilirlik testleri, Sandvik coromant marka DCGX 11T304 kodlu kaplamasız karbür kesici uçlar ile gerçekleştirildi. Testlerde kesme parametreleri olarak 250, 400 ve 550 m/dak kesme hızları, 0,05; 0,15 ve 0,25 mm/dev ilerleme değerleri ve 1,5 mm sabit kesme derinliği kullanıldı. Kesme parametreleri, kesici takım üretici firma tavsiyesi ve literatürde yapılan çalışmalara göre belirlenmiştir (Dos Santos vd., 2007; Marani vd., 2018). Ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, 0,8 mm örnekleme ve 4 mm ölçme uzunlukları dikkate alınarak ISO 4287 standardına göre Mahr Perthometer izleyici uçlu cihaz ile her bir işlenmiş yüzeyden beşer adet ölçüm alınarak gerçekleştirildi. Elde edilen bu ölçümlerin aritmetik ortalaması ile nihai ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri belirlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Al-9Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımının iç yapısını gösteren fotoğraf Şekil 2'de, kimyasal analiz sonucu Tablo 1'de verilmektedir. Bu fotoğraftan da anlaşılacağı üzere söz konusu alaşımın içyapısının birincil Al dendritlerinden, Si parçacıkların küresele yakın morfolojiye sahip olduğu ötektik Al-Si faz bölgelerinden, ötektik dışı birincil Si parçacıklarından, Al_4Sr ve π fazlarından oluşmaktadır. Al-Si alaşımlarında bu fazların oluşumu literatürde (Hekimoglu & Ayata, 2019; Hekimoğlu & Bayraktar, 2022a; Hekimoğlu vd., 2018; Hekimoglu vd., 2019) detaylı olarak sunulmuş olup, iç yapı incelemelerinden elde edilen bulgular literatürdeki çalışmalarla uyumlu çıkmıştır. Ötektik Al-Si faz bölgelerindeki Si parçacıklarının küresel şekilli olmasının literatürde de ifade edildiği gibi Sr modifiye edici etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Hekimoglu & Ayata, 2019; Hekimoğlu & Bayraktar, 2022a; Hekimoğlu vd., 2018; Hekimoglu vd., 2019).

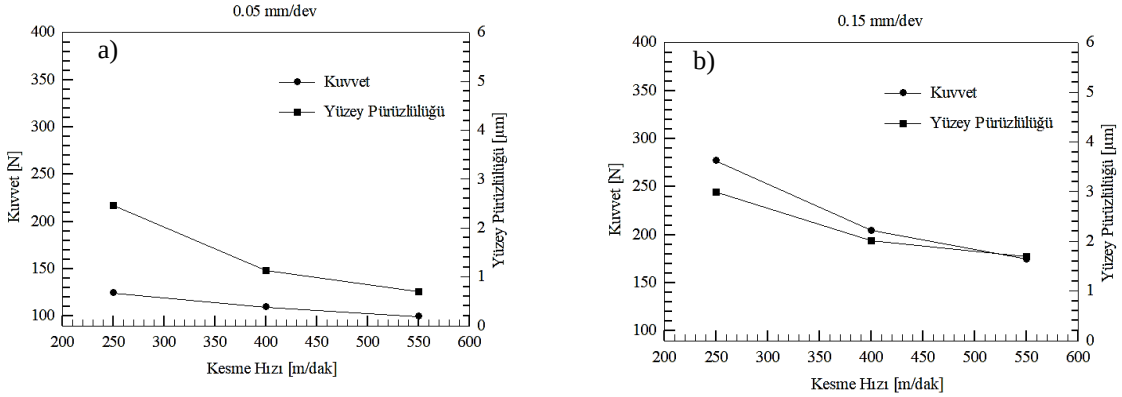


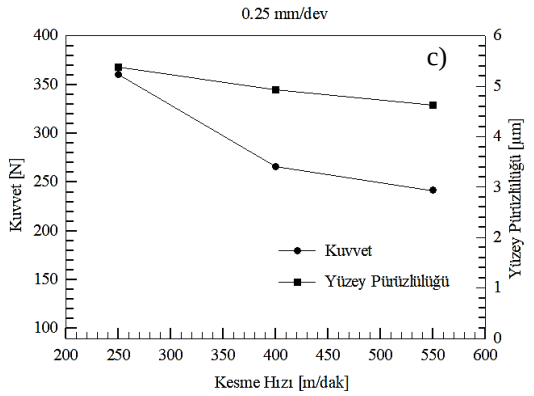
Şekil 2. Al-9Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımının iç yapısına ait mikroskop görüntüsü

Tablo 1. Üretilen Al-9Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımın kimyasal bileşimi (% ağırlık)

Si	Sr	Mg	Al	Fe	P, V, Zn, Zr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sn, Ti, Cr
9,2	0,12	0,63	Kalan	1,2	0,28

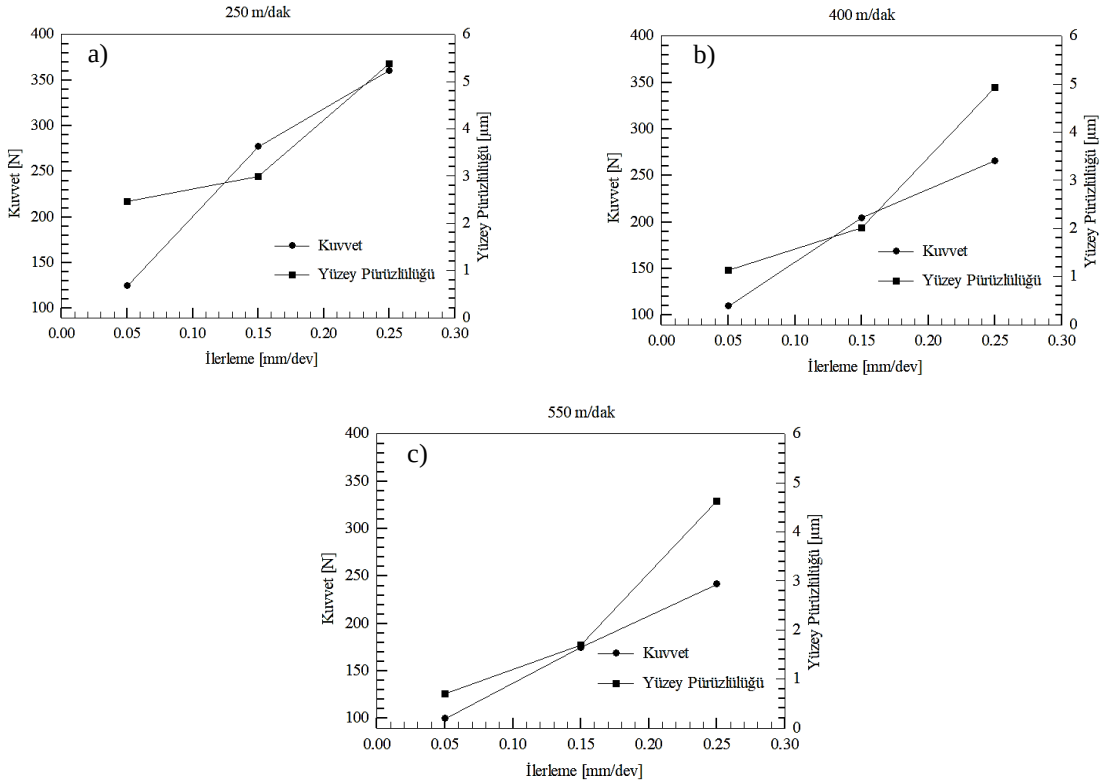
Üretilen alaşımın sabit ilerlemedeki kesme hızı-kesme kuvveti ve kesme hızı-yüzey pürüzlülüğü grafikleri, Şekil 3'te verilmiştir. 0,05 mm/dev sabit ilerlemede kesme hızının 250 m/dak'dan 550 m/dak'ya artması ile kesme kuvveti %24,95 ve yüzey pürüzlülüğü %254,69 oranında azalırken, sabit 0,25 mm/dev ilerleme değerinde sırasıyla bu değerlerin %49,30 ve %16,46 oranında azaldığı görülmüştür. Kesme hızındaki artış ile kesici takım ile talaş arayüzeyinde birincil deformasyon bölgesindeki sıcaklık artmakta ve alaşım malzemesinin akma mukavemeti azalmaktadır. Akma mukavemetindeki bu azalma, malzemenin plastik deformasyonunu kolaylaştırarak kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün azalmasına katkıda bulunmaktadır (Şekil 3) (Acır vd., 2009; Bayraktar vd., 2019; Hekimoğlu & Bayraktar, 2022b); Korkut vd., 2007)





Şekil 3. Sabit ilerleme şartlarında kesme hızının kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi, a) 0,05 mm/dev, b) 0,15 mm/dev ve c) 0,25 mm/dev

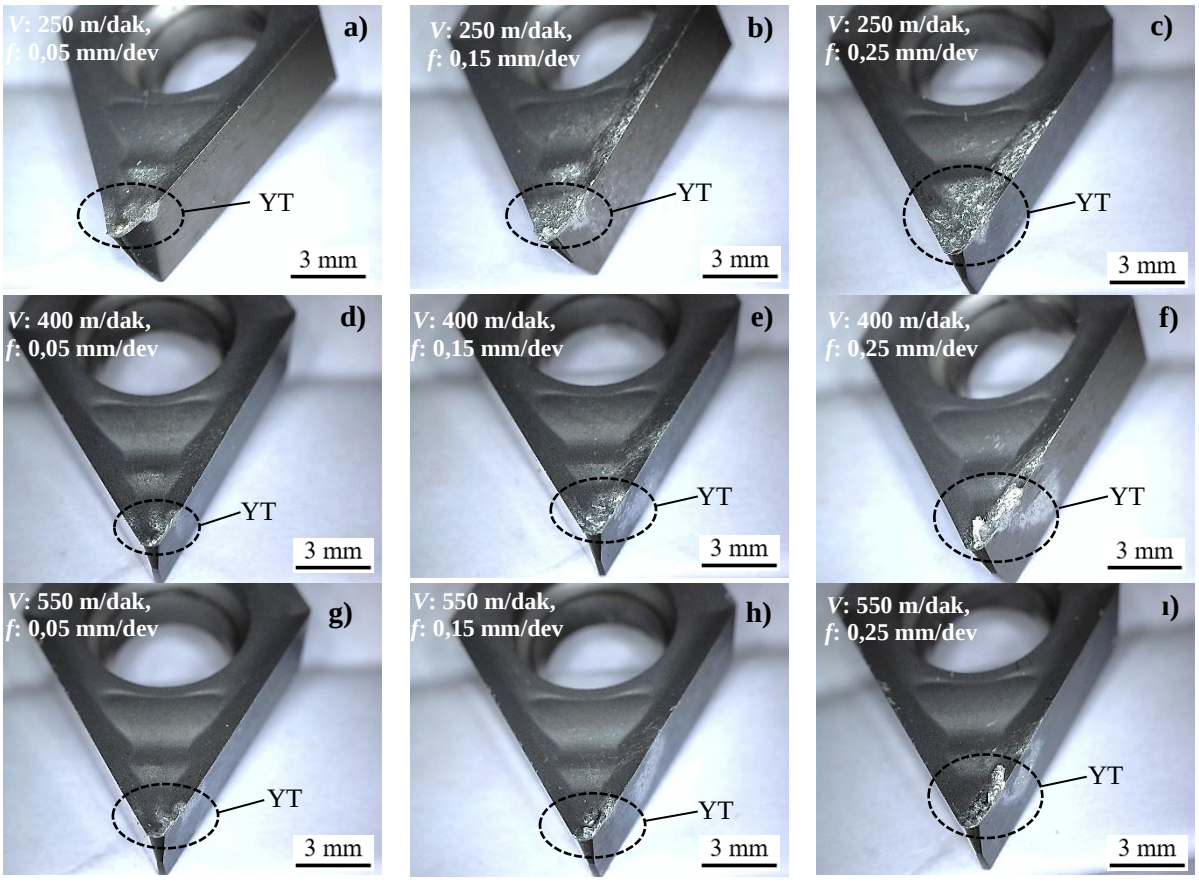
Sabit kesme hızında ilerleme-kesme kuvveti ve ilerleme-yüzey pürüzlülüğü grafikleri, Şekil 4'te verilmiştir. 250 m/dak sabit kesme hızında ilerlemenin 0,05 mm/dev'den 0,25 mm/dev'e artması ile kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü sırasıyla %189,75 ve %119,08 oranında artarken, sabit 550 m/dak kesme hızında bu değerlerin sırasıyla %142,50 ve %567,24 oranında arttığı tespit edilmiştir. İlerlemenin artmasına bağlı olarak birim zamanda kaldırılması gereken talaş hacminin artması kesme kuvvetini arttırmaktadır. Aynı zamanda ilerlemedeki bu artış, takım-talaş arayüzeyinde sürtünme yüzey alanının artmasına neden olarak kesme kuvvetini arttırdığı düşünülmektedir (Bayraktar & Demir, 2020; Bayraktar vd., 2020; Bayraktar & Çamkerten, 2020; Korkut & Dönertas, 2007). Şekil 3 ve 4'teki grafikler incelendiğinde en düşük kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin testler kapsamında kullanılan en yüksek kesme hızı (550 m/dak) ve en düşük ilerleme değerlerinde (0,05 mm/dev) ölçüldüğü tespit edilmiştir.



Şekil 4. Sabit kesme hızı şartlarında, ilerlemenin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi, a) 250 m/dak, b) 400 m/dak ve c) 550 m/dak

İlerlemenin artması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı belirlenmiştir (Şekil 4). Bu durumun takım-talaş arayüzey temas alanının artmasından ve kesici takımın aşınma eğilimine girmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 5). Ayrıca, $R_a=f^2/32r$ ifadesine göre ortalama yüzey pürüzlülüğünün doğru orantılı ilişkiden dolayı ilerlemenin artması ile artacağı gözlenmektedir. Bu ifadede R_a: ortalama yüzey pürüzlülüğünü, f: ilerlemeyi ve r: kesici uç yarıçapını temsil etmektedir (Hekimoğlu & Bayraktar, 2022b; Özel & Karpat, 2005). İşleme deneyleri esnasında kesici takımlarda YT oluşumu gözlenmiştir (Şekil 5). Kesme esnasında ilk aşamada kesici takım talaş yüzeyinde YT'ye neden olan Al esaslı bir tabaka oluşmaktadır. Bu tabaka oluşumunun kesici takım-talaş arasındaki

sıkıştırma kuvvetlerinin etkisi ile ergiyen metalik matris malzemenin ektrüzyonu ile yakından ilişkili olduğu ve talaşın yüksek oranda ergiyen Al-Si-Sr-Mg kalıntılarını kesici takım talaş yüzeyinde süpürerek YT oluşumuna neden olduğu düşünülmektedir. Oluşan bu tabakanın sertliğinin takım sertliğinden daha düşük olduğu ve kesme sıcaklıklarını düşürerek kesici takım-talaş arayüzeyinde talaşın birikmesine neden olduğu literatürdeki çalışmalarda da ortaya konulmuştur (Bayraktar & Demir, 2020; Carrilero vd., 2002; Dinaharan vd., 2023). Deneylerde, kesme hızının artması ile YT oluşumunun azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 5.c, f ve ı). YT oluşumundaki azalmanın kesme hızındaki artışın etkisi ile iş parçası malzemesi ile kesici ucun daha kısa süre temas halinde olmasından ve kesici takım-talaş arayüzey sıcaklığının artmasının sonucu olarak iş parçası malzemesinin akma mukavemetinin azalmasının ile kesme işleminin kolaylaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum, aynı zamanda işlenmiş yüzeyin kalitesini de arttırmaktadır (Aamir vd., 2020; Bayraktar & Hekimoğlu, 2023; Dwivedi vd., 2012; Fathipour vd., 2013;).



Şekil 5. Farklı kesme hızı ve ilerleme değerlerinde kesici takımda YT oluşumu, a) *V*: 250 m/dak, *f*: 0,05 mm/dev, b) *V*: 250 m/dak, *f*: 0,15 mm/dev, c) *V*: 250 m/dak, *f*: 0,25 mm/dev, d) *V*: 400 m/dak, *f*: 0,05 mm/dev, e) *V*: 400 m/dak, *f*: 0,15 mm/dev, f) *V*: 400 m/dak, *f*: 0,25 mm/dev, g) *V*: 550 m/dak, *f*: 0,05 mm/dev, h) *V*: 550 m/dak, *f*: 0,15 mm/dev ve ı) *V*: 550 m/dak, *f*: 0,25 mm/dev

4. Sonuçlar

Al-Si esaslı alaşımlar, endüstride içten yanmalı motor, elektrik motoru, pompa gövdesi, silindir başlığı, piston ve dişli kutusu üretiminde yüksek özgül mukavemet, kolay ve ekonomik dökülebilirlik özelliklerinden dolayı yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu alaşımların döküm sonrası mekanik sistemlerde nihai ürün olarak kullanılabilmesi için işlenebilirlik özelliklerinin önceden bilinmesi önem taşımaktadır. Bu çalışmada, döküm yöntemiyle imal edilen Al-9Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımının tornalama işleminde farklı kesme hızı ve ilerleme bağımsız değişkenlerinin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Al-9Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımının içyapısı, birincil Al dendritlerinden, küresel morfolojiye sahip Si parçacıkları içeren ötektik Al-Si faz bölgelerinden, ötektik dışı Si parçacıklarından, Al_4Sr ve π fazlarından oluşmaktadır.
- Kesme hızının artması ile kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü azalırken, ilerlemenin artması ile artmıştır.
- Kesme hızının artması ile YT oluşumunun azaldığı gözlenirken, ilerlemenin artması ile artmıştır.
- İşlenebilirlik testleri sonucunda minimum kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve YT oluşumu için 550 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme parametrelerinin kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Referanslar

Aamir, M., Tolouei-Rad, M., Giasin, K., & Vafadar, A. (2020). Machinability of Al2024, Al6061, and Al5083 alloys using multi-hole simultaneous drilling approach. Journal of Materials Research and Technology, 9(5), 10991-11002. doi: 10.1016/j.jmrt.2020.07.078.

Abouei, V., Shabestari, S. G., & Saghafian, H. (2010). Dry sliding wear behaviour of hypereutectic Al–Si piston alloys containing iron-rich intermetallics. Materials Characterization, 61(11), 1089–1096. doi: 10.1016/j.matchar.2010.07.001.

Acır, A., Turgut, Y., Übeyli, M., Günay, M., & Şeker, U. (2009). A study on the cutting force in milling of boron carbide particle reinforced aluminium composite. Science and Engineering of Composite Materials, 16(3), 187-196. doi:10.1515/SECM.2009.16.3.187.

Arthanari, S., Jang, J. C., & Shin, K. S. (2018). Corrosion studies of high pressure die-cast Al-Si-Ni and Al-Si-Ni-Cu alloys. Journal of Alloys and Compounds, 749, 146–154. doi: 10.1016/j.jallcom.2018.03.246

Ayata, G. (2018). Bor, stronsiyum ve/veya magnezyum katkılarının Al-Si alaşımlarının yapısal ve mekanik özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize, Türkiye.

Basavakumar, K. G., Mukunda, P. G., & Chakraborty, M. (2007). Influence of melt treatments and turning inserts on cutting force and surface integrity in turning of Al–12Si and Al–12Si–3Cu cast alloys. Surface and Coating Technology. 201(8), 4757–4766. doi:10.1016/j.surfcoat.2006.10.015.

Bayraktar, Ş., & Afyon, F. (2020). Machinability Properties of Al–7Si, Al–7Si–4Zn and Al–7Si–4Zn–3Cu Alloys. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 42, 1-12. doi:10.1007/s40430-020-02281-x.

Bayraktar, Ş., & Çamkerten, Ç. Al-25Zn-3Cu-3Si Alaşımının İşlenmesinde Kaplamasız ve CVD-TiCN Kaplamalı Kesici Uçların Kesme Performansının Karşılaştırılması. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 12(2), 618-623. doi: 10.29137/umagd.705125.

Bayraktar, Ş., Çamkerten, Ç., & Salihoğlu, N. (2020). Bakır ve Silisyum İlavelerinin Al-25Zn Alaşımının CVD Al_2O_3 Kaplamalı Takımlarla Tornalanmasında İşlenebilirliğe Etkisinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 8, 79-93. doi: 10.29109/gujsc.618229.

Bayraktar, Ş., & Demir, O. (2020). Processing of T6 heat-treated Al-12Si-0.6 Mg alloy. Materials and Manufacturing Processes, 35(3), 354-362. doi:10.1080/10426914.2020.1732412.

Bayraktar, Ş., & Hekimoğlu, A. P. (2022). Al-12Si-0.1Sr alaşımının PVD-TiAlN/TiN kaplamalı kesici ile işlenmesinde işlenebilirlik özellikleri üzerine deneysel draştırma. 5. Internatinonal Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology. Nevşehir, Türkiye.

Bayraktar, Ş., & Hekimoğlu, A. P. (2023). Performance evaluation of different carbide inserts in turning of newly developed Al-12Si-0.1 Sr alloy. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 54(1), 120-128. doi:10.1002/mawe.202200148.

Bayraktar, Ş., & Hekimoğlu, A. P., & Çalış M. (2019). Al-12Si-0,1Sr Alaşımının Sermet Kesiciler ile Tornalanmasında Kesme Hızı ve İlerlemenin Kesme Kuvveti ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. 4nd International Conference on Material Science and Technology in Kızılcahamam (IMSTEC'19), Ankara, Türkiye.

Braga, D. U., Diniz, A.E., Miranda, G. W., & Coppini, N. L. (2002). Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum–silicon alloys. Journal of Materials Processing Technology, 122(1), 127-138. doi:10.1016/S0924-0136(01)01249-3.

Campbell, J. (2011). Complate Casting Handbook, Amsterdam, Elsevier Science.

Carrilero, M. S., Bienvenido, R., Sanchez, J. M., Alvarez, M., Gonzalez, A., & Marcos, M. A. (2002). SEM and EDS insight into the BULand BUE differences in the turning processes of AA2024 Al–Cu alloy. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42(2), 215–220. doi:10.1016/S0890-6955(01)00112-2.

Davis, J. R. (2001). Alloying: Understanding the Basics. Materials Park, Ohio, ASM International.

Dinaharan, I., David Raja Selvam, J., Jose, J., & Palanivel, R. (2023). Influence of fly ash particles on machining characteristics of AA6061 aluminum matrix composites produced using semisolid slurry casting. Transactions of the Indian Institute of Metals, 1-6. doi.org/10.1007/s12666-022-02869-y.

Dos Santos, G. R., da Costa, D. D., Amorim, F. L., & Torres, R. D. (2007). Characterization of DLC thin film and evaluation of machining forces using coated inserts in turning of Al–Si alloys. Surface and Coatings Technology, 202(4-7), 1029-1033. doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.07.100.

Dwivedi, S. P., Kumar, S., & Kumar, A. (2012). Effect of turning parameters on surface roughness of A356/5% SiC composite produced by electromagnetic stir casting, Journal of Mechanical Science and Technology, 26, 3973-3979. doi:10.1007/s12206-012-0914-5.

Fathipour, M., Hamedi, M., & Yousefi, R. (2013). Numerical and experimental analysis of machining of Al (20 vol% SiC) composite by the use of ABAQUS software. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 44(1), 14-20. doi:10.1002/mawe.201300959.

Gai, S., Li, A., Liu, J., Gong, Z., & Zhao, J. (2022). Effect of surface roughness on stress concentration factor of machined surface and cutting parameter optimization in boring of Al-Si piston alloy. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 121(5-6), 4129-4140. doi:10.1007/s00170-022-09597-z.

Hafız, M. F., & Kobayashi, T. (1994). Mechanical properties of modified and nonmodified eutectic Al-Si alloys. Journal of Japan Institute of Light Metals, 44(1), 28–34. doi:10.2464/jilm.44.28.

Hekimoğlu, A. P., & Ayata G. (2019). Effect of strontium and strontium-magnesium additions on the microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-17Si alloy, Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 25(1), 49-55. doi:10.5505/pajes.2018.46343.

Hekimoğlu, A. P., & Bayraktar, Ş. (2022)a. Experimental research on machinability characteristics of Al-9Si alloy: Effect of Sr and Mg additives, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 236(13), 807-1816. doi:10.1177/09544054221092.

Hekimoğlu, A. P., & Bayraktar, Ş. (2022)b. Kokil Kalıba Döküm Yöntemi ile Üretilmiş Al-12Si-(0, 02-1) Sr Alaşımlarının CVD-TiCN/Al2O3/TiN Kaplamalı Kesici Uç ile Tornada İşlenmesinde Kesme Kuvveti ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Deneysel Çalışma. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 10(1), 50-62.

Hekimoğlu, A. P., & Calış, M. (2020)a. Effect of grain refinement with titanium on the microstructure, mechanical and corrosion properties of Al-25Zn alloy, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35(1), 311-322. doi:10.17341/gazimmfd.464676.

Hekimoğlu, A. P., & Calış, M. (2020)b. Effects of titanium addition on structural, mechanical, tribological, and corrosion properties of Al-25Zn-3Cu and Al-25Zn-3Cu-3Si alloys, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 30(2), 303-317. doi:10.1016/S1003-6326(20)65214-1.

Hekimoğlu, A. P., & Hacıosmanoğlu, M. (2018). Microstructure and mechanical properties of Al-(2-30)Si alloys. 3nd International Conference on Material Science and Technology in Cappadocia, Nevşehir, Türkiye.

Hekimoğlu, A. P., & Savaskan, T. (2014). Structure and mechanical properties of Zn-(5-25)Al alloys, International Journal of Materials Research, 105(11), 1084-1089. doi: 10.3139/146.111116.

Hekimoğlu, A. P., Çalış M., & Ayata, G. (2018). Stronsiyum ve stronsiyum magnezyum katkılarının Al-9Si alaşımının yapısal ve mekanik özelliklerine etkisi. 1st International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, Antalya, Türkiye.

Hekimoğlu, A.P., Çalış, M., & Ayata, G. (2019). Effect of strontium and magnesium additions on the microstructure and mechanical properties of Al–12Si alloys. Metals and Materials International, 25, 1488–1499. doi:10.1007/s12540-019-00429-6.

Javidani, M., & Larouche, D. (2014). Application of cast Al–Si alloys in internal combustion engine components. International Materials Reviews, 59(3), 132–158. doi:10.1179/1743280413Y.0000000027

Korkut, I., Boy, M., Karacan, I., & Seker, U. (2007). Investigation of Chip-Back Temperature During Machining Depending on Cutting Parameters. Materials & Design, 28 (2329-2335). doi: 10.1016/j.matdes.2006.07.009.

Korkut, I., & Donertas, M. A. (2007). The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool–chip contact length during face milling. Materials & design, 28(1), 308-312. doi: 10.1016/j.matdes.2005.06.002.

Li, Q., Li, B., Li, J., Xia, T., Lan, Y., & Guo, T. (2017). Effects of the addition of Mg on the microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al-7Si alloy. International Journal of Metalcasting, 11, 823–830. doi:10.1007/ s40962-016-0131-6.

Li, Y., Yang, Y., Wu, Y., Wang, L., & Liu, X. (2010). Quantitative comparison of three Ni-containing phases to the elevated-temperature properties of Al–Si piston alloys. Materials Science and Engineering: A, 527(26), 7132–7137. doi:10.1016/j.msea.2010.07.073.

Marani, M., Songmene, V., Kouam, J., & Zedan, Y. (2018). Experimental investigation on microstructure, mechanical properties and dust emission when milling Al-20 Mg 2 Si-2Cu metal matrix composite with modifier elements. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 99, 789-802. doi.org/10.1007/s00170-018-2491-y.

Nikanorov, S. P., Volkov, M. P., Gurin, V. N., Burenkov, Y. A., Derkachenko, L. I., Kardashev, B. K., & Wilcox, W. R. (2005). Structural and mechanical properties of Al–Si alloys obtained by fast cooling of a levitated melt. Materials Science and Engineering: A, 390(1-2), 63–69. doi:10.1016/j.msea. 2004.07.037

Özel, T., & Karpat, Y. (2005). Predictive Modeling of Surface Roughness and Tool Wear in Hard Turning Using Regression and Neural Networks. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45, 467-479. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.09.007.

Prabhudev, M. S., Auradi, V., Venkateswarlu, K., Siddalingswamy, N. H., & Kori, S. A. (2014). Influence of Cu addition on dry sliding wear behaviour of A356 alloy. Procedia Engineering, 97, 1361–1367. doi:10.1016/j.proeng.2014.12.417.

Rainen, R. A., & Ekvall, J. C. (1988). Elevated-temperature Al alloys for aircraft structure. Journal of Metals, 40(5), 16–18. doi:10.1007/BF03258903.

Razin, A. A., Ahammed, D. S., Nur, M. A., & Kaiser, M. S. (2022). Role of Si on machined surfaces of Al-based automotive alloys under varying machining parameters. Journal of Mechanical and Energy Engineering, 6(1), 43-52. doi:10.30464/jmee.2021.6.1.43.
Santos, H. de O., Reis, F. M. dos, Kunioshi, C. T., Rossi, J. L. & Costa, I. (2005). Corrosion performance of Al-Si-Cu hypereutectic alloys in a synthetic condensed automotive solution. Materials Research, 8(2), 155–159. doi:10.1590/ s1516-14392005000200011.

Savaşkan, T., & Turhal, M.Ş. (2003). Turhal, Relationships between cooling rate, copper content and mechanical properties of monotectoid based Zn–Al–Cu alloys, Materials Characterization, 51(4), 259-270. doi:10.1016/j.matchar.2003.12.003.

Shaha, S. K., Czerwinski, F., Kasprzak, W., Friedman, J. & Chen, D.L. (2015). Effect of solidification rate and loading mode on deformation behavior of cast Al-Si-Cu-Mg alloy with additions of transition metals. Materials Science and Engineering A, 636, 361–372. doi:10.1016/j.msea.2015.03.077.

Zeren, M. (2007). The effect of heat-treatment on aluminum-based piston alloys. Materials and Design, 28(9), 2511–2517. doi: 10.1016/j.matdes.2006.09.010.

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

UMAGD, (2023) 15(2), 526-534.

10.29137/umagd.1258578

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Graphene Oxide-Reinforced Cementitious Concrete Composites Incorporates Silica Fume And Fly Ash

İsmail Raci Bayer [1,2]

[1]*Kırıkkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71451, Kırıkkale, Türkiye*
[2]*Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 06510, Ankara, Türkiye*

***Başvuru/Received**: 01/03/2023* ***Kabul / Accepted**: 03/04/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Abstract

In recent years, nano-sized graphene oxide (GO) has come to the fore as a promising material for enhancing the mechanical and durability performance of cementitious composites. On the other hand, partial substitution of industrial wastes and by-products into cementitious composites attracts the attention of researchers in order to ensure long-term sustainability. In order to combine these two aspects, the main focus of this study is to examine the effect of 0.05% and 0.1% GO-reinforcement on the slump, 7 and 28-day compressive and flexural strength and 28-day rapid chloride permeability test (RCPT) properties of cementitious composites. In this context, mixtures with three different binder combinations, a control, a silica fume (SF) substitution, and a fly ash (FA) substitution, were designed. The results showed that GO-reinforcement reduced the slump values of the mixtures between 5-15 mm, while the 28-day compressive strengths increased in the range of 9.82%-13.61% with 0.05% GO-reinforcement, and in the range of 17.02%-20.68% with 0.1% GO-reinforcement. The 28-day flexural strength of the mixtures increased by about 10% on average as a result of 0.1% GO-reinforcement. According to the RCPT anaylses, it was observed that the chloride permeability of the mixtures decreased up to 18.85% with 0.1% GO-reinforcement.

Key Words

Graphene-oxide, nanomaterial, cement, mechanical properties, RCPT.

***Corresponding Author:** iraci.bayer@csb.gov.tr*

1. Introduction

Cementitious composites are widely used to build civil structures (Chakraborty et al., 2013). Although these are used a wide range of structural applications, they are brittle and have poor tensile strength. There is a need to minimize the potential consequences of deterioration. Because brittleness and poor tensile strength deteriorate the hardened concrete on exposure to harsh environmental conditions in time. Important structures such as dam, skyscraper may be exposed to harsh environments and severe loading conditions. Hence, the durability of structures is one of the most important properties, particularly for structures exposed to harsh environments (Neville, 1995; Mindess et al., 2003; Mehta and Monteiro, 2006). In this way, increasing the performance of cement-based materials is of big significance for durable and environment-friendly structures. The durability properties of concrete structures are mightily affected by its permeability properties to the harmful agents such as water, CO_2, chloride, etc. (Mehta, 2001; Sahmaran et al., 2007). As it is known, different fibers or steel bars have been applied to limit the propagation of micro-cracks to develop the mechanical, permeability properties of plain cementitious materials (Nemkumar and Gupta, 2006; Sahmaran et al., 2009, Sahmaran et al., 2013).

Today, nanomaterials have been extensively used to cementitious materials as nanofillers owing to progress in nanotechnology (Jo et al., 2007; Stefanidou and Papayianni, 2012). It is worthy widely the use of nanomaterials in cementitious materials, enabling such materials with higher mechanical strength, durability, toughness, multifunctional for the next generation buildings and structures. During recent years, there has been increasing attention in the use of nanomaterials in construction materials to increase mechanical, permeability, durability performances and to create multifunctional capabilities (Sobolev and Ferrada-Gutierrez, 2005; Metaxa et al., 2012; Chen et al., 2012; Kawashima et al., 2013; Jiang et al., 2021). These nanomaterials fill the gaps in the cementitious composites, causing high compactness and higher strength (Metaxa et al., 2012; Chen et al., 2012; Kawashima et al., 2013). So far, nanomaterials such as graphene nanoplatelets (GNP) (Jiang et al., 2021), carbon nanotubes (CNTs) (Chaipanich et al., 2010; Konsta-Gdoutos et al., 2010; Azhari and Banthia, 2012; Sobolkina et al., 2012; Al-Dahawi et al., 2016), carbon nanofibers (CNFs) (Tyson et al., 2011; Konsta-Gdoutos and Aza, 2014), nano $CaCO_3$ (Kawashima et al., 2014), nano SiO_2 (Gaitero et al., 2008; Quercia et al., 2014; Hou et al., 2015), nano TiO_2 (Krishnan et al., 2013; Li et al., 2014), carbon black (Ding et al., 2013; Rezania et al., 2019) have already attracted the attention of different researchers owing to their extraordinary mechanical properties.

Another kind of carbon-based nanomaterial is the graphene oxide (GO). GO is promising nanoscale carbon-based materials. Attractive advantage of GO is the low cost when compared to other carbon-based nanomaterials, such as CNTs and CNFs, whose large-scale production is considerably more expensive (Lu et al., 2008; Kostarelos and Novoselov, 2014). Graphene oxide (GO) can be used as a nano-reinforcing agent in cementitious materials like CNPs. GO has shown up as a precursor filler nanomaterial offering the potential of cost-effective, large-scale production of graphene-based cementitious materials (Park and Ruoff, 2009). Graphene is a carbon-based nanomaterial because of its unprecedented properties (Geim and Novoselov, 2007), such as high intrinsic mobility of 200,000 cm2 $v^{-1}s^{-1}$ (Bolotin et al., 2008; Morozov et al., 2008), a large specific surface area of 2630 m^2/g, and high Young's modulus of about 1.0 TPa (Lee et al., 2008). Graphene oxide (GO) is one of the surface-functionalized forms of graphene and have extraordinary properties such as high strength, high Young's modulus, and high specific surface area (Zhu et al., 2010). GO in some of the recent investigations has been used as-synthesized or as-received (Lv et al., 2013; Pan et al., 2015; Tong et al., 2016; Devi and Khan, 2020). Striking improvement in strength (Lv et al., 2013; Tong et al., 2016), and permeability properties (Pan et al., 2015; Devi and Khan, 2020) have been presented.

Despite the above-mentioned benefits, large-scale application of graphene-based cementitious composites are facing difficulties such as its uniform dispersion. For GO to show their superior properties in cementitious composites, they must be well dispersed in the mixing water and then in concrete. The superior properties of GO in reinforcing cementitious composites can solely be achieved with well dispersion and distribution in the concrete. The literature review has shown that the GO by use with high shear mixing has been studied very limited in the concrete composites. The aim of this study is to investigate effect of GO on the mechanical and durability properties of concrete. To this end, GOs were synthesized according to the modified Hummer's method and then cementitious concrete composites reinforced with GO with and without FA and SF were produced. Compressive, flexural, and rapid chloride ion permeability test (RCPT) properties of GO-reinforced cementitious concrete composites were tested.

2. Materials and Methodology

2.1. Materials

Ordinary Portland cement, potable water, fine aggregate, coarse aggregate, GO, fly ash (FA), and silica fume (SF) were used in this study. The chemical properties of cement, FA and SF were given in Table 1.

GOs were synthesized according to the modified Hummer's method (Shahriary et al., 2014). In the first stage, 1 g of graphite and 0.5 g of $NaNO_3$ were mixed in a flask. Then, 50 ml of H_2SO_4 (98%) was added under continuous stirring at 5 °C for 1 h. Afterward, 3 g of $KMnO_4$ (1 g every 15 min) was included and special attention was paid to avoid overheating and explosion by keeping the solution temperature under 20 °C. The solution was then diluted by slowly adding 100 ml of distilled water and the solution was treated with 3 ml of 30% H_2O_2 solution and finally, 100 ml of distilled water was added in order to be sure that $KMnO_4$ is completely reacted in the end, the solution was washed with HCl and water and filtrated to obtain dry GO. High shear mixing with 30 min, at 5000 rpm speed

was used to disperse the agglomerates and stabilize the GO particles in water solution. High shear mixing with 30 min, at 5000 rpm speed were chosen suggestion of Jiang et al. (2021) and Ozbulut et al. (2018). This uniform dispersed water solution of GO (0.05 wt% and 0.1 wt%) was mixed with cement and aggregates to produce concrete.

Table 1. The Chemical Properties Of The Materials

Chemical composition (%)	Cement	Silica fume	Fly ash
SiO_2	21.04	96.29	36.27
Al_2O_3	4.88	0.24	15.28
Fe_2O_3	2.55	0.05	4.19
CaO	64.26	0.51	29.12
MgO	1.71	0.56	2.04
Na_2O	0.33	0.22	0.62
K_2O	0.41	0.30	1.06
SO_3	3.19	0.53	6.78

2.2. Mixture Proportions

In this study, in order to investigate the effect of different GO ratios on the properties of concrete, control mixtures, and mixtures including 0.05% and 0.1% by weight of GO were designed. The water/cement ratio was kept constant at 0.5. The fly ash and silica fume were replaced by cement at 18.6% and 6.97% by weight of cement, respectively. High shear mixing time was kept constant at 30 min at 5000 rpm speed for all mixtures in order to provide a uniform dispersion of GO and avoid agglomerations. The detailed mix proportions of the mixtures were given in Table 2.

Table 2. Mix Proportions of GO-Based Concrete Mixtures (kg/m^3)

Sample ID	Cement	FA	SF	Water	Coarse Aggregate	Fine Aggregate	GO
Control	430			215	850	804	-
SF	400		30	215	850	804	-
FA	350	80		215	850	804	-
0.05GO	430			215	850	804	0.215
0.05GO.SF	400		30	215	850	804	0.215
0.05GO.FA	350	80		215	850	804	0.215
0.1GO	430			215	850	804	0.430
0.1GO.SF	400		30	215	850	804	0.430
0.1GO.FA	350	80		215	850	804	0.430

2.3. Curing and Testing

Slump, compressive and flexural strengths, and rapid chloride permeability test (RCPT) was applied to designed mixtures. After casting, all the samples were covered with a sheet to inhibit water loss and all samples were removed from the mold after 24 hours. All samples were immersed in potable water until testing day.

For compressive strength test, four cylindric samples with the dimensions of Φ10 × 30 cm cylinders were produced and water cured for 7 and 28 days. Compressive strength test was applied in accordance with ASTM C 39, (2005). For measuring compressive strength, samples were loaded at a loading rate of 0.25 ± 0.05 MPa/s and results were averaged.

For flexural strength testing, three prismatic samples with the dimensions of 10 × 10 × 40 cm were produced and cured for 7 and 28 days. Flexural strength test was applied in accordance with ASTM C 78, (2018). Prismatic specimens were subjected to three-point bending loading between 0.9 and 1.2 MPa/min in to determine the flexural strength, and the maximum flexural load was recorded in order to compute the results.

RCPT of GO-reinforced cementitious concrete composites were explored for 28 days following with ASTM C 1202, (2012). Cylindrical specimens of GO-reinforced cementitious concrete composites with the dimensions Φ10 × 5 cm were prepared. For each mixture, four specimens were tested. During testing, concrete specimens were placed in the experimental cell one end of that was in contact with 3% NaCl solution and the other with 0.30 M NaOH solution. Each specimen's total current flow during the course of 6 hours at a constant voltage of 60.0 ± 0.1 V was noticed and recorded in Coulombs (C) units.

3. Results and Discussion

3.1. Slump Test

Slump test results of the mixtures designed within the scope of the study were presented in Figure 1. The slump values of the control, SF and FA coded mixtures resulted in 115, 110 and 120 mm, respectively. As it is known in the literature, the spherical grain shape of FA significantly improves the workability and slump value of concrete mixes, thanks to the ball bearing effect that provides lubrication between cement particles (Shaikuthali et al., 2019). In the mixture containing SF, it can be stated that the slump values decrease due to the very high specific surface of SF (Imam et al., 2018). Besides, it was observed that 0.05% GO substitution reduced the slump values of the control mix, SF substituted mix, and FA substituted mix by 4.35%, 4.55%, and 8.33%, respectively. 0.1% GO substitution reduced the slump values of the control mix, SF substituted mix and FA substituted mix by 8.70%, 9.09% and 12.5%, respectively. Similar results were reported on the decrease in workability with the addition of GO in the previous studies (Li et al., 2018; Chuah et al., 2018).

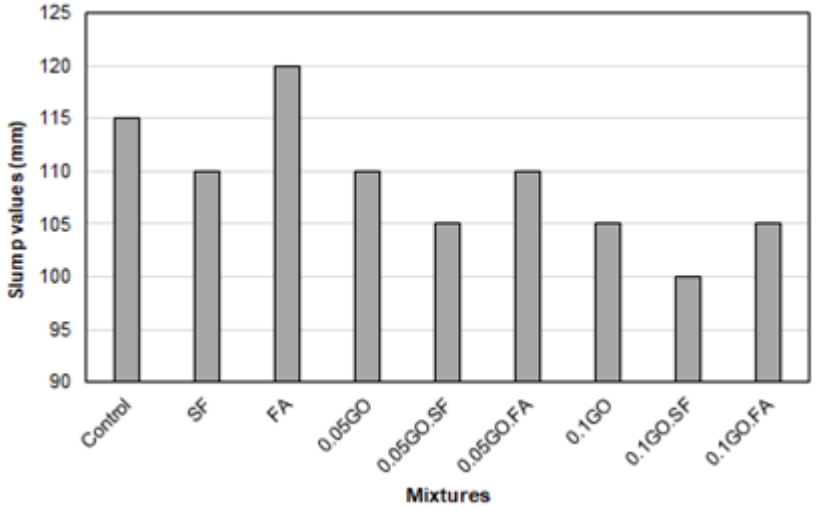


Figure. 1. Slump Values of Different GO-Reinforced Concrete Composites.

3.2. Compressive Strength Test

The 7- and 28-day compressive strength results of the mixtures designed within the scope of the study were presented in Figure 2. Results showed that SF and FA addition caused a decrease in 7-day compressive strength according to the control mixture by 5.29% and 8.37%, respectively. On the other hand, while SF inclusion caused an increase in the 28-day compressive strength result by 1.31%, FA inclusion yielded a decrease of 2.35% at the same age. As it is known, when supplementary cementitious materials such as SF and FA are included in cementitious systems, they generally decrease the strength at an early age, while they contribute to the achievement of better strengths compared to the control mixture with the increase in pozzolanic activities in later ages (Chandra and Hardjito, 2015).

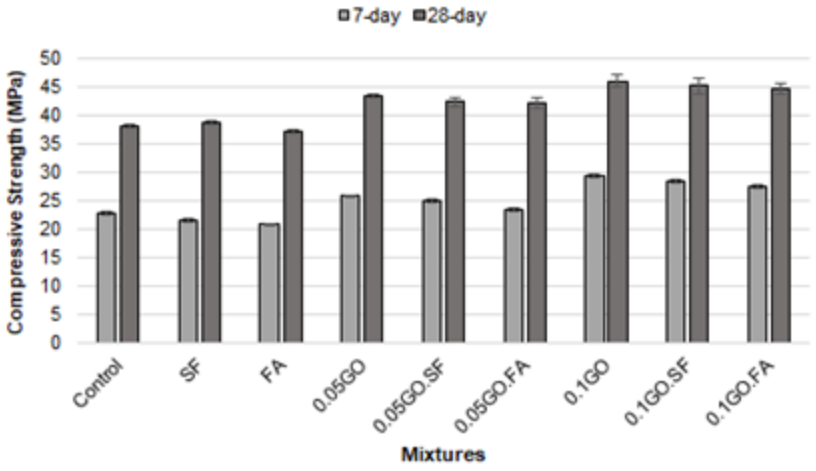


Figure. 2. Compressive Strength Test Results of Different GO-Reinforced Concrete Composites

As shown in Figure 2, it was observed that the GO reinforcement significantly improved the compressive strengths of the mixtures. In this context, the compressive strength of the control mixture increased by 15.85% after 28 days with 0.05% GO inclusion, while an increase by 24.09% was detected at the same age with 0.1% GO inclusion. In the SF substituted mixture, 0.05% and 0.1% GO substitutions increased the compressive strength of the samples by 9.82% and 19.12%, respectively, at the end of 28 days. A similar trend was also seen in FA substituted mixtures and 0.05% and 0.1% GO inclusion resulted in an increase of 13.40% and 19.84% in the compressive strength of the samples, respectively, at the end of 28 days. The rise in the mixes' compressive strengths can be attributed to the high specific surface area of GO, which promotes the nucleation of cement hydrates and generates strong covalent connections at the interface between the cement matrix and GO. Therefore, addition of GO to the mixtures, resulting in improvement of the compressive strength of GO-reinforced concrete composites. Previous studies in the literature stated that a small amount of GO additives increased the compressive strengths significantly (Lv et al., 2013; Gong et al., 2015; Pan et al., 2015; Devi and Khan, 2020). Also, the increase in compressive strength confirmed that GO is well dispersed in concrete composites without agglomeration.

3.3. Flexural Strength Test

The flexural strength results of GO-reinforced concrete composites after the 7- and 28-day water curing were presented in Figure 3. Similar to the compressive strength results, the control mixture showed a higher flexural strength of 3.68 MPa at 7 days than the SF and FA substituted mixtures, while the SF substituted mixture showed the highest flexural strength result among these three mixtures with 5.24 MPa at the end of 28 days.

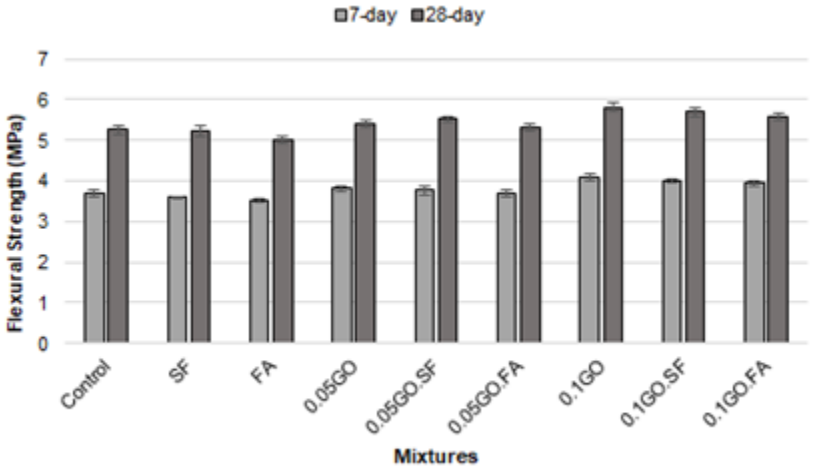


Figure 3. Flexural Strength Test Results of Different GO-Reinforced Concrete Composites

Considering the flexural strengths of GO-reinforced mixtures, the mixture produced with 0.1 GO and 100% Portland cement exhibited the highest flexural strength result with 5.82 MPa at the end of 28 days of curing. The mixtures produced with 0.1 GO and SF and FA substitution showed results close to the Portland cement mixture with flexural strengths of 5.71 MPa and 5.58 MPa, respectively, at the end of 28 days. In general, it was observed that the GO substitution significantly improved the flexural strengths of the mixtures. This is due to the fact that GO significantly improves flexural load transfer by forming strong interface adhesion with hydration products in the cement matrix (Pan et al., 2015).

3.4. Rapid Chloride Permeability Test

The rapid chloride ion permeability test (RCPT) results of GO-reinforced concrete composites was after the 28 days curing were presented in Figure 4. According to the RCPT analysis, the Coulomb value of the control mixture was 3851, while the Coulomb values of the SF and FA substituted mixtures were found to be 3885 and 3786, respectively. As a result of 0.05% GO-reinforcement, Coulomb values decreased by 11.01% for the control mixture, 9.88% for the SF substituted mixture and 7.24% for the FA substituted mixture. The Coulomb values of the mixtures designed with 0.1% GO-reinforcement resulted in 3125, 3201 and 3219 for the control, SF substituted and FA substituted mixtures, respectively. As can be clearly seen from the results, it can be said that the GO-reinforcement has a very positive effect in terms of durability as well as mechanical improvement by significantly reducing the chloride ion permeability of the mixtures. The decrease in Coulomb values as a result of GO-reinforcement was due to the interconnected layers of the GO and the ability to retain chloride ions (Shanmuga et al., 2021). Results were found to be very consistent with the compressive and flexural strength test results.

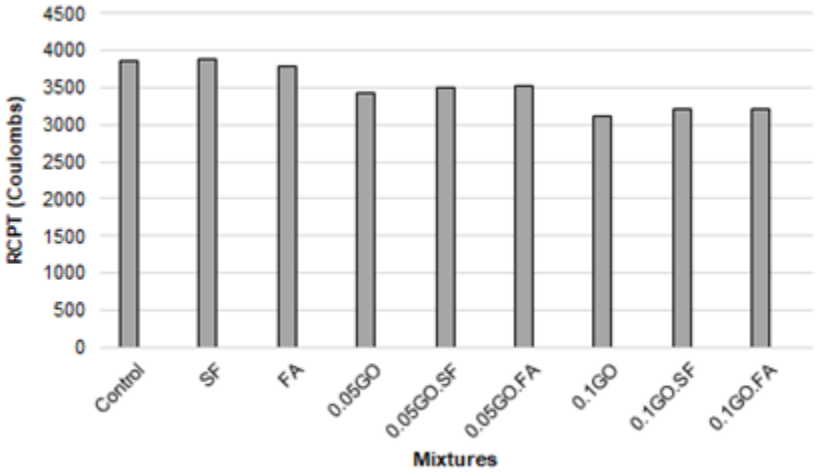


Figure 4. The 28-Day RCPT Results of Different GO-Reinforced Concrete Composites

4. Conclusion

In this study, slump, compressive and flexural strength and rapid chloride permeability test (RCPT) characteristics of 0.05% and 0.1% graphene oxide (GO) reinforced cementitious concretes were investigated. Within the scope of the study, the control mixture incorporates entirely Portland cement, 18.6% fly ash (FA) substituted mixture and 6.97% silica fume (SF) substituted mixture were designed. The main findings of the study can be summarized as follows:

- While the slump value of the control mixture was found to be 115 mm, it decreased by 5 mm for each 0.05% GO addition. In SF substituted mixtures, each 0.05% GO addition to the control mixture caused a 5 mm decrease in slump values. In FA substituted mixtures, the slump value decreased from 120 mm to 110 mm and 105 mm, respectively, after each 0.05% GO addition.
- The addition of 0.05% GO increased the 28-day compressive strengths of the control mixture, SF and FA substituted mixtures by 15.85%, 9.82% and 13.40%, respectively, while the addition of 0.1% GO increased the compressive strengths by 24.09%, 19.12% and 19.84%, respectively. In this context, the highest compressive strength in this study was achieved in the 0.1 GO-reinforced Portland cement concrete with the 46.1 MPa after the 28-day curing.
- The flexural strengths of the mixtures designed within the scope of the study increased by 2.65% for the control mixture, 5.34% for the SF substituted mixture and 5.98% for the FA substituted mixture at the end of 28-day as a result of the addition of 0.05% GO. When the GO addition was 0.1%, the flexural strengths increased by 10.43% for the control mixture, 8.97% for the SF substituted mixture and 11.16% for the FA substituted mixture. The highest flexural strength after the 28-day curing was obtained with 5.82 MPa from the mixture in which the binder phase consisted of 100% Portland cement and 0.1% GO was added.
- According to the RCPT analysis results, the addition of 0.05% GO caused the Coulomb values of the control, SF-substituted and FA-substituted mixtures to decrease by 11.01, 9.88 and 7.24%, respectively. The addition of 0.1% GO decreased the Coulomb values of the control, SF-substituted and FA-substituted mixtures by 18.85%, 17.61% and 14.98%, respectively. GO-reinforcement showed a very positive effect by significantly reducing the chloride ion permeability of the mixtures.

5. References

Al-Dahawi, A., Öztürk, O., Emami, F., Yıldırım, G., Şahmaran M. (2016). Effect of mixing methods on the electrical properties of cementitious composites incorporating different carbon-based materials. Construction and Building Materials, 104, 160-168.

ASTM C 39, (2005). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C1202, (2012). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C78/C78M, (2018). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA.

Azhari, F., & Banthia N. (2012). Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing. Cement and Concrete Composites, 34, 866–873.

Bolotin, K. I., Sikes, K. J., Jiang, Z., Klima, M., Fudenberg, G., Hone, J., ... & Stormer, H. L. (2008). Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. Solid state communications, 146(9-10), 351-355.

Chaipanich, A., Nochaiya, T., Wongkeo, W., Torkittikul, P. (2010). Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes–fly ash cement composites. Materials Science and Engineering: A, 527, 1063–1067.

Chakraborty, S., Kundu, S. P., Roy, A. Adhikari, B. Majumder, S. B. (2013) Effect of jute as fiber reinforcement controlling the hydration characteristics of cement matrix. Industrial & Engineering Chemistry Research, 52, 1252–1260.

Chandra, L., & Hardjito, D. (2015). The impact of using fly ash, silica fume and calcium carbonate on the workability and compressive strength of mortar. Procedia Engineering, 125, 773-779.

Chen, J., Kou, S. C., Poon, C. S. (2012) Hydration and properties of nano-TiO2 blended cement composites. Cement and Concrete Composites, 34, 642–649.

Chuah, S., Li, W., Chen, S. J., Sanjayan, J. G., & Duan, W. H. (2018). Investigation on dispersion of graphene oxide in cement composite using different surfactant treatments. Construction and Building Materials, 161, 519-527.

Devi, S. C., & Khan, R. A. (2020). Effect of graphene oxide on mechanical and durability performance of concrete. Journal of Building Engineering, 27, 101007.

Ding, Y., Chen, Z., Han, Z., Zhang, Y., Pacheco-Torgal, F. (2013). Nano-carbon black and carbon fiber as conductive materials for the diagnosing of the damage of concrete beam. Construction and Building Materials, 43, 233-241.

Gaitero, J. J., Campillo, I., Guerrero, A. (2008). Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles. Cement and Concrete Research, 29, 1112–1118.

Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. Nature materials, 6(3), 183-191.

Gong, K., Pan, Z., Korayem, A. H., Qiu, L., Li, D., Collins, F., ... & Duan, W. H. (2015). Reinforcing effects of graphene oxide on portland cement paste. J. Mater. Civ. Eng, 27(2), A4014010.

Hou, P., Qian, J., Cheng, X., Shah, S. P. (2015). Effects of the pozzolanic reactivity of nanoSiO2 on cement-based materials. Cement and Concrete Composites, 55, 250–258.

Imam, A., Kumar, V., & Srivastava, V. (2018). Review study towards effect of Silica Fume on the fresh and hardened properties of concrete. Advances in concrete construction, 6(2), 145.

Jiang, Z., Sevim, O., Ozbulut, O. E. (2021). Mechanical properties of graphene nanoplatelets-reinforced concrete prepared with different dispersion techniques. Construction and Building Materials, 303, 124472.

Jo, B. W., Kim, C. H., Tae, G., Park, J. B. (2007). Characteristics of cement mortar with nano-SiO2 particles. Construction and Building Materials, 21, 1351-1355.

Kawashima, S., Hou, P., Corr, D. J., Shah, S. P. (2013) Modification of cement-based materials with nanoparticles. Cement and Concrete Composites, 36, 8–15.

Kawashima, S., Seo, J. W. T., Corr, D., Hersam, M. C., Shah, S.P. (2014). Dispersion of CaCO3 nanoparticles by sonication and surfactant treatment for application in fly ash-cement systems. Materials and Structures, 47, 1011–1023.

Konsta-Gdoutos, M. S., & Aza C. A. (2014). Self-sensing carbon nanotube (CNT) and nanofiber (CNF) cementitious composites for real time damage assessment in smart structures. Cement and Concrete Composites, 53, 162–169.

Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., Shah, S. P. (2010). Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. Cement and Concrete Research, 40, 1052-1059.

Kostarelos, K., & Novoselov, K. S. (2014). Exploring the interface of graphene and biology. Science, 344(6181), 261-263.

Krishnan, P., Zhang, M. H., Yu, L., Feng, H. (2013). Photocatalytic degradation of particulate pollutants and self-cleaning performance of TiO2-containing silicate coating and mortar. Construction and Building Materials, 44, 309–316.

Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. science, 321(5887), 385-388.

Li, H., Xiao, H., Guan, X., Wang, Z.,Yu L. (2014). Chloride diffusion in concrete containing nano-TiO2 under coupled effect of scouring. Composites Part B: Engineering, 56, 698–704.

Li, X., Liu, Y. M., Li, W. G., Li, C. Y., Sanjayan, J. G., Duan, W. H., & Li, Z. (2017). Effects of graphene oxide agglomerates on workability, hydration, microstructure and compressive strength of cement paste. Construction and Building Materials, 145, 402-410.

Lu, J., Do, I., Drzal, L. T., Worden, R. M., Lee, I. (2008). Nanometal-decorated exfoliated graphite nanoplatelet based glucose biosensors with high sensitivity and fast response. ACS nano, 2(9), 1825-1832.

Lv, S., Ma, Y., Qiu, C., Sun, T., Liu, J., & Zhou, Q. (2013). Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites. Construction and building materials, 49, 121-127.

Lv, S., Ma, Y., Qiu, C., Sun, T., Liu, J., & Zhou, Q. (2013). Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites. Construction and building materials, 49, 121-127.

Mehta, P. K. (2001). Reducing the environmental impact of concrete. Concrete International, (10), 61–66.

Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M., (2006). Concrete Microstructure, Properties, and Materials (3rd ed.). New York, McGraw-Hill.

Metaxa, Z. S., Seo, J. W. T., Konsta-Gdoutos, M. S., Hersam, M. C., Shah, S. P. (2012). Highly concentrated carbon nanotube admixture for nano-fiber reinforced cementitious materials. Cement and Concrete Composites, 34, 612–615.

Mindess, S., Young, J. F., Darwin, D. (2003). Concrete (2nd ed.). New Jersey, Prentice Hall.

Morozov, S. V., Novoselov, K. S., Katsnelson, M. I., Schedin, F., Elias, D. C., Jaszczak, J. A., & Geim, A. K. (2008). Giant intrinsic carrier mobilities in graphene and its bilayer. Physical review letters, 100(1), 016602.

Nemkumar, B., & Gupta, R. (2006). Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. Cement and Concrete Research, 36(7), 1263-1267.

Neville, A. M. (1995). Properties of Concrete (4th ed.). London, Prentice Hall

Ozbulut, O. E., Jiang, Z., & Harris, D. K. (2018). Exploring scalable fabrication of self-sensing cementitious composites with graphene nanoplatelets. Smart Materials and Structures, 27(11), 115029.

Pan, Z., He, L., Qiu, L., Korayem, A. H., Li, G., Zhu, J. W., ... & Wang, M. C. (2015). Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite. Cement and Concrete Composites, 58, 140-147.

Park, S., & Ruoff, R. S. (2009). Chemical methods for the production of graphenes. Nature nanotechnology, 4(4), 217-224.
Quercia, G., Spiesz, P., Husken, G., Brouwers, H. J. H. (2014). SCC modification by use of amorphous nano-silica, Cement and Concrete Composites, 45, 69–81.

Rezania, M., Panahandeh, M., Razavi, S. M. J., Berto, F. (2019). Experimental study of the simultaneous effect of nano-silica and nano-carbon black on permeability and mechanical properties of the concrete. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 104, 102391.

Sahmaran, M., Li, M., Li, V. C. (2007). Transport properties of engineered cementitious composites under chloride exposure. ACI Materials Journal, 104, 604-611.

Sahmaran, M., Li, M., Li, V. C. (2009). Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash. Cement and Concrete Research, (11), 1033-1043.

Sahmaran, M., Yildirim, G., Erdem, T. K. (2013). Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials. Cement and Concrete Composites, 35(1), 89-101.

Shahriary, L., & Athawale, A. A. (2014). Graphene oxide synthesized by using modified hummers approach. Int. J. Renew. Energy Environ. Eng, 2(01), 58-63.

Shaikuthali, S. A., Mannan, M. A., Dawood, E. T., Teo, D. C. L., Ahmadi, R., & Ismail, I. (2019). Workability and compressive strength properties of normal weight concrete using high dosage of fly ash as cement replacement. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 4(1), 1-7.

Shanmuga Priya, T., Mehra, A., Jain, S., & Kakria, K. (2021). Effect of graphene oxide on high-strength concrete induced with rice husk ash: mechanical and durability performance. Innovative Infrastructure Solutions, 6(1), 1-16.

Sobolev, K., & Ferrada-Gutierrez, M. (2005). How nanotechnology can change the concrete world: part I. American Ceramic Society Bulletin, 84, 14–17.

Sobolkina, A., Mechtcherine, V., Khavrus, V., Maier, D., Mende, M., Ritschel, M., Leonhardt A. (2012). Dispersion of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of cement matrix. Cement and Concrete Composites, 34, 1104–1113.

Stefanidou M., & Papayianni, I. (2012). Influence of nano-SiO2 on the Portland cement pastes. Composites Part B: Engineering, 43, 2706–2710.

Tong, T., Fan, Z., Liu, Q., Wang, S., Tan, S., & Yu, Q. (2016). Investigation of the effects of graphene and graphene oxide nanoplatelets on the micro-and macro-properties of cementitious materials. Construction and Building Materials, 106, 102-114.

Tyson, M., Al-Rub, R. K. A., Yazadanbakhsh, A., Graslev Z. (2011). Carbon nanotubes and carbon nanofibers for enhancing the mechanical properties of nanocomposite cementitious materials. Journal of Materials in Civil Engineering, 23, 1028–1035.

Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J. W., Potts, J. R., & Ruoff, R. S. (2010). Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications. Advanced materials, 22(35), 3906-3924.

MÜHENDİSLİK MİMARLIK FAKÜLTESİ

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

UMAGD, (2023) 15(2), 535-546.

10.29137/umagd.1180860

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Zaman Gecikmeli Sıvı Seviye Sistemi için Kaskad Oransal-İntegral Denetleyicilerin Deneysel Uygulaması

Experimental Application of Cascade Proportional-Integral Controllers for Time Delayed Liquid Level System

Ahmet DUMLU[1*], Emre TUŞİK[1] Sadrettin GÖLCÜGEZLİ[1]

[1]Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi EEM Bölümü, 25100 Yakutiye/ERZURUM, TÜRKİYE

***Başvuru/Received**: 27/09/2022* ***Kabul / Accepted**: 10/04/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/05/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: xx/xx/xxxx*

Öz

Bu çalışmada zaman gecikmeli sıvı seviye sisteminin kaskad kontrolün performansını artırmak için standart formlara dayalı yeni bir kaskad kontrol yapısı ve kontrolör tasarımı önerilmektedir. Kaskad kontrolör yapısına ayrıca zaman gecikmesi eklenerek kaskad oransal integral gecikmeli kontrolör (Cascade Proportional Integral Retarded (CPIR)) şeklinde adlandırılabilecek sıvı seviye sistemi için yeni bir kontrol tasarımı yapılmıştır. İlk olarak gecikme tabanlı sistemlerin genel özellikleri hakkında bilgi verilmiş ve üzerinde deneysel çalışmaların yapıldığı zaman gecikmeli sıvı seviye sisteminin dinamik davranışı detaylı bir şekilde sunulmuştur. Daha sonra kaskad oransal integral gecikmeli kontrolörün matematiksel modeli ve analizi gerçekleştirilmiştir. Kaskad oransal integral gecikmeli kontrolörün gerçek zamanlı sıvı seviye tankı üzerine yapılan deneylerle de kontrolcü tasarımın doğruluğu pekiştirilmiştir. Böylelikle önerilen kontrol tasarımı yönteminin kullanımını ve bazı mevcut tasarım yöntemlerine göre üstünlüğü ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca bu çalışma ile kaskad oransal integral gecikmeli kontrolcü tasarımı performansı diğer klasik yöntemlere göre avantajlı olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Anahtar Kelimeler

Kaskad kontrol, Zaman Gecikmeli Sistemler, Zaman Gecikmeli Kontrol ,CPIR Kontrol , CNPIR Kontrol

Abstract

In this study, a new cascade control structure and controller design based on standard forms is proposed to improve the performance of cascade control. By adding a time delay to the cascade controller structure, a new control design, which can be called a cascade proportional integral delay controller, has been made for liquied level sytems. Firstly, the general properties of delay based systems are given and the dynamic behavior of the delayed liquid level system is presented in detail when experimental studies are carried out on it. Then, the mathematical model and analysis of the cascade proportional integral delay controller is carried out. The accuracy of the controller design has been reinforced by the experiments on the real-time liquid level tank of the cascade proportional integral delay controller. Thus, the use of the proposed control design method and its superiority over some existing design methods have been revealed. In addition, with this study, it has been revealed that the performance of cascade proportional integral delay controller design is advantageous compared to other classical methods.

Key Words

Cascade Control, Time Delayed Systems, Time Delayed Control, CPIR Control, CNPIR Control

Sorumlu Yazar: ahmetdumlu@erzurum.edu.tr

1. Giriş

Otomatik kontrol kuramında ölü zaman olarak da adlandırılan zaman gecikmesi; bir kontrol sistemine herhangi bir referans işareti verildiğinde bu işaretin etkilerinin, kontrol sisteminin çıkışında belirli bir süre farkla gözlemlenmesidir. Bu durum gerçek zamanlı birçok kontrol sistemi için beklenen ve kaçınılmaz somut bir olgudur. Bir kontrol sisteminde zaman gecikmesi sistemde kullanılan sensörlerden, sistemin kendi iç doğasından veya tasarlanan denetleyicinin karmaşık bir yapıya sahip olmasından kaynaklanabilmektedir. Bir kontrol mekanizmasında zaman gecikmesinin sistem üzerinde inkâr edilemez yani yok sayılamaz etkilere sahiptir. Bu etkilere iki farklı metodoloji ile yaklaşmak mümkündür; bu yaklaşımlardan ilki, zaman gecikmesinin kontrol mekanizmaları ve kontrol denetleyicisi üzerinde olumlu veya olumsuz farklı ne gibi tesirlerinin etki edebileceğine dair bazı sözlü çıkarımlar yapabilmektir. En önemli diğer bir bakış açısı ise, bir sistemde zaman gecikmesinin bulunması durumunda, kontrol mekanizmaları üzerindeki tesirlerinin matematiksel olarak gözlemlenmesi veya incelenmesidir. Bundan dolayı kontrol sistemleri üzerinde zaman gecikmesinin etkisini matematiksel olarak açıklayabilmek için literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Literatür araştırmalarında zaman gecikmesinin matematiksel analizinin ve matematiksel etkisi hakkında birçok farklı yöntemler geliştirilmiştir.

Yapılan literatür çalışmalarına göre, zaman gecikmesi bir kontrol sistemi algoritmasında bulunduğu takdirde; kapalı çevrimli kontrol sisteminin karakteristik denklemi bir polinom olarak değil de polinomsu (quasipolynomial) olarak ifade edilir. Polinomlar sonlu sayıda köke sahip iken, polinomsular sonsuz sayıda köke sahiptirler. Bu özellik iki karakteristik yapıyı ayıran en önemli özelliklerden biridir. Açıklanan bu sistem çeşidinde de sistemin davranışı, kapalı döngülü kutupların yerleriyle önemli ölçüde ilişkili olduğundan, sistemde zaman gecikmesinin oluşu, sistemin davranışını analiz etmeyi zorlaştırdığı ve sistemin tasarlanmasını güçleştirmiştir.

Literatürde zaman gecikmeli kontrol sistemlerinin kararlılığı tespit etmeyi sağlayan yöntemler arasında en yaygın olanları sırasıyla Hermite-Biehler teoremi, Nyquist teoremi ve Walton-Marshall Direct metodudur. Kararlılığı saptamaya yarayan bu yöntemler arasında Hermite-Biehler Teoreminin polinomsular için genelleştirilmiş versiyonudur (Roy&Iqbal, 2005). Temelinde Nyquist Teoremi bulunan litaratürde birçok çalışma vardır (Munro, 2001; Dan&Dale, 2002). Söz konusu Walton-Marshall Direct metodunun temelinde zaman gecikmesi bulunan kontrol sistemlerinin kararlılığını belirlemesi için iyi ve güçlü bir yöntem olduğu birçok çalışmalarla ispatlanmıştır. Bu yöntem Hermite-Biehler teoremi ve Nyquist teoremine kıyasla daha kullanışlı ve daha hızlıdır. Bununla birlikte bu metot sayesinde kararsız olan bir kontrol sisteminin sağ yarı s düzlemindeki kutup sayısının zaman gecikmesinin varlığıyla nasıl etki gösterdiği ve nasıl değişebileceği hakkında da önemli bilgiler elde edilebilmektedir (Nesimioğlu, 2016).

Zaman gecikmeli kontrol tasarımları üzerinde literatürde birçok araştırma yapılmıştır. Bu konu ile ilgili yapılan bir çalışmada zaman gecikmelerinin dengeleyici özelliklerinden faydalanarak frekans şekillendirme üzerine çalışmışlardır (Tallman&Smith, 1958). Bir diğer çalışmada ise zaman geciktirme etkisini kullanan yeni bir kontrolör tipi önerilmiştir (Suh&Bien, 1979). Bu kontrolcü yapısı uygun bir zaman gecikmesi ile donatılmış geleneksel P kontrolörünün ortalama bir türev eylemi gerçekleştirdiği ve dolayısıyla PD kontrolörünün yerini alabileceği, giriş değişikliklerine hızlı tepkiler gösterdiği, ancak yüksek frekanslı gürültüye karşı duyarsız olduğunu belirtmiştir. Salınım sistemlerinin stabilizasyonu için zaman gecikmesi kullanılan çalışmada pozitif, gecikmeli geri besleme ile salınım sistemini stabilize etmiştirler (Abdallah vd., 1993). Elde ettikleri kapalı döngü sisteminin (Nyquist kriteri kullanılarak) bir dizi gecikme için kararlı olduğunu göstermişlerdir. Literatürde zaman gecikmeli sistemler üzerinde yapılan bir çalışmada ise Niculescu, S. I., zaman gecikmesinin entegratör zincirleri de dahil olmak üzere lineer sistemlerin stabilizasyonu sağlamıştır (Niculescu&Michiels, 2004). Galip Ulusoy, yapmış olduğu çalışmasında, tek girişli tek çıkışlı doğrusal zamanla değişmeyen sistemler için zaman gecikmeli kontrol yapısı önermiştir (Galip, 2015). Bu kontrol yapısı kararlılık marjlarını iyileştiren ve duyarlılığı azaltmıştır. Başka bir çalışmada kaskad kontrol ağının bilhassa tahmin edilemeyen bozucuların varlığında kontrol mekanizmasının performansını artırdığı kanıtlanmıştır (Nalbantoğlu&Güler, 2017). Söz konusu çalışmada SSSC olarak adlandırılan Statik Senkron Seri Kompansatör içeren sonsuz baraya bağlı tek makineli güç sisteminde kaskad denetleyici algoritması kullanılarak kontrol sisteminin karalılığı iyileştirilmesi sağlanmışlar. Standart kontrol yöntemlerine göre kaskad kontrol yönteminin performansının daha iyi olduğunu ispatlanmıştır.

Zaman gecikmeli sistemlerden biri olan ikili tank sistemlerinin kontrolü için literatürde farklı çalışmalara rastlanmaktadır. Son zamanlarda yapılan çalışmalardan ilki özellikle bozucu etkilere karşı duyarlı olan uyarlanabilir tabanlı kontrol tekniğidir (Xu vd., 2020). Kontrolcü parametrelerinin uyarlanabilir özelliği sayesinde bu çalışmada belirlenemeyen sistem parametrelerine ve bozucu etkilere karşın iyi bir kontrol performansı elde edilebilmiştir. Bir diğer kontrol yöntemi ise kesir dereceli denetleyici tasarımıdır (Sundaravadivu vd., 2011). Yapılan bu sıvı seviye kontrol çalışmasında klasik PI kontrolcüsü yerine kesirli dereceden PI kontrolcü kullanılarak sistem performansı artırılmıştır. Literatürde yapılan diğer bir çalışmada ise geri adımlamalı denetleyici olup geliştirilen gözlemci etkisi ile sistemde meydana gelebilecek bozucu etkilerin önüne geçilebilmiştir (Gouta vd., 2015). Ayrıca söz konusu sisteme bulanık mantık tabanlı PI kontrolü (Liang, 2011), genetik algoritma tabanlı ayarlanabilir yapa sinir ağı kontrolü (Lian vd., 1998) gibi kontrol teknikleri uygulanarak sistem performansı test edilmiştir.

Bu çalışmasında ise zaman gecikmeli ikili tank sisteminin gerçek zamanlı kontrolü için kaskad oransal integral gecikmeli kontrolör şeklinde adlandırılabilecek bir kontrol tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu kontrolcü ilk defa Lo´pez tarafından tasarlanmış olup DC servo motorun pozisyon kontrolünde denenmiştir (Lo´pez vd., 2018). Önerilen denetleyici kademeli olarak bir iç döngü ve bir dış döngü yapısına sahiptir. Söz konusu iç döngü, geciktirilmiş bir algoritma yapısına sahip olup kontrol edilen DC servo motorun açısal hızını düzenleyebilirken, dış döngü ise oransal bir kontrolcü sayesinde söz konusu sistemin açısal konumunu ayarlayabilmektedir. İlave filtreler kullanılmadan DC servo motorun açısal hız ölçümlerini yapabilen bu kontrolcü sayesinde pozisyon değişimlerinde meydana

gelebilecek aşımlar azaltılabilmiş ve bozucu etkiye sahip farklı yükler altında iyi bir pozisyon kontrolü gerçekleştirilebilmiştir. Söz konusu kontrolcünün gürültülere karşı daha duyarlı olması ve özellikle referans değişimlerinde çok az bir aşım yaptırması nedeniyle bu çalışmada ilk defa zaman gecikmeli ikili tank sistemin gerçek zamanlı kontrolünde kaskad oransal integral gecikmeli kontrolcü denenmiştir. İki tank sisteminin yapısı gereği zaman gecikmeli olması ve özellikle bozcu etkilerden oldukça fazla etkilenmesi nedeniyle bu kontrolcünün performansı sistem üzerinde test edilmiş ve klasik PI kontrolcüsünde göre oldukça iyi bir performans sergilemiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde endüstri tesislerinde sıklıkla kullanılan zaman gecikmeli sıvı seviye sisteminin çalışma prensibi ve matematiksel modeli detaylı bir şekilde sunulmuştur. Daha sonra kaskad oransal integral gecikmeli kontrolörün matematiksel modeli ve analizi gerçekleştirilmiştir. Kaskad oransal integral gecikmeli kontrolörün gerçek zamanlı sıvı seviye tankı üzerine yapılan deneylerde kontrolcü tasarımın doğruluğu pekiştirilmiştir. Özellikle ileri beslemeli PI (FF-PID) kontrolcüye göre üstünlüğü grafiksel olarak sunulmuştur. Sisteme verilen harici gürültüler karşısında önerilen kontrolcü daha iyi bir performans gösterdiği kanıtlanmıştır.

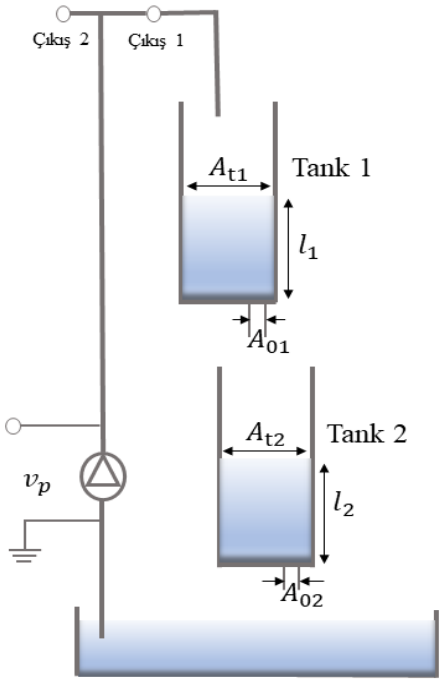
2. Materyal ve Yöntemler

Endüstri tesislerindeki akışkan seviye tank prosesinin tipik bir uygulaması olan sıvı seviye sistemi Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu sisteme ait tasarım parametreleri ise Tablo 1'de sunulmuştur. Sıvı seviye kontrol sisteminde amaç, akışkanın sistemden talep edilen seviyede sabit tutulmasıdır. İkili-Tank sisteminden L_1 ve l_2 olmak üzere iki adet akışkan seviyesi mevcut olmasından dolayı iki ayrı denetleyiciye ihtiyaç duyulmuştur. Tank 1'in kontrolü, pompa vasıtasıyla Tank 1 içerisine aktarılan akışkanın istenilen seviyede tutulması, Tank 2'nin kontrolü ise Tank 1 tarafından Tank 2'nin içerisine aktarılan akışkanın istenilen seviyede tutulması ile sağlanmıştır. Sistemlerin kontrol aşamalarından biri transfer fonksiyonun belirlenmesidir. İkili tank sistemi için Tank I'in kontrolünde giriş pompa gerilimi, çıkış ise tutulması gereken akışkan seviyesi olacak şekilde alınmıştır. Bu makalede Tank 1'nin transfer fonksiyonu giriş gerilimi ile akışkan seviyesinin oranıyla belirlenmiş olup ilk olarak seviye tank sisteminin modeli ortaya konulacak ve ardından kaskad oransal integral gecikmeli kontrolörün matematiksel modeli tanımlanacaktır.

Tablo 1. Sıvı Seviye Sistemine Ait Tasarım Parametreleri

Sembol	Parametre Açıklaması	Değerler
K_p	Pompa Akış Sabiti	3.3 cm^3/s/V
A_{01}	Tank 1 Çıkışının Kesit Alanı	0.1781 cm^2
A_{02}	Tank 2 Çıkışının Kesit Alanı	0.1781 cm^2
A_{t1}	Tank 1' in Kesit Alanı	15.5179 cm^2
A_{01}	Tank 1 Çıkışının Kesit Alanı	15.5179 cm^2

2.1. Sıvı Seviye Tank Sisteminin Doğrusal Olmayan Hareket Denklemi



Şekil 1. Tank-1 deneyi için bağlantı şeması

Sıvı seviye tank sisteminin matematiksel modelini Tank 1 kontrolcüsü için türetebilmek için pompanın Tank 1'i beslendiği ve Tank 2'nin hiç dikkate alınmadığı düşünülmüştür. Bu nedenle sistemin girişi V_P pompasının voltajıdır ve çıkışı ise Tank 1 yani L_1 'deki sıvı seviyesidir. Bu nedenle matematiksel eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial L_1}{\partial t} = f(L_1, V_P) \tag{1}$$

Tank 1 için hareket denklemi eşitliği türetilirken, hareket dengesi ilkesi Tank 1'deki su seviyesine uygulanabilir.

$$A_{t1}\frac{\partial L_1}{\partial t} = F_{i1} - F_{01} \tag{2}$$

Burada A_{t1} Tank 1'in içi kesit alanıdır. F_{i1} ve F_{01} sırasıyla içeri akış hızı ve dışarı akış hızıdır. Tank 1'e uygulanan akış hızının uygulan pompa voltajıyla doğru orantılı olduğu varsayılır;

$$F_{i1} = K_P V_P \tag{3}$$

Küçük delikler için Bernoulli denklemini uygulayarak, Tank 1'den dışarı akış hızı, V_{o1}, aşağıdaki ilişki ile ifade edilebilir:

$$V_{01} = \sqrt{2gL_1} \tag{4}$$

Tank 1 sistemi için bir lineer seviye kontrolörü tasarlamak ve uygulamak için açık döngü Laplace transfer fonksiyonu türetilmelidir. Ancak tanım gereği, böyle bir transfer fonksiyonu sadece sistemin dinamiklerini bir lineer diferansiyel denklemden temsil edebilir. Bu nedenle, Tank 1'in doğrusal olmayan hareket denklemi, hareketsiz bir çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılmalıdır. Tanım olarak, nominal bir çalışma noktasındaki (V_{p0}, L_{10}) statik denge, sabit pompa voltajı V_{p0} tarafından oluşturulan sabit bir su akışı nedeniyle Tank 1 seviyesinin sabit bir L_{10} konumunda olması ile karakterize edilir. Tank 1' deki su seviyesi durumunda, çalışma aralığı, istenen denge noktasından (V_{p0}, L_{10}) küçük çıkış yüksekliklerine, L_{11} ve küçük çıkış voltajlarına, V_{p1}'e karşılık gelir. Bu nedenle, L_1 ve V_p, aşağıda gösterildiği gibi iki miktarın toplamı olarak ifade edilebilir:

$$L_1 = L_{10} + L_{11} \tag{5}$$

$$V_p = V_{p0} + V_{p1} \tag{6}$$

Elde edilen doğrusallaştırılmış hareket denklemi, sistemin denge noktası (V_{p0}, L_{10}) ile ilgili küçük sapmalarının bir fonksiyonu olmalıdır. Bu nedenle, ortaya çıkan doğrusal hareket denklemi aşağıdaki formatta ifade edilmelidir:

$$\frac{\partial L_1}{\partial t} = f\left(L_1, V_p\right) \tag{7}$$

İki değişkene sahip olan herhangi bir fonksiyonun doğrusallaştırılmasında Taylor serisi yaklaşımından yararlanılmaktadır. Burada tanımlanan f fonksiyonu L_1 ve V_p ile tanımlanmış iki değişkene sahiptir. $\left(L_1, V_p\right) = \left(L_{10}, V_{p0}\right)$ noktasındaki küçük değişimler için birinci dereceden Taylor serisi yaklaşımıyla Denklem 8 ile ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial^2}{\partial L_1 \partial V_p} f\left(L_1, V_p\right) \cong f\left(L_{10}, V_{p0}\right) + \left(\frac{\partial}{\partial L_1} f\left(L_{10}, V_{p0}\right)\right) + \left(L_1 - L_{10}\right)\left(\frac{\partial}{\partial V_p} f\left(L_{10}, V_{p0}\right)\right)\left(V_p - V_{p0}\right) \tag{8}$$

Taylor serisi yaklaşımı ile elde edilen doğrusal hareket denkleminden, sistemin Laplace alanındaki açık döngü transfer fonksiyonu aşağıdaki ilişki ile tanımlanabilir:

$$G_1(s) = \frac{L_{11}(s)}{V_{p1}(s)} \tag{9}$$

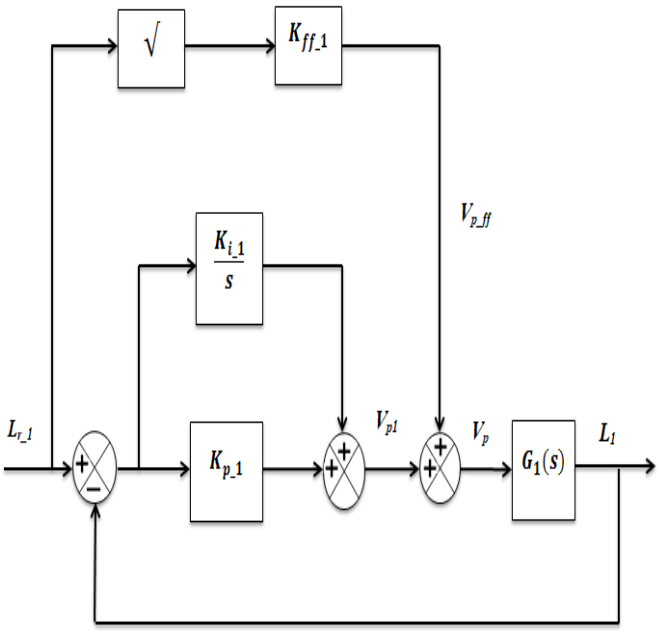
Sistem parametrelerine göre Tank 1 sistemi için istenen açık çevrim transfer fonksiyonu Denklem 10'daki gibi elde edilebilmektedir.

$$G_1(s) = \frac{K_{dc1}(s)}{\tau_1 s + 1} \tag{10}$$

Burada K_{dc1} açık döngü transfer fonksiyonu DC kazancıdır ve τ_1 zaman sabitidir.

2.2 İleri Beslemeli PI Kontrol Yöntemi

Bir kontrol pompa voltajı kullanılarak su seviyesinin veya yüksekliğini düzenlemek için farklı tipte kontrolcü tasarımları yapılabilmektedir. İlk olarak kontrol yapısı Şekil 2'de belirtilen ileri beslemeli oransal integral kontrolcüsüdür (PI-FF).



Şekil 2. Tank-1 deneyi için ileri beslemeli PI kontrol blok diyagramı

Sıfır kararlı durum hatası için, Tank 1 su seviyesi, şekilde gösterildiği gibi ileri besleme eyleminin eklenmesiyle pozitif oransal integral (PI) kapalı döngü şeması aracılığıyla kontrol edilir, voltaj ileri besleme kontrolcüsünün matematiksel eşitliği Denklem 11' de sunulmuştur.

$$V_{p_{ff}} = K_{ff_1}\sqrt{L_{r_1}} \tag{11}$$

$$V_p = V_{p1} + V_{p_{ff}} \tag{12}$$

İleri besleme eylemi, Tank 1 alt çıkış deliği yoluyla su çekilmesini (yerçekimine bağlı olarak) telafi ederken, PI kontrolörü dinamik bozucu etkileri (dynamic disturbances) telafi eder. Şekil 2' de belirtilen ileri beslemeli PI kontrolüne ait transfer fonksiyonu Denklem 13' deki gibi ifade edilebilmektedir.

$$G_1(s) = \frac{L_1(s)}{V_{p1}(s)} \tag{13}$$

Sıvı seviye Tank 1 deneyi ileri beslemeli PI kontrolör ile gerçekleştirildikten sonra sistem dinamiğinde göz önünde bulundurularak CNPIR kontrolör kullanılmıştır. Böylelikle yapılan gerçek zamanlı deneylerle her iki kontrol yapısı karşılaştırılmıştır.

2.3. CPIR Kontrol Yöntemi

Kapalı döngüye sahip CPIR kontrolörü Şekil 3'te gösterilmektedir. İntegral gecikmeli (Integral Retarded (IR)) kontrolörü, hız ölçümleriyle beslenen iç döngüye karşılık gelir. Ayarlanacak üç parametre, yani K_i ve K_{ir} kazançları ve h zaman gecikmesini içerir. Dış döngü ise K_p kazançlı oransal bir kontrolör aracılığıyla kapatılır ve konum ölçümleriyle beslenir. Zaman etkili CPIR kontrolörün matematiksel ifadesi Denklem 14 ile tanımlanmaktadır.

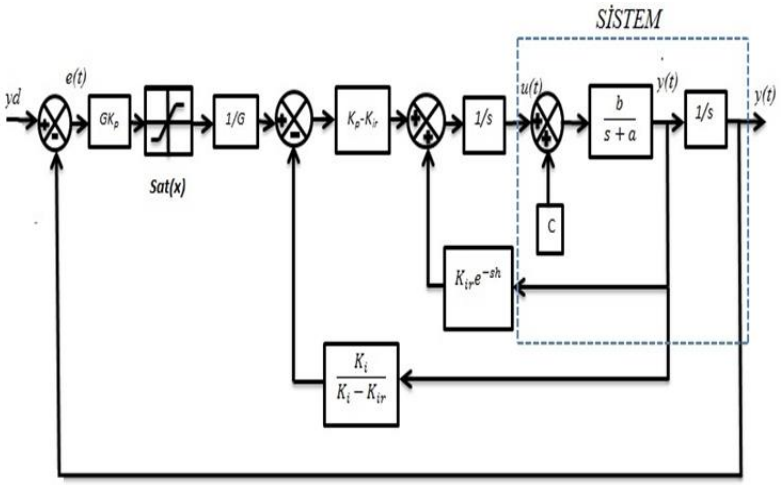
$$\dot{u}(t) = (K_i - K_{ir})K_P e(t) + K_{ir}\dot{y}(t-h) - K_i\dot{y}(t) \tag{14}$$

Burada $\dot{y}(t)$ çıkış parametresinin türevi bir başka değişle Tank 1 için sıvı seviyesini değişimini göstermektedir. Kapalı döngü sistemin karakteristik kuasipolinomu doğrudan Şekil 3 yardımıyla elde edilmiş ve Denklem 15'de sunulmuştur. Şekil 3'te görülen y_d referans girişi bir başka değişle Tank 1 için istenilen sıvı seviyesini, $y(t)$ ise çıkış büyüklüğünü yani Tank 1 için elde edilen sıvı seviyesini ifade etmektedir.

$$p(s) = s^3 + as^2 + bK_i s + bK_p(K_i + K_{ir}) - bK_{ir}se^{-sh} \tag{15}$$

Bununla birlikte iç hız döngüsü yarı polinomsu ifadesi ise Denklem 16 ile tanımlanabilmektedir.

$$v(s) = s^2 + as + bK_i \pm bK_{ir}se^{-sh} \tag{16}$$



Şekil 3. CPIR kontrolcü blok diyagramı

Bu durumda CNPIR kontrol yasası en genel haliyle Denklem 17 ile tanımlanabilmektedir.

$$\dot{u}(t) = [(K_i - K_{ir})/G]SAT(GK_P e(t)) + K_{ir}\dot{y}(t-h) - K_i\dot{y}(t) \tag{17}$$

Şekil 3'te gösterilen ve Denklem 17'de belirtilen doygunluk fonksiyonu ise Denklem 18 ile ifade edilmektedir.

$$SAT(x) = \{x,\ |x| \leq 1 - 1,\ x < -1\ 1,\ x > 1 \tag{18}$$

Denklem 17'de verilen G küçültme faktörüdür. Konum hatası $e(t)$ yeterince küçükse $x = GK_P e(t)$ doygunluk sınırlarına ulaşamaz ve dış döngü ile iç döngü birlikte çalışır. Böylece G ve $1/G$ birbirini yok eder. Konumlandırma görevi büyük bir konum hatası oluşturduğunda $SAT(x) = 1$ ya da $SAT(x) = -1$ olmaktadır. Bu durumda dış döngü kesilir ve yalnızca iç hız döngü çalışır. Sistem sabit bir hıza ulaşır. Konum hatası daha sonra küçüldüğünde, doyma bloğu doğrusal bölgesinde çalışır ve iki döngü birlikte faaliyete geçer.

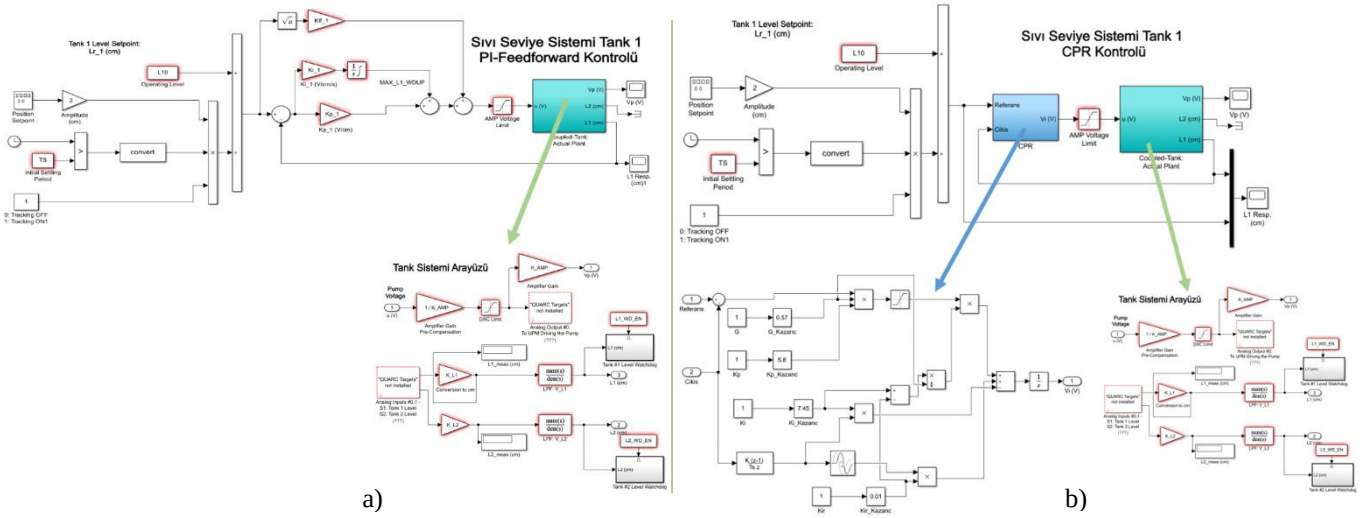
3. Bulgular

Bu çalışmada kullanılan deney sistemi Şekil 4'te gösterilmiştir. Söz konusu sistem Quanser firması tarafından üretilmiş olup Matlab Simulink ile çalışabilmektedir. Sistem için gerekli olan veriler Quanser Q2 veri iletişim kartı kullanılarak alınmaktadır.

Sıvı seviye gerçek zamanlı konum kontrol deneyleri için FF-PI ve CPR kontrol denetleyicileri Şekil 5'te gösterilen Matlab-Simulink programından yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te görülebileceği üzere öncelikle her iki kontrolcü tasarımı için referans konum değişimleri tanımlanmıştır. Bu referans konum değişimleri Tank 1'de bulunan sıvı seviyesiyle farkı alınarak öncelikle hata değişimleri elde edilmiştir. Bu hata değişimleri her iki kontrolcüye girdi olarak verilmiştir. Kontrolcülerin hata değimlerine bağlı olarak tanımlanan matematiksel eşitliklere bağlı olarak sistem için pompa kontrol işaretleri tanımlanabilmiştir. Bu kontrolcü işaretleri doğrudan sisteme pompa vasıtasıyla uygulanarak sıvı seviye değişimleri incelenebilmiştir.



Şekil 1. Deneylerin gerçekleştirildiği Quanser sıvı seviye sistemi



a) b)

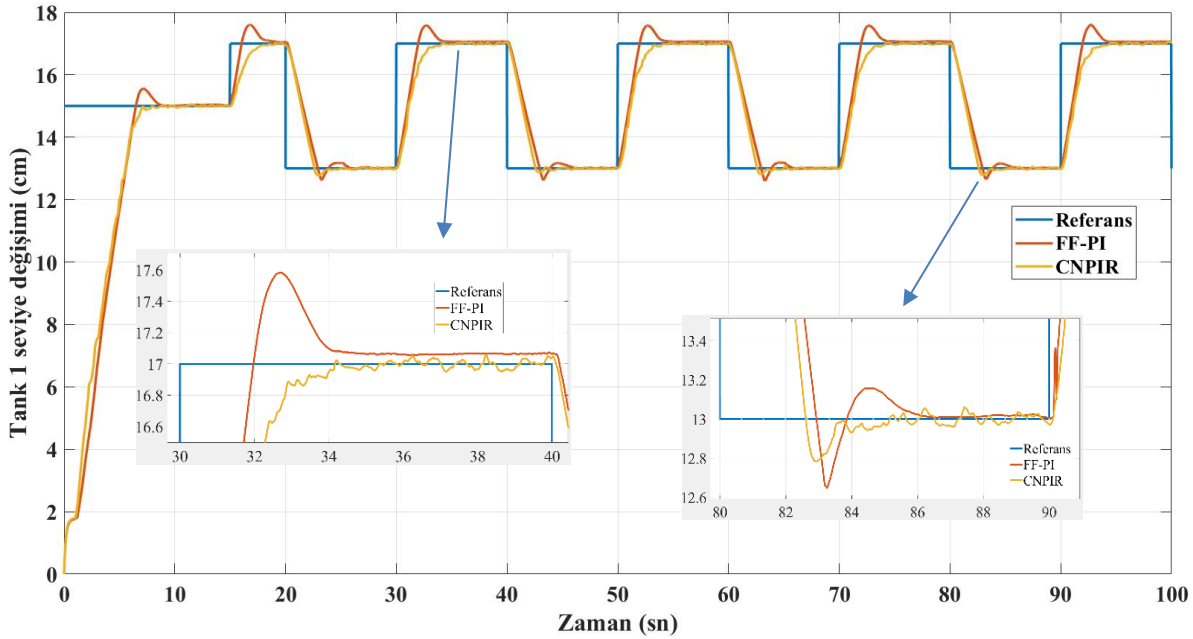
Şekil 2. a) FF-PI ve **b)** CPR kontrol yöntemlerinin test edilmesi için oluşturulan benzetim ortamı

Sistem dinamiği göz önünde bulundurularak her iki denetleyici için en iyi parametre değerleri sisteme verildiğinde CNPIR kontrol yönteminin FF PI denetleyicisi kontrol performansları Şekil 6'da gösterildiği gibi elde edilmiştir.

Yapılan deneylerde denetleyicileri için belirlenen en iyi kontrolcü parametreleri Tablo 2'de sunulmuştur. Söz konusu en iyi duyarlılığa sahip parametreleri elde edebilmek için öncelikle simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarında deneme yanılma yöntemi kullanılarak uygun parametre aralıkları tanımlanmıştır. Gerçek zamanlı deneylerde bu parametrelere küçük değişimler tanımlanarak optimum kontrolcü kazanç değerleri elde edilmiştir.

Tablo 2. En iyi sıvı seviye Tank 1 konum kontrol parametreleri

FF PI parametreleri					
K_{p_1} = 7.2152		K_{i_1} = 9.1061			K_{ff_1} = 2.391
CNPIR kontrol parametreleri					
Kare dalga	G= 0.442	h=0.002	K_p= 0.88	K_i= 26	K_{ir}= 0.01
Sinüs dalga	G=0.57	h=0.002	K_p=5.8	K_i=7.45	K_{ir}=0.01



Şekil 3. Tank-1 seviye değişimleri ve kontrolcü performansları

Önerilen CNPIR denetleyicisinin FF-PI kontrolüne göre etkinliğini göstermek için Denklem 19' da formülü ifade edilen integral kare hatası (ISE) değerleri hesaplanmıştır. Bu makalede h gecikme parametresinin değişimine, bozucu etki verilmesine, bozucu etkinin uygulanma süresine göre sistemin kontrol edilebilme becerisi integral kare hatasına göre karşılaştırılmıştır.

$$ISE = \int_0^t e(t)^2 \, dt \tag{19}$$

Tablo 3. Kontrol denetleyicisine göre ISE hata değeri

Hata Değeri	FF-PI	CNPIR
ISE	630	552.9

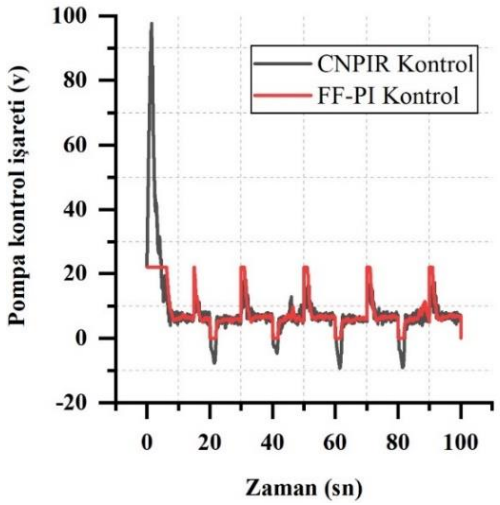
Sisteme bozucu etki verilmeden kontrol denetleyicilerine kıyasla Şekil 6'da elde edilen grafiğin ISE hata değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Görüldüğü üzere önerilen CNPIR kontrol tekniğinde daha düşük bir ISE hata değeri elde edilmiştir.

CNPIR kontrol denetleyicisi ile tasarlanan sisteminin h gecikme parametresinin değişimine göre elde edilen ISE hata değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Elde edilen veriler neticesinde ISE hata değeri, h gecikme parametresinin 200 mili saniye ve sonrasında daha fazla olduğu görülmektedir. Hata değerinin artması sistemin cevap zamanıyla ilgili olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 4. CNPIR h parametresi değişimine göre ISE hata

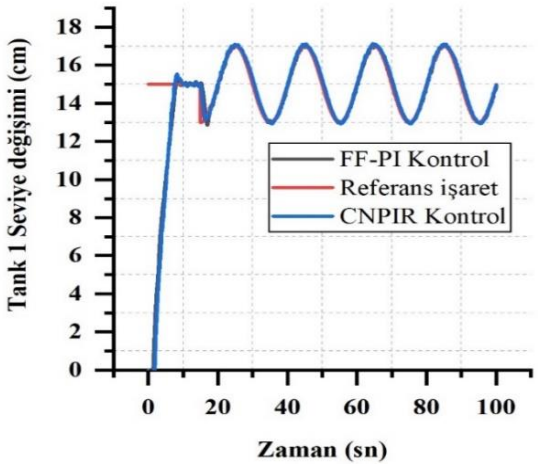
Denetleyici	h değeri	ISE
CNPIR	2 ms	552.9
CNPIR	10 ms	552.5
CNPIR	90 ms	552.7
CNPIR	100 ms	557.2
CNPIR	200 ms	577.4
CNPIR	300 ms	596.7
CNPIR	1 s	694.1

CNPIR kontrol yönteminin FF PI denetleyicisine göre daha iyi performans gösterebileceğini ispatlayabilmek amacıyla tasarlanan sıvı seviye konum kontrol deneyi ile karşılaştırılmış olup CNPIR denetleyicisinin aşım yapmadan referansı takip edebildiği ve kalıcı hal hata performansın FF PI denetleyicisine göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. CNPIR denetleyicisi ile FF PI denetleyici işaretleri Şekil 7'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.

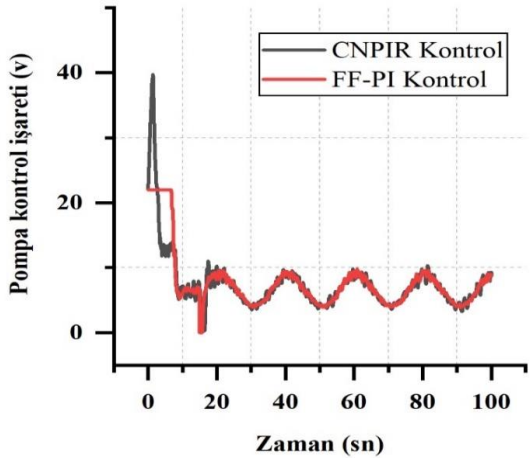


Şekil 7. Tank 1 seviye kontrol işaretleri

Tank 1 seviye kontrol deneyinde CNPIR denetleyicisinin FF PI denetleyicisine göre performansının daha iyi olduğunu pekiştirmek için sisteme sinüzoidal bir işaret verildiğinde elde edilen Tank 1 seviye değişimi ve kontrol performansları Şekil 8'deki gibi elde edilmiştir.



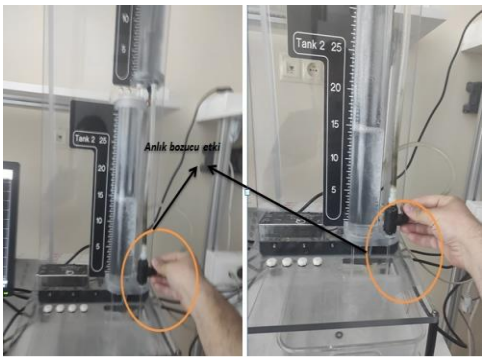
Şekil 8. Tank 1 seviye değişimleri ve kontrolcü performansları



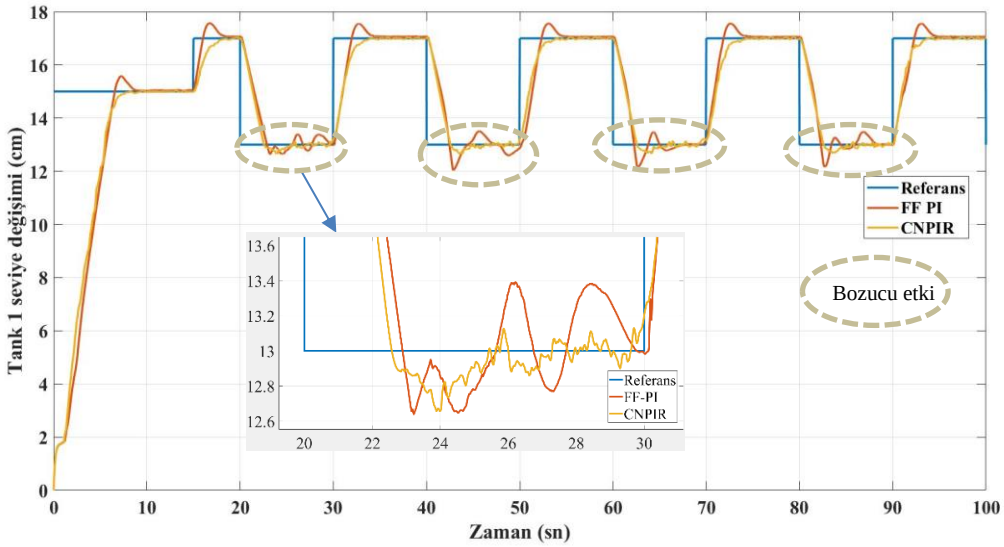
Şekil 9. Tank-1 seviye kontrol işaretleri

Kontrolcülerin performanslarına göre Tank 1 sıvı seviye sisteminde kontrolcü işaret değişimleri Şekil 9'da gösterildiği gibi elde edilmiştir.

CNPIR denetleyicisi ve FF PI denetleyicinin anlık bozucu etkilere karşı performansını değerlendirmek amacıyla Şekil 10'da gösterildiği gibi deney düzeneğinde farklı sürelerde ve aralıklarda anlık bozucu etki verilmiştir. Bozucu etki Şekil 11 ve Şekil 12'de gösterilen aralıklarda uygulanmıştır. Söz konusu bozucu etkilerin verilebilmesi için Şekil 10' da gösterildiği gibi Tank 1'in alt tabanında bulunan harici çıkış musluğu kullanılmıştır. Bu musluk Şekil 11'de gösterilen her bir aralıkta 10 saniye boyunca tam açık pozisyona getirilerek Tank 1'deki sıvı seviyesi aniden azaltılmıştır. Ani değişen bozucu etkinin genliği ve büyüklüğü doğrudan ölçülemediğinden bu durum sistem tarafından belirlenemeyen bir bozucu etki haline gelmiştir.



Şekil 10. Tank-1 sıvı seviye kontrolü anlık bozucu etki verilmesi

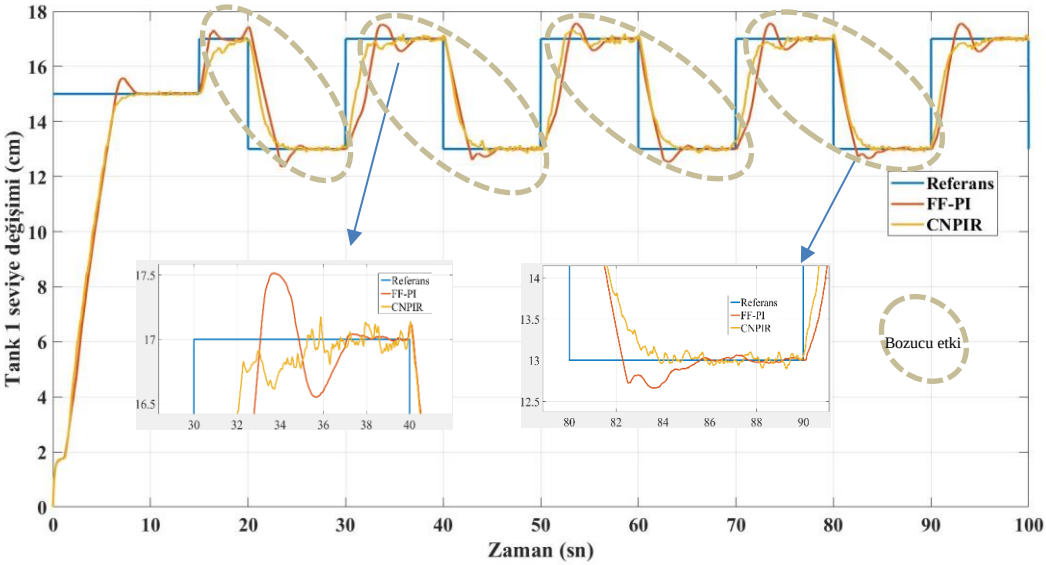


Şekil 4. Tank 1 bozucu etki seviye değişimleri ve kontrolcü performansları

Şekil 11'de gösterildiği gibi uygulanan bozucu etkiye Tank 1 kontrol sisteminin tepkisi, kontrol denetleyicilerinden elde edilen ISE hata değerine göre Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Bozucu etki durumunda ISE hata değeri

Hata Değeri	FF-PI	CNPIR
ISE	638.3	579.3

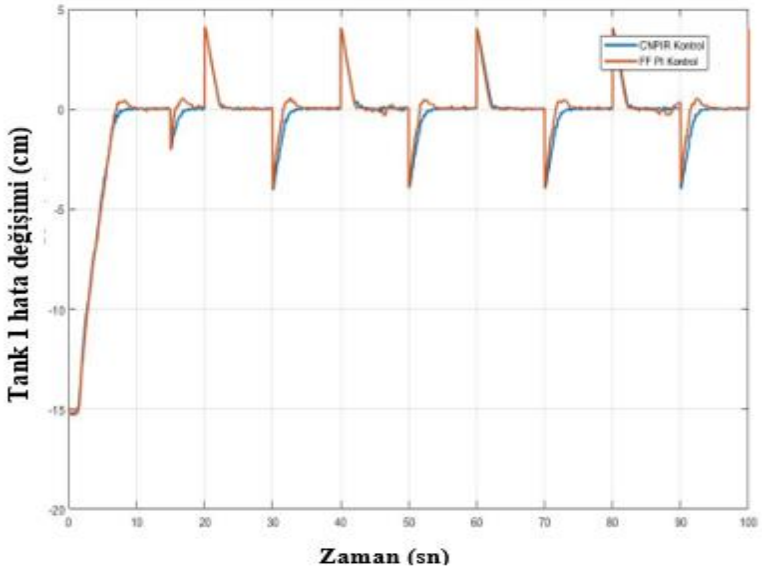


Şekil 5. Tank 1 bozucu etki artırılma neticesinde kontrol sisteminin tepkisi

Şekil 12'de gösterilen her bir aralıkta 18 saniye olacak şekilde bozucu etki uygulanmıştır. Uygulanan bozucu etkinin FF-PI ve CNPIR denetleyicilerine göre kontrol sistemine etkisi açısından ISE hata değeri karşılığı Tablo 6'da verilmiştir.

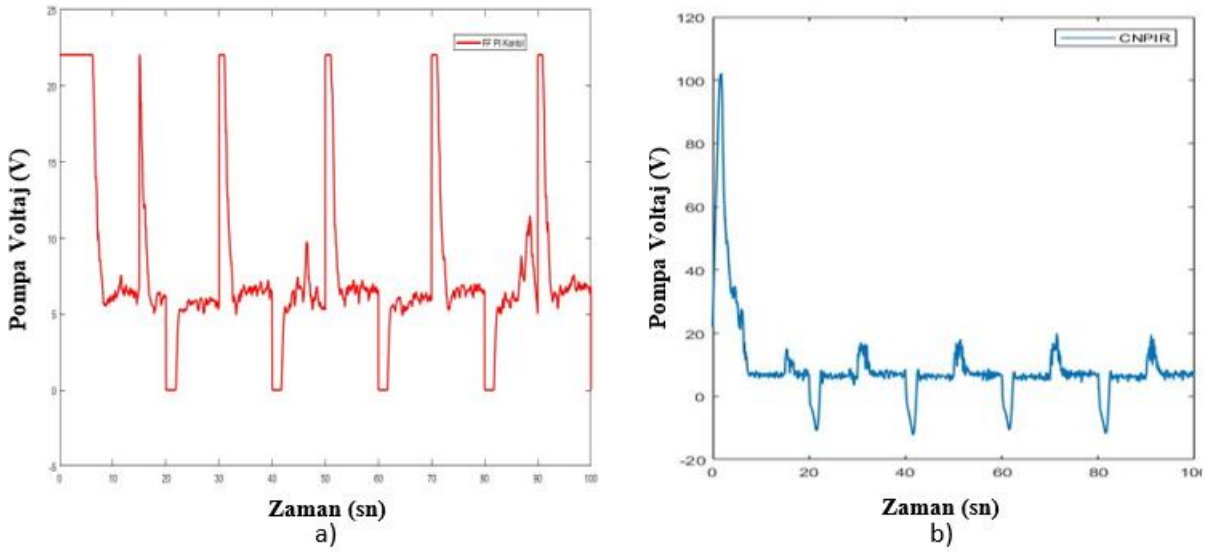
Tablo 6. Bozucu etki süresi ve aralığı artırılma durumunda ISE hata değeri

Hata Değeri	FF-PI	CNPIR
ISE	658.7	598.5



Şekil 6. Tank 1 seviye kontrolünde meydana gelen hata değişimleri

Farklı sürelerde ve aralıkta uygulanan bozucu etkiye karşı CNPIR denetleyicinin FF PI kontrol denetleyicisine göre daha iyi performans gösterdiği açıktır. Bozucu etkiye karşı CNPIR denetleyici daha az salınım yaptığı ve sisteme daha hızlı tepki verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca aşım yapmadan referans işaretini takip etmesi FF PI denetleyiciye göre iyi bir performans gösterdiğinin kanıtıdır. Şekil 11'de görülebileceği üzere her bir aralıkta 10 saniye süren bozucu etkide CNPIR kontrolcüsü hatayı ez aza indirgeyerek zaman geçirmeden sıvı seviyesini referans değere yaklaştırmak için kontrol işareti üretmiş ve sistemin referans değerde kalması için zorlamıştır. Bozucu etkinin uygulanma süresi ve aralığı Şekil 12'de gösterilen artırılma durumunda CNPIR kontrol denetleyicisi bozucu etkiye FF-PI denetleyicisine kıyasla daha iyi tepki verebildiği sonucuna varılmıştır. Kontrolcülerin bozucu etkiye karşı seviye hata değişimleri ve sıvı seviye kontrolcü işaret değişimleri ise sırasıyla Şekil 13 ve Şekil 14'te gösterilmiştir. Elde edilen grafikler ve ISE hata değerleri incelendiğinde önerilen CNPIR kontrol tekniğinin FF-PI denetleyicisine göre sıvı seviye Tank 1 sistemini daha iyi kontrol edilebildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 7. a) FF PI Kontrol; **b)** CNPIR kontrol Tank-1 bozucu etki seviye kontrol işareti

4. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada sıvı seviye sisteminin dinamik analizleri yapılmış olup, sistemin konum kontrol performansını arttırmak amacıyla farklı kontrol metotlarından faydalanılmaya çalışılmıştır. Sıvı seviye sistemi için öncelikle FF PI denetleyicisi test edilmiş olup daha sonra kontrol sistemi için dinamik modellemesi tam anlamıyla göz önünde bulundurulmuş ve temelinde gecikme olan CNPIR kontrol tekniği kullanılmıştır. Yapılan gerçek zamanlı testlerin sonuçlarına göre, klasik PI kontrolcüsü uygulanabilirlik açısından basit olsa da kontrol başarımı açısından nispeten etkisiz kalmıştır. Ancak kontrol sistemine yönelik uygun bir dinamik modelin tespiti ve özellikle bu modelin CNPIR kontrol tekniğinin kullanılması halinde, bilhassa sistemin konum kontrol performansının güçlendirdiği

anlaşılmıştır. CNPIR denetleyicinin doğruluğunu ve performans açısından Klasik PI denetleyicisine göre üstün olduğunu pekiştirmek amacıyla dinamik modellide dikkate alınan sıvı seviye kontrol deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu deneylerle CNPIR denetleyicisinin doğruluğu ve üstünlüğü ispatlanmıştır.

Referanslar

Abdallah, C., Dorato, P., Benites-Read, J., & Byrne, R. (1993, June). Delayed positive feedback can stabilize oscillatory systems. In 1993 American Control Conference (pp. 3106-3107). IEEE.

Dan, C. and Dale E. S., (2002). Robust Nyquist array analysis based on uncertainty descriptions from system identification, Automatica, 38(3), 467-475.

Galip Ulsoy, A. (2015). Time-delayed control of SISO systems for improved stability margins. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 137(4).

Gouta, H., Said, S.H., Barhoumi, N. & Sahli, F.M. (2015). Observer-based back-stepping controller for a state-coupled two-tank system. IETE Journal of Research, 61(3), 259-268.

Lian, S.T., Marzuki, K. & Rubiyah, Y. (1998) Tuning of a neuro-fuzzy controller by genetic algorithms with an application to a coupled-tank liquid-level control system. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 11(4), 517-529.

Liang, L. (2011). The application of fuzzy PID controller in coupled-tank liquid-level control system. Proc. of 2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC), 2894-2897.

López, K., Garrido, R., & Mondié, S. (2018). Cascade proportional integral retarded control of servodrives. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 232(6) 662-671.

N. Munro, "The systematic design of PID controllers using Nyquist stabiliy," 2001 European Control Conference (ECC), 2001, pp. 528-533.

Nalbantoğlu, M., & Güler, Y. (2017). SSSC tabanlı kaskad kontrolör ile güç sistem kararlılığının iyileştirilmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 8(1), 89-100.

Nesimioğlu, B. S. (2016). Düşük Mertebeden Zaman Gecikmeli Sistemlerin Oransal Kontrolörler İle Kararlı Kılınması (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Niculescu, S. I., & Michiels, W. (2004). Stabilizing a chain of integrators using multiple delays. IEEE Transactions on Automatic Control, 49(5), 802-807.

Roy, A. and Iqbal, K., (2005). PID controller tuning for the first-order-plus-dead-time process model via Hermite-Biehler theorem. ISA Transactions, 44(3), 363-378.

Suh, I., & Bien, Z. (1979). Proportional minus delay controller. IEEE Transactions on Automatic Control, 24(2), 370-372.

Sundaravadivu, K., Jeyakumar, V. & Saravanan, K. (2011). Design of Fractional Order PI controller for liquid level control of spherical tank modeled as Fractional Order System. Proc. of 2011 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, 522-525.

Tallman, G. & Smith, J. (1958). Analog study of dead-beat posicast control. IRE T Autom Control, 4(1) 14-21.

Xu, T., Yu, J., & Meng, X. (2020). Adaptive disturbance attenuation control of two tank liquid level system with uncertain parameters based on Port-Controlled Hamiltonian. IEEE Access, (8), 47384-47392.

MÜHENDİSLİK MİMARLIK FAKÜLTESİ

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

UMAGD, (2023) 15(2), 547-557.

10.29137/umagd.1235442

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Radyal Akılı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlarda Vuruntu Momentinin Azaltılması

Reduction of Cogging Torque in Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Motors

Kadir Yılmaz[1], Taner Dindar [2]

[1]Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 41380 İzmit/Kocaeli, TÜRKİYE
[2]Ankara Üniversitesi Nallıhan Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Otomasyon Bölümü, 06920 Ankara,, TÜRKİYE

***Başvuru/Received**: 15/01/2023* ***Kabul / Accepted**: 13/04/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 06/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: xx/xx/xxxx*

Öz

Sabit mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) özellikleri bakımından incelendiğinde diğer motorlara göre avantajlı yanlarının olduğu bilinmektedir. Sabit mıknatıslı senkron motorun rotorunda bulunan yüksek güç yoğunluğundaki mıknatıslar, bu motoru diğer fırçasız motorlara göre daha kullanışlı hale getirmektedir. Sabit mıknatıslı senkron motorlar son zamanlarda hafif elektrikli araç sistemlerinde tahrik edici olarak da kullanılmaktadır. Ancak, bu motorlar karakteristik yapısından dolayı oluşan ve motorun çıkış momentini olumsuz etkileyen vuruntu momentine sahip oldukları da bilinmektedir. Radyal akılı sürekli sabit mıknatıslı motorlarda (RASM) vuruntu momentindeki bu olumsuz durumların azaltılması için bazı yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, vuruntu momentini azaltmaya yönelik stator ve rotor tarafında kullanılabilecek yöntemler üzerinde durulmuştur. Referans bir motorun Ansoft Maxwell yazılımında 2 boyutlu modelinin sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile analizleri yapılarak, stator ve rotor tarafındaki değişikliklerin vuruntu momentine etkileri karşılaştırılmıştır. Stator tarafında oluk açıklığının azaltılması ile vuruntu momentinde %36,84, rotor tarafında mıknatıs kalınlığının azaltılması ile %42,1 lik bir azalma görülmüştür. Bununla birlikte ortalama momentte düşüş olduğu da görülmüştür. Sayısal analiz sonuçları ile vuruntu momentinin azaltıldığı ve en iyi iyileştirme sonucunda hedeflenen tasarım kriterlerini sağlayan tasarım elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

"Sabit mıknatıslı senkron motorlar, Radyal akılı sabit mıknatıslı motor, Sonlu elemanlar yöntemi, Vuruntu momenti"

Abstract

Permanent magnet synchronous motors (SMSM) are known to have some advantages compared to other motors. The high power density sections in the Permanent magnet synchronous chamber rotor make this motor more useful than other non-split motors. Permanent magnet synchronous motors have also been used recently as a light electric vehicle starter. However, it is also known that they have cogging torque that occur due to the structure of these engine structures and negatively affect the exit moment. Some purposes are used in order to reduce these negative situations in the cogging torque in radial permanent synchronous motors (RASM). To eliminate this effect, the use of stator and rotor interfaces for using the cogging torque is emphasized. The effects of the 2D model on the fly cogging torque on the stator and rotor sides, which were analyzed with the finite element method (FEM) in a reference frame Ansoft Maxwell software, were compared. By reducing the slot opening of the stator tips, it provides a reduction of 36.84% in the cogging torque and a reduction of 42.1% with the height of the layers of the rotor edges. However, there was also an average instantaneous decrease. With the numerical analysis results, the design in which the cogging torque is reduced and the best editing result meets the targeted design criteria has been obtained.

Key Words

"Permanent magnet synchronous motors, Radial flux permanent magnet motor, Finite element method, Cogging torque"

***Sorumlu Yazar: kayel@kocaeli.edu.tr**

1. Giriş

Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM) günümüzde evimizde bulunan küçük ev aletlerinden endüstriyel alana kadar sıklıkla karşılaşılan ve elektrik motorları arasında en yüksek güç yoğunluğuna sahip motorlardır. Senkron motorların rotorunda bulunan mıknatısların yapısı gereği küçüktür, böylelikle bakım maliyetleri de azalmaktadır. Bu motorların avantajlarından bazıları şunlardır; Yüksek momentli, dinamik kontrol gerektiren uygulamalarda kullanılması, çıkış momentine bakıldığında dalgalanmaların daha az olmasıdır. Bu avantajlar yüksek performanslı hareket kontrol uygulamalarında önemli bir gerekliliktir (Adam, 2007).

Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM) motorlarda moment dalgalanmaları bulunmaktadır, vuruntu momenti, sinyal genişlik modülasyonundaki (PWM) akım harmonikleri, ideal olmayan zıt elektro motor kuvveti dalga şekilleri, faz komütasyonu ve DC baradaki dalgalanmalar bunlardan bazılarıdır. Düşük hızlarda moment dalgalanmaları istenmeyen durumdur, boyutlarda hız değişimlerine, titreşime ve akustik gürültü gibi durumlara neden olmaktadır. Yüksek hızlarda moment dalgalanmaları düşük hızlardaki dalgalanmaları nazaran istenmeyen durumlar meydana getirmez, nedeni olarak sistemin eylemsizliği sayesinde süzülebilmesidir (Aydın, 2003).

Radyal akılı sabit mıknatıslı motorlarda (RASM) vuruntu momentinin çıkış momenti üzerinde büyük bir etkisi olduğundan, bu çalışmada vuruntu momentinin azaltılması üzerinde durulmuştur. RASM motorlarda vuruntu momentini azaltabilmek için birden fazla yöntem bulunmaktadır. Makine ve kontrol tabanlı olarak iki kısma ayrılmaktadır. Bunların arasında başlıca azaltma yöntemi olarak olup/kutup oranı, stator oluk açıklığı, stator dişlerine eğim verilmesi, mıknatısların kalınlığı, dişlerin kullanılması, kesirli sargıların kullanılması ve mıknatıs kutbunun optimizasyonun yapılmasıdır (Dai, 2011; Zhu, 2018).

Makinelerde stator ve rotor mıknatısları olarak iki kısımda incelenir. Yapılan çalışmalarda rotor tarafında değişiklikler yapılarak beş farklı PM makinesinin yapısı incelenmiştir. Yarım adımlı sargılı motorun vuruntu momentinin düşük olduğu görülmüştür fakat ortalama tork azalmıştır(Güemes, 2011). Stator yuvaları üzerinde üç farklı geometrik kısımlar eklenmiş ve optimizasyon yapılmıştır. Yapılan sonlu elemanlar çalışmalarında vuruntu torkunun düşürülmesi sağlanmıştır(Herlina, 2017). Sabit mıknatıslı motorlarda vuruntu momentinin optimizasyonu sonlu elemanlar kullanılarak ve Taquchi yöntemi ile %89 azaltıldığı görülmektedir(Tseng, 2016).

RASM motorlarda uygulanan tekniklerin bir kısmı direk olarak eksenel akılı sürekli mıknatıslı motorlara (EASM) uygulanabilirliği den, Metin Aydın'ın 2003 ve 2008'de yaptığı çalışmalarda EASM motorlarda vuruntu momentini azaltılması için RASM motorlarda uygulanan yöntemler ve yeni yöntemler üzerinden çalışmalar yapmıştır. Analizlerinden aldığı sonuçlar doğrultusunda vuruntu momentinden azalmalar sağlamıştır(Aydın, 2003; Aydın, 2008). Rüzgar türbinleri için sürekli mıknatıslı generatör tasarım çalışmasında tasarım aşamasında vuruntu momentini arttıran tasarım hatalarına çalışmasında yer vermiştir (Kütük, 2011). Emrah Çetin 2017'de yaptıkları çalışmada EASM oluk yapısındaki bozukluklarının momenti üzerindeki etkileri gözlemlemiştir (Çetin ve diğ., 2017). Yine Emrah Çetin'in 2018 yılında EASM motorlarda vuruntu momenti azaltmak için yaptıkları çalışmalarda motorun farklı mıknatıs adımı ve rotor mıknatıslarına kaykı uygulayarak vuruntu momentinde azalmalar sağlamıştırlar (Çetin ve diğ., 2018). Eksenel akılı generatör tasarımı çalışmasında rotor mıknatıslarına eğim vererek vuruntu momentinin optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır (Can, 2017; Ayçiçek, 2012). Elektrikli araçlar için yapılan çalışmalarda yapılan parametrik analizlerle vuruntu momentini azaltarak motorun moment titreşimi ve ısıl analizleri yapılmıştır (Yılmaz, 2020; Meşe, 2013). 2,5 kW 14 kutuplu, 84 oluklu sabit mıknatıslı senkron motorun analitik tasarımı, analizi ve optimizasyonu yapılmıştır. Çalışmada verim, vuruntu torku ve manyetik akı 3D olarak incelenmiştir(Dalcalı, 2020). Radyal akılı PMSM'ler de dahil olmak üzere kalıcı mıknatıslı makinelerde vuruntu torkunu azaltmak için önerilen tekniklere kapsamlı bir genel bakış sağlanmıştır. Eksenel akılı kalıcı mıknatıslı makinalarda yapılan çalışmada, Ansoft Maxwell'de Sonlu Eleman Analizi (FEA) ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre referans modelin vuruntu torkunun makine torkunun %6,53'ü olduğu görülmüştür. İkinci olarak, vuruntu torkunu düşürmek için daha iyi stator ve rotor yüksekliği bulmak için parametrik bir analiz gerçekleştirilmiş olup, AFPMM'nin tasarım parametreleri, MATLAB'de sabit çıkış torku altında minimum vuruntu torku için yapay zeka yöntemleriyle tahmin edilmiştir. Son olarak, tüm yöntemler karşılaştırılır ve tartışılır(Saygın ve diğ., 2017). Eksenel akılı sabit mıknatıslı makinalarda (AFPM) vuruntu torkunu incelemek için alternatif tekniklerin var olduğunu gösterilmiştir. Bunun nedeni sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapılırken zaman açısından sıkıntı yaşanmasıdır (Tiegna ve diğ., 2014). Bu çalışmada, AFPM motorlarındaki vuruntu bileşeninin mıknatıs asimetrisi kullanılarak pratik olarak ortadan kaldırılabileceği ve tamsayı slot/kutup/faz motorları için iyi derecede sinüzoidal ters EMF elde edilebileceği gösterilmiştir(Güleç ve diğ., 2014). Bu çalışmada bir model tasarlanmıştır, statik eksantrikliklerden kaynaklanan benzer olmayan hava aralığı geçirgenliğinin akım harmonikleri ve tork üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Statik eksantriklik varlığında iki vuruntu torku minimizasyon tekniğinin incelenmiş bir karşılaştırma yapılmıştır. Statik eksantriklik, tek taraflı topolojide harmoniklerde önemli artışlara neden olmuştur(Ogidi ve diğ., 2017). Bu çalışmada, vuruntu torku üç parametre üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu analize dayanarak, eksenel akılı sabit mıknatıslı (AFPM) makinelerin vuruntu torkunu en aza indirmek için iki teknik önerilmiş ve tartışılmıştır, bir prototip oluşturulmuştur, sonlu eleman analizi sonuçlarını doğrulamak için deney yapılmıştır (Xiao ve diğ., 2017).

Bu çalışmada RASM motorlarda üretim ve maliyet açısından ergonomik teknikler araştırılıp, incelenmiştir. Ansoft maxwell elektromanyetik analiz programında referans bir motorun 2 boyutlu modeli oluşturularak Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile referans motor üzerinde amaca uygun vuruntu momentini azaltıcı tekniklerin analizi yapılmıştır. Stator ve rotor tarafındaki değişiklerin vuruntu momentine etkisi, ortalama momente etkileri araştırılmıştır. Deney aşamasına geçilmeden önce en verimli optimizasyon seçilmesi için çalışmalar yapılmıştır.

2. Vuruntu Momentinin Kaynağı ve Hesaplanması

Sabit mıknatıslı senkron motorlarda vuruntu momenti önemli olduğu bilinmektedir, ortalama moment üzerinde olumsuz etkisi olan bir bileşendir, vuruntu momenti rotordaki mıknatısların hareketinden kaynaklanmaktadır ve manyetik alandaki değişim nedeniyle görülmektedir.
Vuruntu momenti Fourier serisi olarak tanımlanabilir, analitik veya sonlu elemanlar yöntemi ile çözümlenmektedir. Tork dönme kuvvetinin bir ölçüsüdür, motor tarafından üretilen tork tespit edilmesi önemlidir. Mekanik bir sistemde enerjiyi yapılan iş olarak gösterebiliriz. Mekaniksel enerjinin differansiyel miktarı şu şekilde yazılabilir (Adam, 2007).;

$$dWm = Fdx \quad (1)$$

Burada dWm mekanik enerji, F kuvvet ve dx ise x yönündeki diferansiyel uzaklıktır. Güç, birim zamanda yapılan iş miktarıdır. Mekanik enerjiyi de yazabiliriz;

$$Pm = \mathrm{Fv} = dWm / dt = F\,(dx / dt) \quad (2)$$

Formülde v hareket hızını göstermektedir. Fakat dönme hızının bilgisinin yanında tork daha önemlidir. Mekaniksel güç hesaplamak gerekir aşağıda verilen formülle bulunur.

$$Pm = Tw = \ / dt = T\,(d\theta / dt) \quad (3)$$

Sabit mıknatıslı makinalarda rotor yüzeyine yerleştirilen mıknatıslar ve stator arasındaki manyetik etkileşimden dolayı vuruntu torku meydana gelmektedir. Bu etki, sabit mıknatıslı makinalarda gürültü ve titreşime neden olduğu için istenmeyen bir durumdur. Vuruntu torkunun değeri aşağıda gösterilmiştir.

$$Tcog = (1 / 2)\,.\,\emptyset 2 \ / d\theta \quad (4)$$

Burada $\emptyset g$ hava aralığı akı değeri, dR hava aralığının relüktansı ve $d\theta$ motor dönme açısını ifade etmektedir. Hava aralığının relüktansının periyodik olarak değişimi vuruntu torkuna da etkisi olmaktadır. Yani vuruntu torku da değişmektedir. Bu periyodik değişim olduğu için vuruntu torkunu fourier serisi ile hesaplanabilir.

Vuruntu momenti hesabının yapılması için ilk aşamada ideal oluksuz yapı için hava aralığındaki akı dağılımı, ikinci aşama da hava aralığı manyetik iletkenliği hesaba katılarak değiştirilmiş hava aralığı akı yoğunluğu hesaplanır. Son aşamada hava aralığı akı yoğunluğu hesaplandıktan sonra vuruntu momenti değeri belirlenir. Bu aşamalardan sonra ideal oluksuz makinenin stator yüzeyindeki akı yoğunluğu B_{rl},

$$\mathrm{B_{rl}}(\theta) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} 2\frac{\mu_0 \mathrm{M_n}}{\mu_r}\frac{np}{(np)^2-1}\left[\frac{\mathrm{R_m}}{\mathrm{R_s}}\right]^{np+1}\cdot\left[\frac{(np-1)+2\left[\frac{\mathrm{R_m}}{\mathrm{R_s}}\right]^{np+1}-(np+1)\left[\frac{\mathrm{R_m}}{\mathrm{R_s}}\right]^{2np}}{\frac{\mu_r+1}{\mu_r}\left[1-\left[\frac{\mathrm{R_r}}{\mathrm{R_s}}\right]^{2np}\right]-\frac{\mu_r-1}{\mu_r}\left[\left[\frac{\mathrm{R_m}}{\mathrm{R_s}}\right]^{2np}-\left[\frac{\mathrm{R_r}}{\mathrm{R_s}}\right]^{2np}\right]}\right]\cos(np\theta) \quad (5)$$

şeklinde hesaplanmaktadır(Adam, 2007). Burada M_n, manyetik alanı, R_m mıknatıs yarıçapını, R_s stator dış yarıçapını, R_r rotor yarıçapını, P çift kutup sayısını temsil etmektedir. M_n manyetik alan ise,

$$\mathrm{M_n} = 2\left[\frac{\mathrm{B_r}}{\mu_0}\right]\alpha_p\frac{\sin\left(\frac{n\pi\alpha_p}{2}\right)}{\frac{n\pi\alpha_p}{2}} \quad (6)$$

şeklinde gösterilmektedir. Burada α_p ise kutup adımını ifade etmektedir. Oluk etkisi deneysel bulguları etkilemektedir. Dolayısıyla permanans hesaplanması gerekmektedir. Söz konusu değer,

$$\lambda_{\mathrm{rel}} = \frac{g+\frac{l_m}{\mu_r}}{g+\frac{\pi}{2}w_1+\frac{l_m}{\mu_r}} \quad (7)$$

olarak formülüze edilmektedir. Son olarak vuruntu momenti,

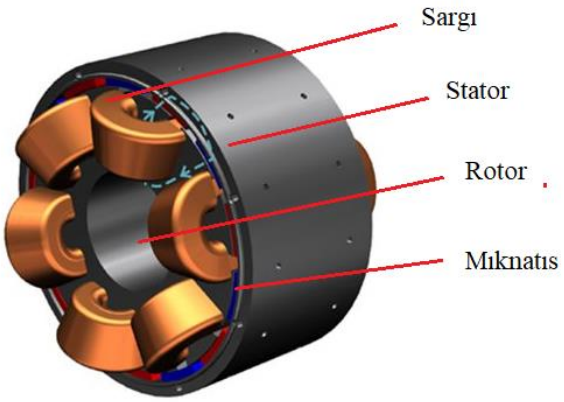
$$\mathrm{T_{cog}}(\theta_1) = \frac{L}{2\mu_0}\sum_{m=1}^{N_s}\left[\int_0^{\frac{w_s}{2}}\mathrm{B_{PM}^2}(w_1)(R_s+w_1)dw_1 - \int_{\frac{w_s}{2}}^{w_s}\mathrm{B_{PM}^2}(w_2)(R_s+w_2)dw_2\right] \quad (8)$$

gibi ifade edilmektedir. Eşitlik 4'te bulunan integral çözüldüğünde,

$$\mathrm{T_{cog}}(\theta_1) = \frac{\pi L R_s}{2\mu_0 N}\sum_{m=1}^{N}\left[\mathrm{B_{PM}^2}\left(\frac{2\pi}{N}m+\theta_1\right)(R_s+g_a)ssg\right] \text{ değeri bulunmaktadır.} \quad (9)$$

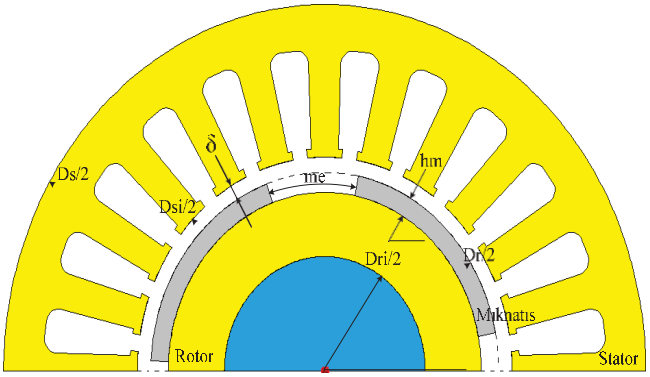
3. Referans Radyal Akılı Sabit Mıknatıslı Motor Yapısı

Radyal akılı motorlarda manyetik akı bir dişten statora, ardından da bir sonraki dişe ve ardından mıknatıslara hareket eder. Radyal akılı sabit mıknatıslı motorlar eksenel akılı motorlar ile karşılaştırıldığında daha az kalıcı mıknatıs hacmine sahiptir bu nedenle de daha avantajlıdır. Kullanım alanları bakımından daha kapsamlıdır, daha ucuzdurlar. Genel verimliliği artırmak için literatürde bir çok çalışma yapılmış ve devam etmektedir.

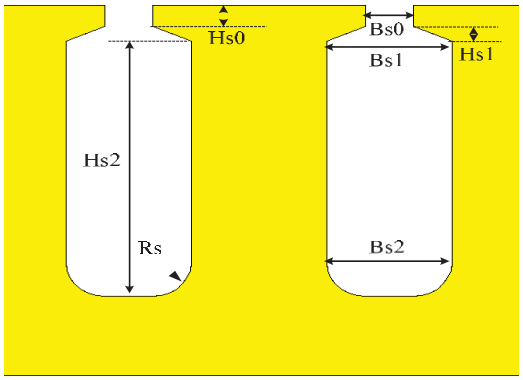


Şekil 1. Radyal akılı sabit mıknatıslı motorun yapısı ve görseli

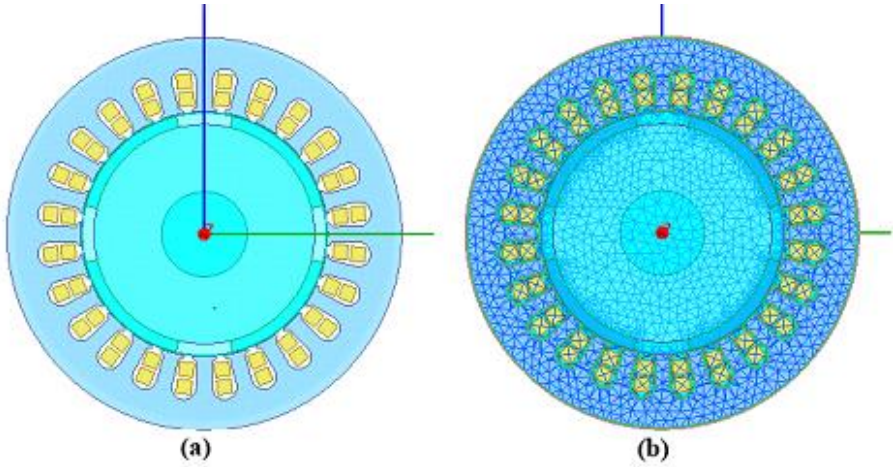
Öncelikle analizleri gerçekleştirmeden önce yapılması gereken modellerin çizilmesidir. Modeller çizilirken Şekil 2'de sabit mıknatıslı makinaya ait temel boyutlar ve stator oluk diş geometrik parametreleri verilmiştir. Şekil 3'de 2D ve SEY modelleri verilmiştir. Modeller çizildikten sonraki aşamada modellerin malzemeleri seçilir. Vuruntu momenti hesabında parametrelerin doğru seçilmesi analizin gerçeğe yakın çıkmasına önemli derecede katkı sağlamaktadır.



Şekil 2. (a) Sabit mıknatıslı makinaya ait temel boyutlar



(b) Stator oluk-diş geometrik parametreleri

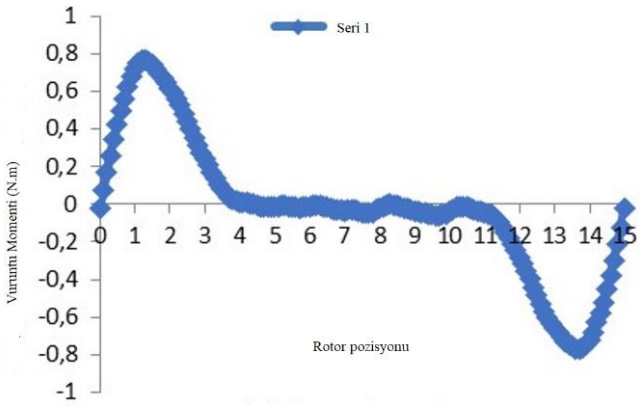


Şekil 3. (a) Referans motorun 2D modeli Ansys_Maxwell **(b)** Referans motorun SEY modeli Ansys_Maxwell

Tablo 1. RASM referans motorun parametreleri

Çıkış gücü	1200W	Stator iç yarıçapı	75mm
Anma Hızı	1500 rpm	Stator uzunluğu	65mm
Çalışma gerilimi(DC)	220V	Stator çelik tipi	M19_24G
Frekansı(Hz)	50	Rotor dış yarıçapı	74
Faz sayısı	3	Rotor iç yarıçapı	26
Kutup sayısı	4	Rotor uzunluğu	65mm
Oluk sayısı	24	Rotor çelik tipi	M19_24G
Oluk / kutup / faz	2	Mıknatıs oranı	0.7
Oluk açıklığı	2.5mm	Mıknatıs kalınlığı	3.5mm
Stator dış yarıçapı	120mm	Mıknatıs Tipi	XG196/96

Tablo 1'de referans motorun parametre değerleri Ansys Maxwell programında kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile 24 oluk için değil de bir oluk adımı için analiz yapıldığında alınan sonuçlar doğrultusunda vuruntu momentinin tepe değerinin 0.7 N.m olduğu gözlemlenmiştir. Maxwell 2D analizinden alınan vuruntu momenti değişim profili Şekil 4'de gösterilmiştir. Seçilen modelde oluk sayısı 24'tür. Bir tam tur dönmesi için 360 dereceye tamamlanması gerekmektedir. Rotor pozisyonu 15 derece seçilmiştir.



Şekil 4. Referans motor vuruntu momenti değişim profili

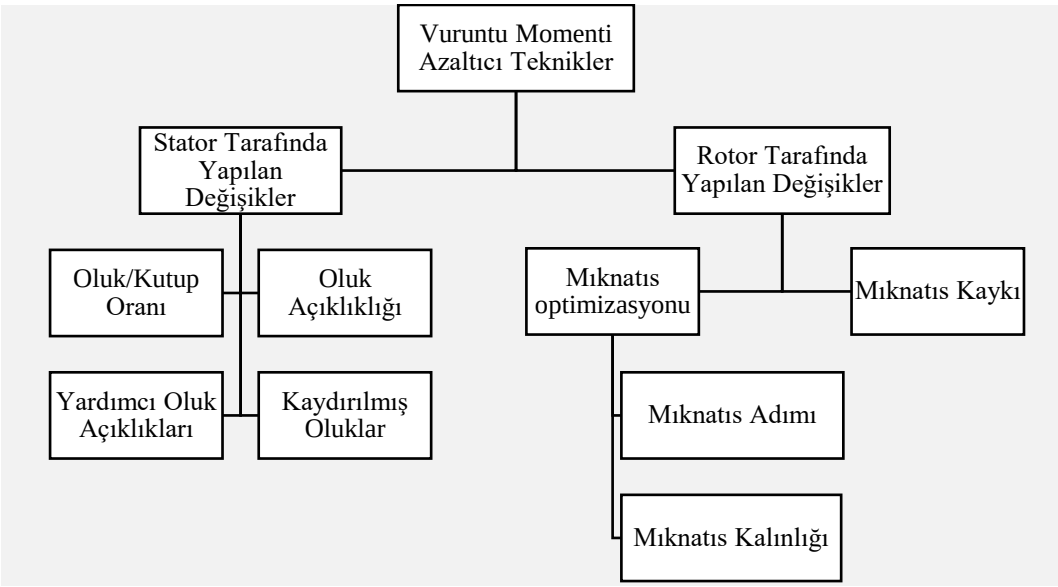
Tablo 2'de sabit mıknatıslı motorlarda vuruntu torkunu belirleyen değişkenler ve sabitler ifade edilmiştir.

Tablo 2. Vuruntu torkunu belirleyen değişken ve sabitler

Değişken ve sabitler	Açıklaması
Wm	Mekanik enerji
F	Kuvvet
dx	x yönündeki diferansiyel uzaklık
Pm	Mekanik güç
v	Hareket hızı
T	Tork
Øg	Hava aralığı akısı
dR	Hava aralığının relüktansı değişimi
dθ	Motor dönme açısı değişimi
Tcog	Vuruntu torku
θm	Rotor pozisyonu
φk	k inci harmoniğin genliği
Nc	k inci harmoniğin faz açısı
Tk	Rotor kutup sayısı ile stator oluk sayısının en küçük ortak katı
Rm	Mıknatısın dış yarıçapı
Rs	Stator dış yarıçapı
Rr	Rotor yarıçapı
αp	Çift kutup sayısı
p	Kutup adımı
Bs0	Oluk açıklığı
Bs1	Oluk üst genişliği
Bs2	Oluk alt genişliği
Dr	Rotor dış çapı
Dso	Stator dış çapı
Dsi	Stator iç çapı
ho	Oluk yüksekliği
Hs0	Oluk diş yüksekliği
Hs1	Oluk diş eğim yüksekliği
Hs2	Oluk iç yüksekliği
hyoke	Stator boyunduruk yüksekliği
Rs	Oluk köşe açışı
δ	Hava aralığı

4. Radyal Akılı Sabit Mıknatıslı Motorlarda Vuruntu Momentini Azaltmak İçin Kullanılan Yöntemler

Literatür çalışmaları incelendiğinde vuruntu momenti azaltma teknikleri RASM motorlarda iki ana başlık altında incelenmektedir. Söz konusu işlemler stator ve rotor tarafında yapılacak değişikler olarak ayrılırlar. Şekil 5 incelendiğinde RASM motorlarda vuruntu momentini azaltıcı yöntemleri göstermektedir.



Şekil 5. RASM motorlarda vuruntu momenti azaltıcı teknikler (Aydın, 2008).

4.1. Stator Tarafında Uygulanan Teknikler

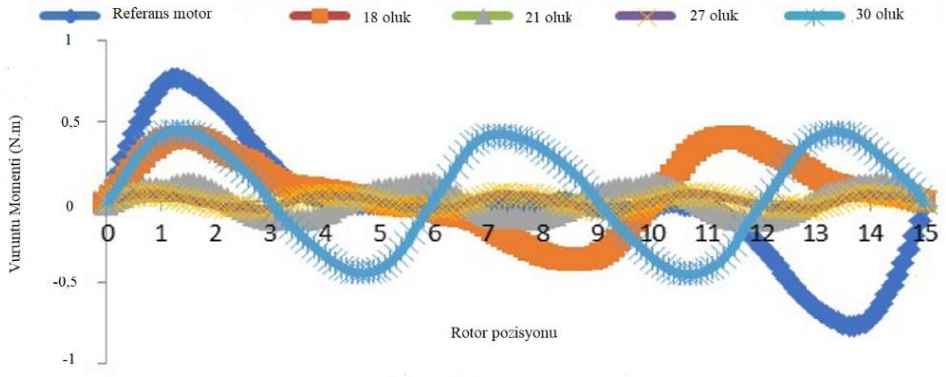
Bu çalışma vuruntu momentini azaltmak için stator tarafında; oluk açıklığı ve oluk sayısı değişimlerinin etkileri üzerine değinilmiştir. Oluk sayısı seçiminde çizelge 2'de verilen (Kütük, 2011), 3 fazlı ve 4 kutuplu olup/kutup kombinasyonu değeri referans motora yakın oluk sayıları seçilmiştir. Oluk açıklığında ise referans motorun oluk açıklığının ±1 mm ve 0.5 mm adımlar ile değiştirilerek vuruntu momenti değişimleri gözlemlenmiştir. Yapılan değişikliklerin SEY analizinden edilen sonuçlar referans motor ile karşılaştırılarak, vuruntu momenti değişimleri şekil 6 ve şekil 7'de gösterilmiştir.

4.1.1. Farklı oluk sayısı

Vuruntu momenti, RASM motorlarda kutup ve oluk seçimindeki etkenlerinin birisidir. Dikkat edilmediği durumlarda oluk/kutup oranı çift olarak hesaplanırsa bütün kutup kenarları ile oluk kenarları çakışır bu da vuruntu momentinin artmasına neden olur (Kütük, 2011). Oluk/kutup oranındaki bu husus dikkate alınarak ve referans motorun oluk/kutup oranına yakın değer verecek oluk sayısı seçilmiştir. SEY analizinden elde edilen sonuçların ile referans motor vuruntu momenti değişimi ile karşılaştırıldığında başarılı sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. En iyi sonucun 27 oluk seçimi ile alındığı görülmüştür. Vuruntu momentinin tepe değeri 0.048 Nm değerine düştüğü ve referans motora göre %93.7'lik bir ciddi düşüş gözlenmiştir. Referans motor üzerinde oluk sayısı değişiminin çıkış performansı kontrol edildiğinde çıkış değerlerinde büyük bir değişime neden olmadığı gözlemlenmiştir.

Tablo 3. Üç fazlı motorlar için olup/kutup kombinasyonları

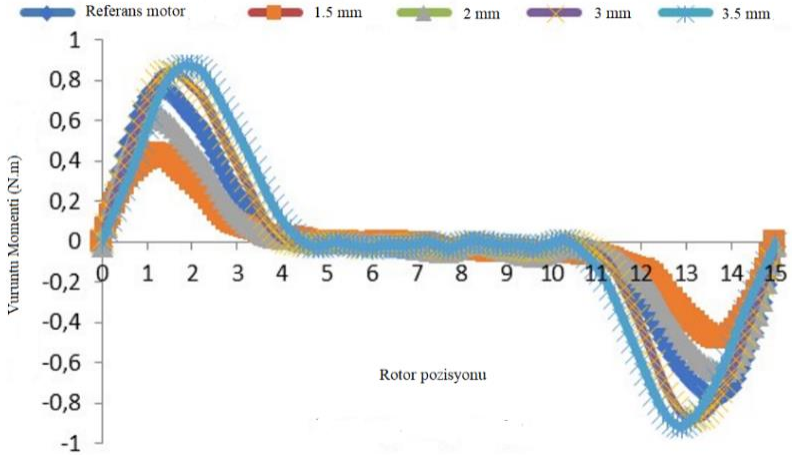
Oluk	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
Kutup	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
			6	8	10	6	8	8	6	8	8	6	8	8	6	8
			8	10		8	14	10	8	10	10	8	10	10	8	10
			12	18		12	16	16	10	20	14	10	14	14	10	14
						14		20	12	22	20	12	16	16	12	16
						16			18	26	22	14	26	26	14	20
									20		26	16	28	28	16	32
									22		28	22	32	32	20	34
									24			24	34	34	28	38
												26			30	40
												28			32	
												30			34	
												32			38	
															40	



Şekil 6. Oluk sayısı ile vuruntu momenti değişimi

4.1.2. Oluk açıklığının değiştirilmesi

RASM motorlarda vuruntu momentini azaltması beklenen yöntemlerden biri olarak, oluk açıklığının azaltılması ele alınmaktadır. Böylelikle vuruntu momentinin tepe değerinin azalması sağlanmaktadır (Aydın, 2003). Oluk açıklığında referans motorun oluk açıklığına göre yapılan ±1 mm ve 0.5 mm adımlar ile yapılan değişimlerin vuruntu momenti üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Oluk açıklığında yapılan değişimlerin analiz sonuçları şekil 6'de verilmiştir. Oluk açıklığındaki değişimlerin şekil 6'deki grafiksel sonuçlarına bakıldığında oluk açıklığının artmasının vuruntu momentinin tepe değerinde yükselmelere neden olduğu görülmüştür. Şekil 7 incelendiğinde rotor pozisyon derecesi 15 derece olduğunda azalmanın açıkça anlaşıldığı görülmektedir. 1.5 mm oluk açıklığında referans motora göre vuruntu momentinde % 36.84'luk bir azalma sağladığı analiz sonuçlarından gözlemlenmiştir.



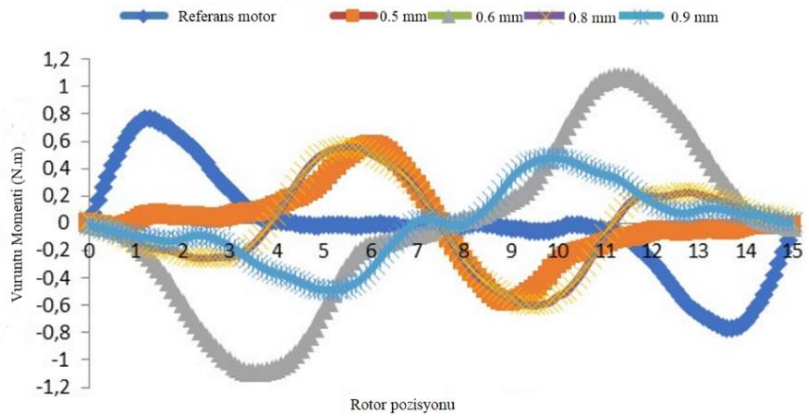
Şekil 7. Oluk açıklıkları ile vuruntu momenti değişimi

4.2. Rotor Tarafında Uygulanan Teknikler

RASM motorlarda vuruntu momentini azaltmak için stator tarafında birçok teknik bulunmasıyla beraber, rotor tarafında uygulanabilecek amaca uygun birçok teknik bulunmaktadır. Bu çalışmada ilk olarak rotor tarafında farklı mıknatıs adımının vuruntu momenti üzerinde etkisi araştırılmıştır ve sonrasında farklı mıknatıs kalınlıkların vuruntu momenti üzerinde etkisinde çalışılmıştır. Vuruntu momentindeki değişimleri şekil 8 ve şekil 9'de verilmiştir.

4.2.1. Mıknatıs oranın değiştirilmesi

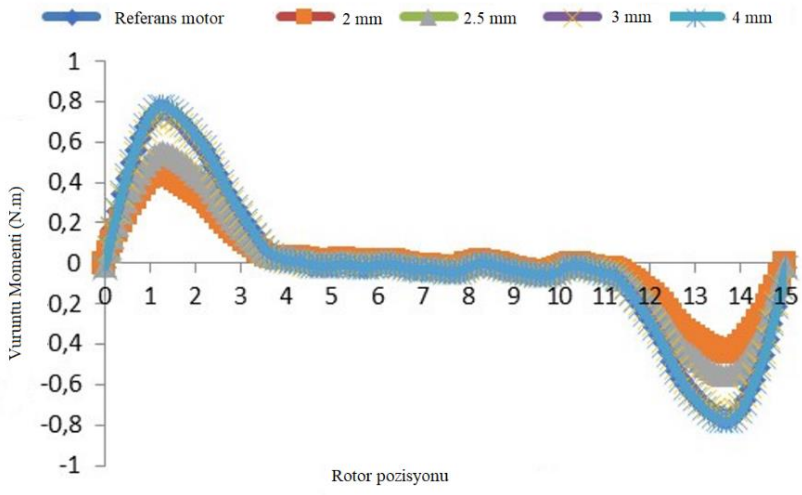
RASM motorlarda, vuruntu momenti azaltılabilir, rotor tarafında mıknatıs ölçülerinde yapılacak değişimler ile bu yapılabilmektedir ve yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Mıknatıs kutuplarının kenarları ile stator olukları arasındaki etkileşim vuruntu momentini oluşturmaktadır. Optimum mıknatıs oranı vuruntu momentinin dalga şeklini ve tepe değerini etkilemektedir. Mıknatıs oranındaki değişimin etkilediği kısımlardan birisi de mıknatıs kaçak akıdır ve bu sayede azaltılması sağlanabilir. Fakat mıknatıs akısı dolayısıyla ortalama moment de değişime söz konusu olacaktır (Meşe, 2013). Bunların yapılması ortalama momentte önemli ölçüde düşüşe sebep olabilir ama bununla birlikte vuruntu momentinde kayda değer düşüş sağlamaktadır. Mıknatıs oranında yapılan değişimlerin SEY analizlerinden alınan sonuçların doğrultusunda en iyi sonucun mıknatıs oranını 0.9 olarak seçilmesi ile vuruntu momenti tepe değeri 0.49 Nm düşürülmüştür ve referans motora göre vuruntu momenti %35.5'luk bir düşüş sağlanmıştır.



Şekil 8. Mıknatıs oranları ile vuruntu momenti değişimi

4.2.2. Farklı mıknatıs kalınlığı

Mıknatıs kalınlığının değiştirilmesi hava aralığı akı yoğunluğunun genlik değerinin değişmesine neden olacaktır. Mıknatıs kalınlığı arttıkça vuruntu momenti de artmaktadır (Meşe, 2013). Hava aralığındaki akının değişimi aynı zamanda ortalama çıkış momentinde de değişimlere neden olacağından, mıknatıs kalınlığında yapılacak değişimlerde ortalama çıkış momenti göz önüne alınarak değişim yapılmalıdır. Aksi durumda çıkış momentinde ciddi değişimler söz konusu olur. Vuruntu momenti tepe değerini mıknatıs kalınlığının artırılması ile artığı şekil 9'deki analiz sonuçlarından gözlemlenmiştir. Mıknatıs kalınlığının 2 mm olarak değiştirilmesi ile vuruntu momentinde % 42.1'lik bir düşüş sağlanmıştır. Mıknatıs kalınlığı 2mm olarak değiştirilmesi ile çıkış performansında ciddi değişimlere neden olmadığı görülmüştür.



Şekil 9. Mıknatıs kalınlıkları ile vuruntu momenti değişimi

5. Sonuç

Bu çalışmada RASM motorlarda vuruntu momentini azaltmak amacıyla stator ve rotor tarafında yapılabilecek değişikliklere detaylı olarak yer verilmiştir. Çalışmada 24 oluk, 4 kutup değerlerine sahip bir RASM motorunun Ansoft maxwell yazılımında 2 boyutlu modelinin sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile analizleri yapılarak referans motorun stator ve rotor tarafındaki değişikliklerin vuruntu momentine etkileri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmaların diğer çalışmalardan farkı oluk sayısı ve kutup sayılarının farklı kombinasyonlarının programda girildikten sonra gerçek uygulamaya geçilmeden önce avantaj sağlanması istenmektedir. Stator tarafında oluk açıklığının azaltılması ile vuruntu momentinde %36,84, rotor tarafında mıknatıs kalınlığının azaltılması ile %42,1 lik bir azalma görülmüştür. Rotor tarafında mıknatıs adımının azaltılması ile vuruntu momentinin azalmasına rağmen ortalama momentte düşüş olduğu görülmüştür. Yapılan analizler sonucunda RASM motorlarda stator tarafında oluk sayısı ve kutup sayısı kombinasyonunun vuruntu momentini etkileyen en önemli unsurlardan biri olduğu açıkça görülmüştür. Prototip tasarım yapılmadan önce sonlu elemanlar yöntemi ile maliyet ve zaman tasarrufu sağlanılması amaçlanmıştır.

Referanslar

Adam, «Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Moment Dalgalanması ve Gürültünün Azaltılması Doktora Tezi,» Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, pp. 1-10, 2007.

A. Saygin, A. Aksöz, «Design optimization for minimizing cogging torque in Axial Flux Permanent Magnet machines, » International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), Brasov, pp. 324-329, 2017.

Can ve E. Yıldırız, «Yeni bir 3 Fazlı Disk Tipi Enine Akılı Generatörün Tasarımı ve Vuruntu Momentinin Optimizasyonu,» Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, pp. 2-7, 2019.

Dalcalı A., Kurt E., Çelik E. And Öztürk N., «Cogging torque minimization using skewed and separated magnet geometries, » Politeknik Dergisi, 23(1): 223-230, 2020.

Dai J.C., Hu Y.P., Liu D.S. and Wei J., «Modelling and analysis of direct-driven permanent magnet synchronous generator wind turbine based on wind-rotor neural network model, » Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 226: 62-72, 2011.

E. Ayçiçek, N. Bekiroğlu ve İ. Şenol, «Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Motorlarda Açık Oluk Yapısı Kullanarak Minimum Vuruntu Momenti İçin Rotor Yapısının Optimizasyonu,» Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi , pp. 1-5, 2012.

E. Meşe, «Hibrit Araç Uygulaması İçin Kuplajsız Çift Sargılı Elektrik Makinası Tasarımı ve Denetimi,» TÜBİTAK Projesi, 2013.

Güemes J.A., Iraolagoitia A.M., Del Hoyo J.I and Fernandez P., «Torque analysis in permanent-magnet synchronous motors: a comparative study, » IEEE Transaction on Energy Conversion, 26: 55- 63, 2011.

H. Tiegna, Y. Amara, G. Barakat, U. Havre, L. Havre, «Study of Cogging Torque in Axial Flux Permanent Magnet Machines Using an Analytical Model» vol. 50, no. 2, 2014.

Herlina, Setiabudy R. and Rahardjo A., «Cogging torque reduction by modifying stator teeth and permanent magnet shape on a surface mounted PMSG, » International Seminar on Intelligent Technology and Its Application, Indonesia, 227-232, 2017.

L. Xiao, J. Li, R. Qu, Y. Lu, R. Zhang, D. Li, «Cogging Torque Analysis and Minimization of Axial Flux PM Machines With Combined Rectangle-Shaped Magnet», in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 2, pp. 1018-1027, March-April 2017.

M. Aydın, «Magnet Skew in Cogging Torque Minimization of Axial Gap Permanent Magnet Motors, » 2008 18th International Conference on Electrical Machines, pp. 1-6, 2008.

M. Aydın, «Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Elektrik Motorlarında Vuruntu Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Elektrik Motorlarında Vuruntu,» Elektrik Mühendisleri Odası, pp. 1-7, 2003.

M. Aydın, «Sabit Mıknatıslı Disk Motorlarda Mıknatıs Kaykı Etkisi,» Semantic Scholar, pp. 2-5, 2008.

M. Gulec, M. Aydin, «Magnet asymmetry in reduction of cogging torque for integer slot axial flux permanent magnet motors», in IET Electric Power Applications, vol. 8, no. 5, pp. 189-198, May 2014

M. Yılmaz ve H. K. Araz, «Elektrikli araçlar için mıknatıs oranı ve moment titreşimi azaltılmış yüksek verimli sürekli mıknatıslı senkron motor tasarım süreci ve gerçeklenmesi,» Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, pp. 2-6, 2020.

O. Kütük, «Rüzgar Türbinlerinde Doğrudan Sürüşlü Sürekli Miknatıslı Senkron Generatör Tasarımı Yüksek Lisans Tezi,» İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, pp. 27-60, 2011.

O. O. Ogidi, P. S. Barendse, M. A. Khan, «Influence of Rotor Topologies and Cogging Torque Minimization Techniques in the Detection of Static Eccentricities in Axial-Flux Permanent-Magnet Machine», in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 1, pp. 161-170, Jan.-Feb. 2017.

Tseng W.T. and Chen W.S., «Design parameters optimization of a permanent magnet synchronous wind generator, » 19th International Conference on Electrical Machines and Systems, Japan, 2016.

Zhu X., Hua W., Wu Z., Huang W., Zhang H. and Cheng M., «Analytical approach for cogging torque reduction in flux-switching permanent magnet machines based on magnetomotive force-permeance model, » IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65: 1965-1979, 2018.

MÜHENDİSLİK MİMARLIK FAKÜLTESİ

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

UMAGD, (2023) 15(2), 558-573.

10.29137/umagd.1268609

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Adaptive Threshold Selection of Anisotropic Diffusion Filters Using Dissimilarity Transform

Mahmut Kılıçaslan[1*]

[1]Ankara Üniversitesi Nallıhan Vocational School, 06920, Ankara, TÜRKİYE

***Başvuru/Received**: 21/03/2023* ***Kabul / Accepted**: 15/04/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Abstract

The development of technology has increased the use of imaging devices. In addition, the development of hardware in recent years has improved the quality of images. However, noise in images is inevitable due to many factors during or after the image acquisition process. Image filters are used to remove these noises and this process is an important research area. One of the most basic steps of image processing is denoising. Diffusion filters have been used for denoising for many years, as they protect the edges. The common problem of diffusion filters, which are still being developed today, is the user intervention requirements. The diffusion threshold value is currently selected by the user. In this study, a fully adaptive threshold value selection method is presented with the help of dissimilarity transform. The main contribution of the study is the proposal of dissimilarity transformation for anisotropic diffusion filters. Experimental results show that the threshold values determined by the proposed method effectively provide denoising without being affected by noise variance and preserve the edges.

Key Words

"Anistropic diffusion filter, Adaptive threshold selection, Dissimilarity Transform, Denoising"

***Sorumlu Yazar:** m.kilicaslan@ankara.edu.tr*

1. Introduction

Image denoising algorithms have used in various different fields such as medicine, defense industry, education or space science. In addition, many identifications, analysis and extraction operations are performed through digital images. Digital images are often corrupted due to the structure of the imaging devices or storage and transfer processes. The elimination of these distortions, called noise, is of great importance for the success of various processes such as segmentation, edge detection, or image retrieval(İncetaş et al., 2017). Therefore, denoising of the images is one of the crucial steps for digital image processing (Gao et al., 2017). The goal of the denoising is to eliminate the noise pixels in the image while preserving the features such as edges (Jain & Tyagi, 2016).

Many noise filters in different structures have been developed to remove noise (Incelas et al., 2014). The anisotropic diffusion filter (ADF), first proposed by Perona and Malik (PM) in 1990 (Perona & Malik, 1990), has been used in many studies on noise reduction. Except for spatial filters that cause distortion of edge pixels, partial differential equation (PDE) based anisotropic diffusion filters can preserve the edges while removing noisy pixels (Yu et al., 2010). The success of the diffusion filter attracted so much attention that new filter models with different diffusion functions were developed in the followed years (Charbonnier et al., 1994; Weickert, 1998). Although these models have different diffusion functions, they are structurally based on PM ADF. In (Ham et al., 2012), a new filter design based on second order PDE has been developed for a more powerful ADF. Subsequently, ADFs based on fourth order PDE were proposed to reduce the staircase effect of second order diffusion filters (Barbu, 2016; Hajiaboli, 2009; You & Kaveh, 2000). In addition to denoising achievement of these techniques, it was stated that they reduce the staircase effect and preserve the edges. In 2019, a fourth-order AD filter, which has a very high edge preservation success, was presented this time as Hessian Matrix-based (Deng et al., 2019). In the evaluations made in terms of both visual and measurement metrics, it has been stated that it provides a better performance than both PM and other fourth order AD filters.

Although different types of filters have been developed, it is often not possible to know the noise intensity. Choosing the most suitable parameters require trial and error and certain expertise, which prolongs the denoising process and increases the cost. For this purpose, adaptive filtering techniques have been developed to reduce the noise effect. Rafsanjani et al. (2016) stated that the diffusion coefficient is of great importance in the success of adaptive filtering (Rafsanjani et al., 2017). They presented a diffusion coefficient calculation approach based on residual local power and the amount of the gradient magnitude. In order to determine the diffusion coefficient adaptively, an approach based on local minimum mean square error (LMMSE) has also been proposed (Aja-Fernández & Alberola-López, 2006). In 2016, a semi-adaptive K threshold selection approach was proposed (Xu et al., 2016). Despite the success of the developed filters, the K threshold value, which is a very important parameter, needs to be determined by the user in the calculation of the diffusion coefficient. It is known that more successful results can be obtained by selecting different K values according to the noise intensity of the image (Rafsanjani et al., 2016).

In recent years, it has been observed that studies on the automatic determination of the K value according to the characteristics of the image have come to the fore. The idea of calculating the K-value using the center of gravity of the wavelet histogram was presented by Demirci and Tanyeri in 2012 (Demirci & Tanyeri, 2012). Then, in 2018, the same authors presented another study developed by Tanyeri and Demirci (TD), in which the K threshold was automatically obtained using the wavelet transform (Tanyeri & Demirci, 2018). They used the average of three values obtained using MAD as the K value for horizontal, vertical, and diagonal wavelet coefficients, and they also indicated that the success rates for speckle images were quite high

In this study, a new approach is presented where the threshold value of the anisotropic diffusion filter is calculated adaptively using dissimilarity transform. First, the dissimilarity transform of the image and the calculation of the corresponding Average Dissimilarity Value (ADS) are introduced. ADS is used to find the K threshold value with the help of an exponential function. Next, the proposed approach is tested on astronomical images using different diffusion functions. The proposed model is compared with both the fixed K values that give the best results and the wavelet-based adaptive technique. Results are made both with known measurement metrics and visually. Laplacian of Gaussian (LoG) edge detection approach, which has a very high noise sensitivity, is also used in the visual evaluation.

2. Theory and Method

2.1. Anisotropic Diffusion Filter and Threshold Value

The nonlinear anisotropic diffusion filter, widely used for denoising while preserving edges, was first proposed by the Perona and Malik (PM) in 1990 (Perona & Malik, 1990). The equation of the filter based on heat diffusion was as follows:

$$\frac{dI(x,y,t)}{dt} = div(c(x,y,t)\,\nabla I(x,y,t)) \tag{1}$$

where div, ∇, and t denote divergence, gradient operator, and time, respectively. In addition, c is called the diffusion or conductivity coefficient and can also be expressed as a function. PM diffusion function is given in Eq. (2). As a result of the equation, the diffusion function value must be between 0 and 1. It is expected that this value will approach to 1 when the noise is high intense and to zero when the noise is low intense, in order to perform the diffusion process correctly.

$$c(x,y,t)=\frac{1}{1+\left(\|\nabla I\|/K\right)^2} \tag{2}$$

where K is diffusion threshold and given as a constant. To reduce the staircase effect of the PM approach, a new model was proposed using fourth order PDE in the diffusion function (You & Kaveh, 2000)

$$\frac{dI}{dt}=-\nabla^2\left(c\left(\left|\nabla^2 I\right|\right)\nabla^2 I\right) \tag{3}$$

where $\nabla^2 I$ is the image Laplacian and calculated as in Eq. (4).

$$\left|\nabla^2 I\right|=\left|I_{xx}+I_{yy}\right| \tag{4}$$

where I_{xx} and I_{yy} are second order derivatives of I. In (Hajiaboli, 2009), the function in Eq. (5) was proposed by using the Euclidean norm in order to increase the edge preservation feature of the filter.

$$\frac{dI}{dt}=-\nabla^2\left(c\left(\left\|\nabla^2 I\right\|\right)\nabla^2 I\right) \tag{5}$$

Recently, one of the most successful techniques is the Hessian Matrix based fourth order anisotropic diffusion filter (Deng et al., 2019) and the diffusion function has been modified as in Eq. (6).

$$\frac{dI}{dt}=-\nabla^2\left(c_1\lambda_1+c_2\lambda_2\right) \tag{6}$$

where λ_1 and λ_2 are the eigenvalues of Hessian Matrix, while c_1 and c_2 are diffusion coefficients and are calculated as in Eq. (7) and Eq. (8).

$$c_1=c_2{}^2 \tag{7}$$

$$c_2=\frac{1}{1+\frac{\left|\lambda_1-\lambda_2\right|^2}{K^2}} \tag{8}$$

Although different diffusion functions have been developed for ADFs as mentioned above, the general structure of the filters is as shown in Fig. 1. f (x, y), g (x, y), and K denote the noisy image, the filtered image, and the threshold value.

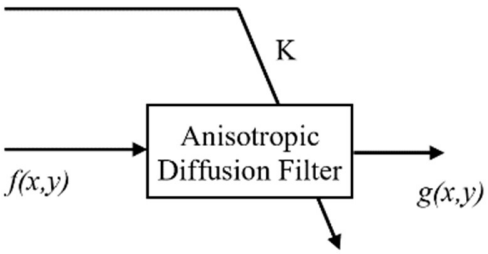


Figure 1. Conventional Diffusion Filter Diagram.

Common disadvantage of the mentioned filters is that the K value is user-defined, although it has a great effect on the success of the ADF (Tsiotsios & Petrou, 2013). Due to the structure of the diffusion equations, it is clear that as the K value increases, diffusion will increase. It is also known that choosing a higher K value in high noisy images and lower K value in low noisy images produces more successful results (Demirci & Tanyeri, 2012).

The most effective approach developed in recent years to determine the K value without user intervention was proposed by Tanyeri and Demirci in 2018 (Tanyeri & Demirci, 2018). First of all, 3 different values were obtained by using the median absolute deviation

process on the horizontal, vertical and diagonal wavelet coefficients of the noisy image. Then the average of these three values was used as the K threshold value.

2.2. Dissimilarity Transform

The idea of using the similarity of pixels instead of Euclidean distance for the purpose of edge detection was first proposed by Demirci (Demirci, 2007) in 2007. Thus, it was possible to detect the edges without making complex calculations. Thanks to its advantages, similarity transform has been used in many studies on segmentation (Guvenc et al., 2008; Incetas et al., 2014; İncetaş & Uçar, 2021; M. O. İncetaş et al., 2017) and edge detection (Ali, 2013; Aydın et al., 2016). The similarity transform (SP) of a center pixel (P_0) in a 3x3 neighborhood is calculated using the gray level values of the neighboring pixels as follows:

$$S(P_0, P_i) = \exp\left(-\frac{|P_0 - P_i|}{D_n}\right) \tag{9}$$

$$S_P = \frac{1}{9}\sum_{i=0}^{8} S(P_0, P_i) \tag{10}$$

where $|P_0 - P_i|$ is the absolute difference of gray level values of neighboring pixels and D_n is the user selected normalization coefficient. Therefore, the success of the similarity transformation depends on the coefficient that the user chooses. In 2019, a new approach was introduced that automatically calculates the D_n coefficient used in the similarity transform (INCETAS et al., 2019).

$$D_n = \left(\frac{255}{d_a^2 + 1}\right) + 1 \tag{11}$$

where d_a is the mean of the absolute difference between the P_0 and the other neighbor pixels in the 3x3 mask. It is calculated as:

$$d_a = \frac{1}{9}\sum_{i=0}^{8} d_{0,i} \qquad (i=0, 1, \ldots., 8) \tag{12}$$

where $d(0,i)=|P_0-P_i|$ is the absolute difference between P_0 and neighbor pixel, P_i. By this way, the similarity transform is calculated for each pixel locally and automatically, without user dependency.

In this study, the invert of the similarity value, that is, the dissimilarity (DS) value of the pixels was calculated as given below. All gray level values obtained from the DS transform are in the range of [0,1].

$$DS_P = 1 - S_P \tag{13}$$

The noise-free astronomical images used in the study and their DS transforms are shown in Fig. 2. In the DS transform images, it is seen that the gray level values of the pixels in the edge regions close to 1 (white). On the other hand, the DS values approach 0 (black) in regions where the pixels are homogeneous. Although the edge regions become clear as a result of the transform, the similarities between the neighboring pixels in an image are also revealed. The brighter DS transform result means that the image consists of dissimilar pixels. The DS values of the pixels are used in this study to calculate the K threshold value of the anisotropic diffusion filter.

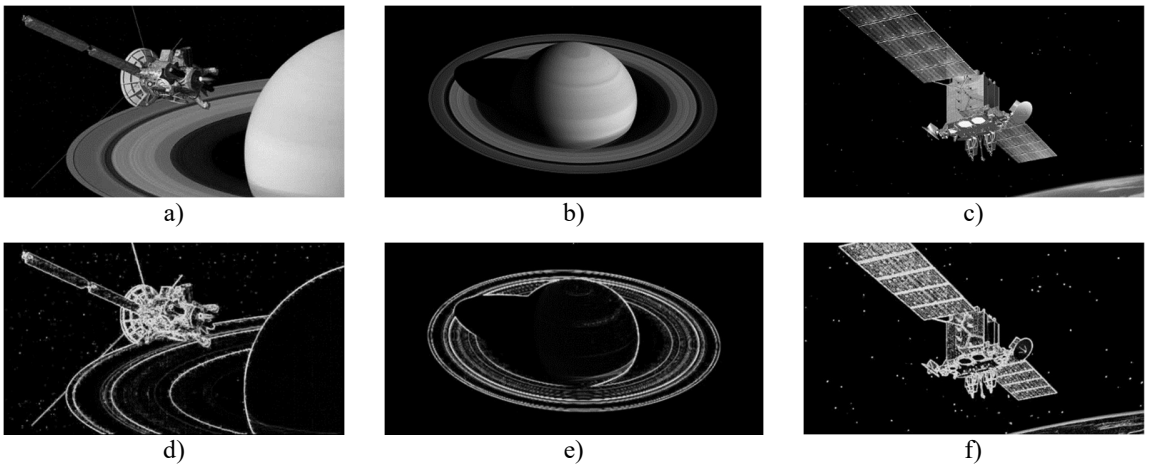


Figure 2. Original images **(a-c)** and dissimilarity transform results **(d-f)**.

2.3. Proposed Adaptive Threshold Selection Model

Although many ADF models successfully remove noise and preserve edges, they need users or complex calculations such as wavelet transforms. In this paper, a simple calculation method using the DS value is proposed instead of manually selecting the threshold value K. The average gray level value (ADS) of the image obtained from the DS transform is calculated.

$$ADS = \frac{1}{M\,N}\sum_{i=0}^{M-1}\sum_{j=0}^{N-1}\left(DS(x_i, y_j)\right) \tag{14}$$

where M and N are the width and height values of the image, DS(x, y) is the dissimilarity image, and the ADS is the average dissimilarity value. Thus, important information about the dissimilarity of the pixels in the image is achieved. In the tests, it has been observed that the diffusion filter gives more successful results when there is an exponential relationship between the increase in values of ADS and K. For this purpose, an exponential function in Eq. (15) is used to calculate the K value by means of ADS.

$$K = 255 \cdot ADS \cdot (10^{2\cdot(ADS-1)}) \tag{15}$$

The exponential relationship between the ADS and the K threshold value is shown in Fig. 3. For the K threshold value to be maximum, 255, the ADS value must be 1. To reach the threshold value of K = 50, which is used in many studies, the ADS value greater than 0.70 is required.

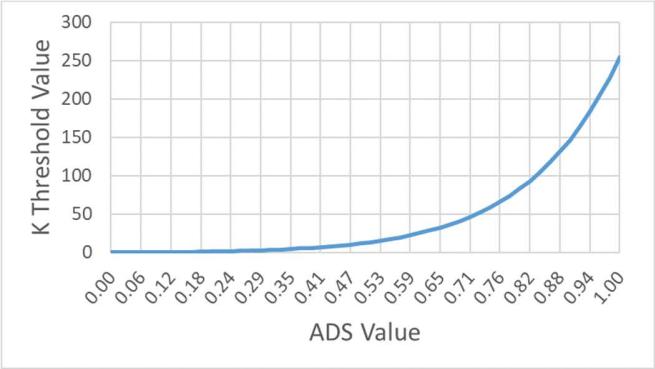


Figure 3. The relationship between ADS and K coefficient.

The change in ADS and K values according to the increase in noise variance for each image is shown in Fig. 4. Especially at the high noise levels, although the difference between ADS values of images is small, the difference between K values increases due to the structure of Eq. (15).

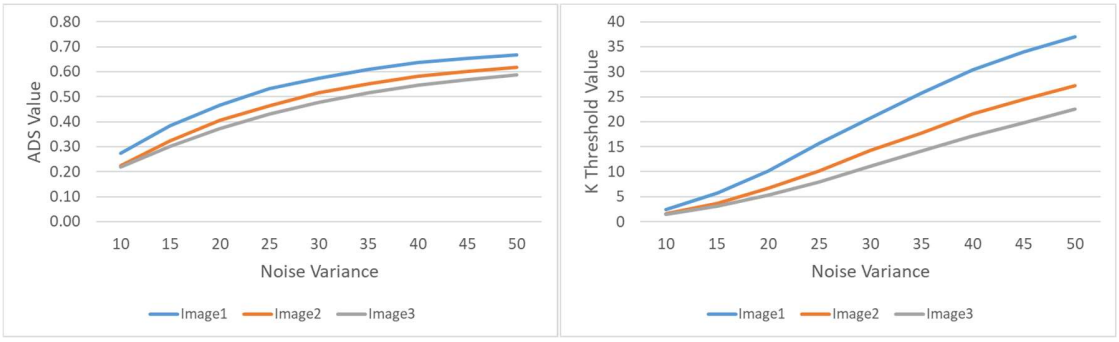


Figure 4. Effect of noise variance on ADS and K coefficient.

The diagram of the proposed method is given in Fig. 5. As can be seen, the K value can be calculated quickly and automatically with a simple mathematical operation using the noisy image, and the user does not need to enter a value anymore.

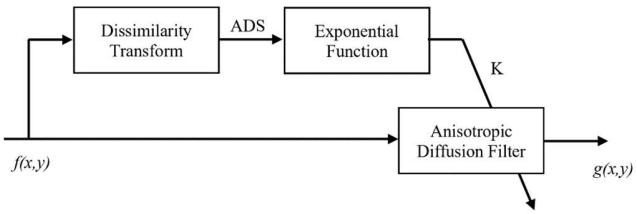


Figure 5. Proposed Diffusion Filter Diagram.

3. Experimental Results

In order to measure the performance of diffusion filters, peak signal to noise ratio (PSNR), and the structural similarity index (SSIM) metrics (Wang et al., 2004), which are considered as important criteria for the similarity of two images, are used. Both PSNR and SSIM metrics determine image quality, and their higher values indicate the higher the success of the filter.

While obtaining the results, 9 different levels of Gaussian noise (σ^2 = 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50) are added to the images. In order to test the success of the proposed automatic diffusion threshold selection approach, fourth-order ADFs such as YK(You & Kaveh, 2000) and HM (Deng et al., 2019) are also applied to the noisy images besides the conventional PM ADF. While applying diffusion filters, in addition to the constant K values (K = 10, 25, 50, 75, and 100), the wavelet-based K values (Demirci et al., 2012) and the values calculated with the proposed method in this study are used. PSNR and SSIM values are calculated for the images obtained as a result of the 30th iteration. In Fig. 6(a) and Fig. 7(a), there are three images with gauss σ^2 = 20 and σ^2 = 40 noise, respectively. DS transform results of these noisy images are shown in Fig. 6(b) and Fig. 7(b). As can be seen in the figures, when the noise increases, the DS transforms are brighter, that is, the ADS value is higher.

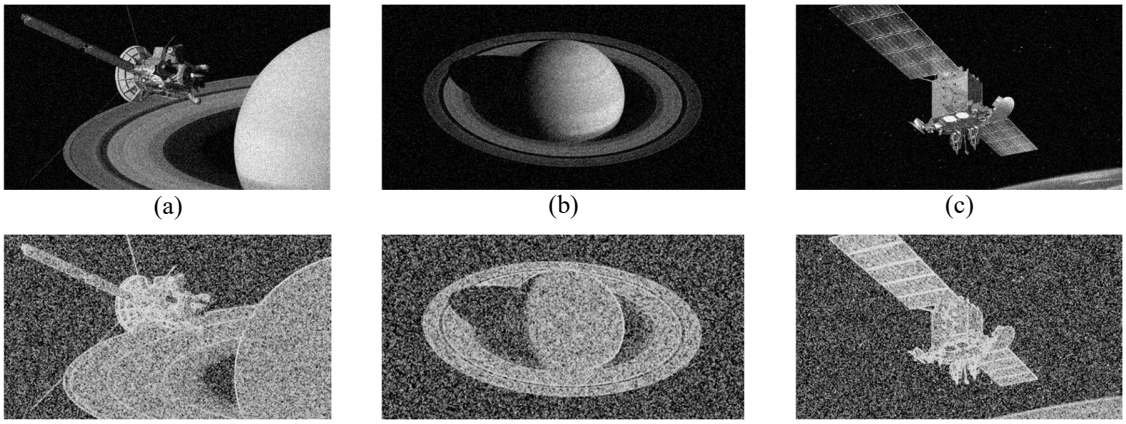


Figure 6. Noisy images and DS Transform results. **(a-c)** Noisy images (σ2=20), **(d-f)** Results of Dissimilarity Transform

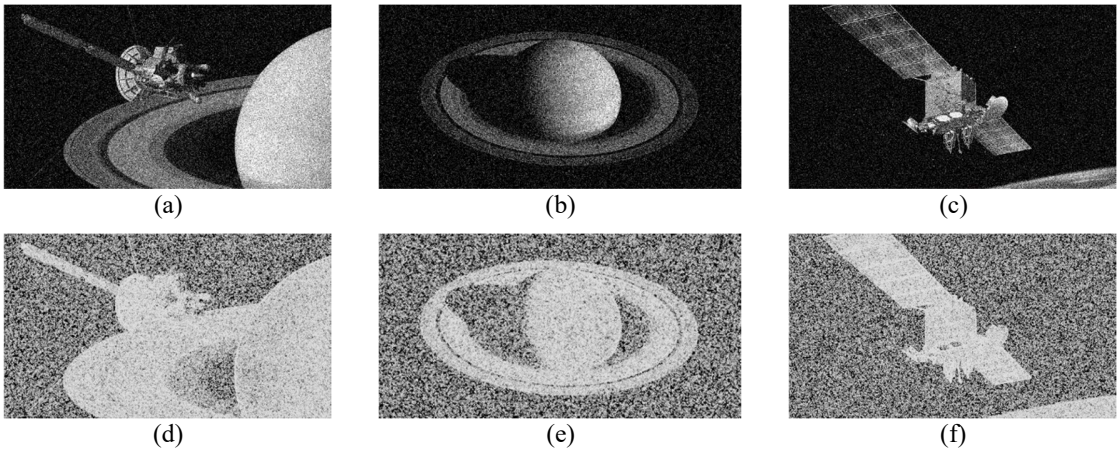


Figure 7. Noisy images and DS Transform results. **(a-c)** Noisy images (σ^2=40), **(d-f)** Results of Dissimilarity Transform.

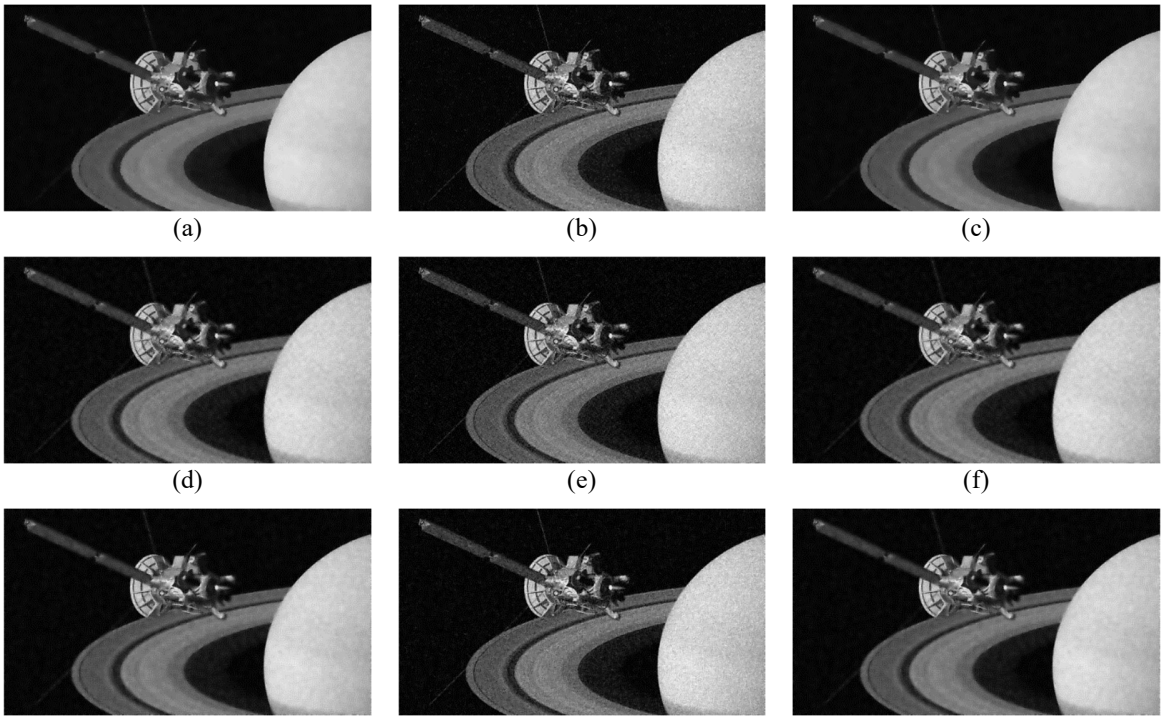


Figure 8. ADF results of the first noisy images (σ^2=20), **(a)** PM with K=10, **(b)** PM with TD, **(c)** PM with proposed model **(d)** YK with K=10, **(e)** YK with TD, **(f)** YK with proposed model, **(g)** PM with K=10, **(h)** PM with TD, **(i)** PM with proposed model.

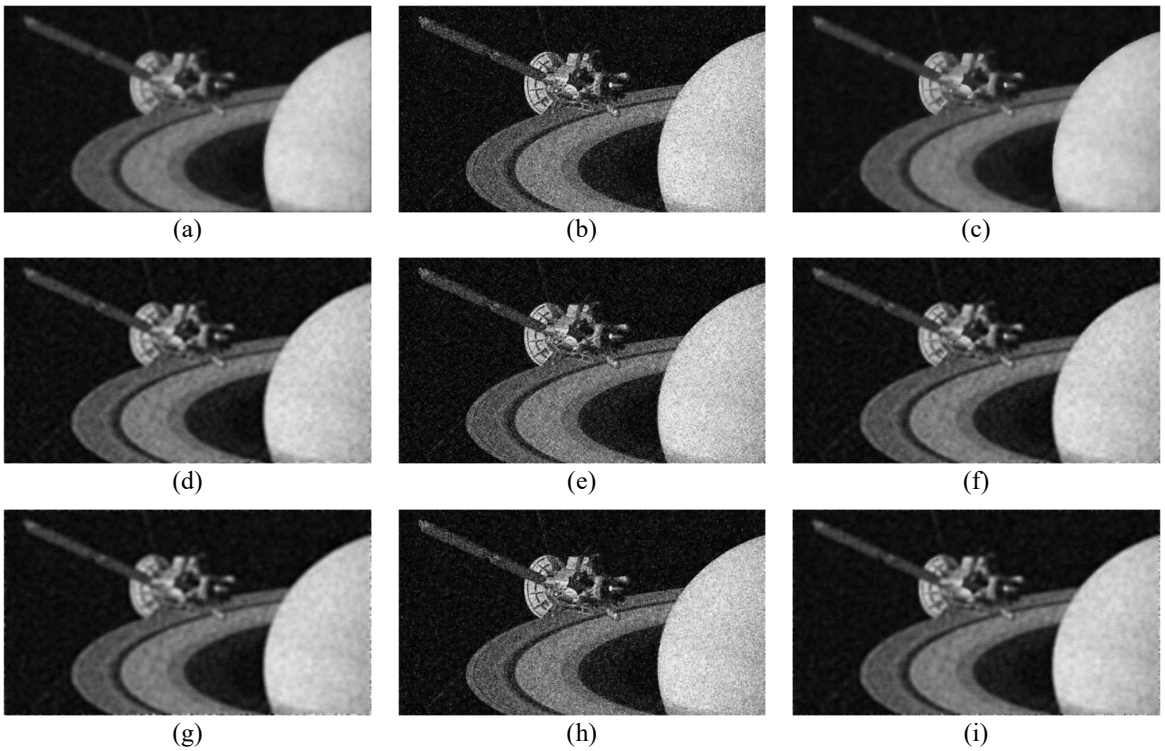


Figure 9. ADF results of the first noisy images (σ^2=40), **(a)** PM with K=75, **(b)** PM with TD, **(c)** PM with proposed model **(d)** YK with K=75, **(e)** YK with TD, **(f)** YK with proposed model, **(g)** PM with K=75, **(h)** PM with TD, **(i)** PM with proposed model.

The results of denosing for the first astronomical image with σ2 = 20 and σ2 = 40 gauss noise in Fig. 6(a) and Fig. 7(a) are given in Figs. 8 and 9. The rows contain the PM, YK, and HS results, respectively. The first column contains the results where the threshold value is constant and K = 10 for Fig. 8 and K = 75 for Fig. 9. In the second column, the K value is calculated with the TD approach, while in the third column it is calculated with the proposed method. In addition, the results of SSIM and PNSR obtained with PM,

YK, and HS at all noise levels of the image in Fig. 2(a) are included in Fig. 10. Both visual evaluations and results of SSIM and PSNR show that the PM approach has yielded very successful results. Also, in the graphs of the three denoising techniques, it is seen that the results obtained with the proposed threshold value approach are quite successful. The most successful results at all noise levels for PM, YK, and HS ADF techniques are obtained using the K threshold value determined by the proposed approach. Although the threshold values determined with the TD approach or selected as constant produce similar results with the proposed approach at various noise levels, they are negatively affected by the noise level change.

The visual evaluation of denoising success has been made with a perspective that has not been included in previous studies. The edge images for Figs. 8 and 9 detected by the LoG technique are shown in Figs. 11 and 12, respectively. The LoG technique is highly affected by noise when detecting edges and makes it very easy to identify noisy areas [26]. According to the results in Figs. 11 and 12, the success of the results using the proposed method is quite satisfactory in both high and low noise variances.

For the second astronomical noisy image with $\sigma^2 = 20$ and $\sigma^2 = 40$, denoising results are shown in Figs. 13 and 14. According to the SSIM and PSNR results in Fig. 15, it can be found that threshold values calculated with the proposed method get better denoising performance than the values of selected constant or calculated with the TD approach. Edge detection results using LoG technique in Figs. 16 and 17 show the proposed method more successfully than TD method. Moreover, the proposed method produces similar results with optimally selected constant values. It can be said that the proposed model in terms of noise reduction in visual evaluations is quite successful. The denoising results of the third noisy astronomical image ($\sigma^2 = 20$ and $\sigma^2 = 40$) are included in Figs. 18 and 19. Although SSIM results in Fig. 20(a-c) are quite similar for K values calculated by the proposed and TD methods, PSNR results in Fig. 20(d-f) show that the proposed approach is more successful. In addition, with the help of both SSIM and PSNR graphics, it is seen that the proposed approach is successful in all noise variances. The images in Figs. 21 and 22, which are used to make the visual assessment more specific, show that the proposed method has better noise removal and edge protection performance than the TD approach. In addition, the results of the proposed method are quite similar to those obtained with constant K values, as in the first two astronomical images. Examination of the experimental results shows the superiority of the proposed method. However, it is known that more effective results are obtained with neural network studies, which have become popular in recent years (Türk et al., 2020; Türk et al., 2019). In future studies, the proposed method should be integrated with neural network models to achieve more successful results and work with medical images.

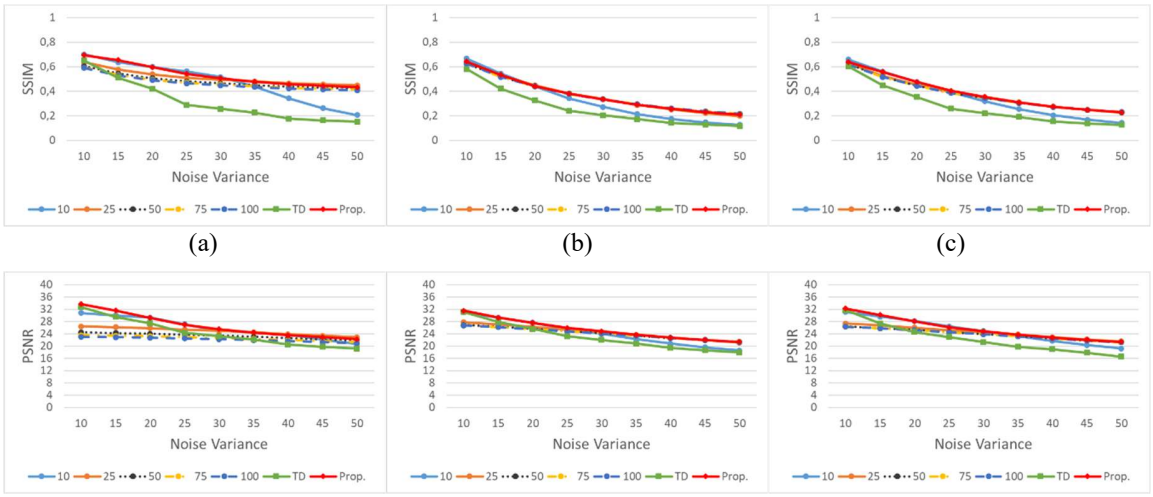


Figure 10. PSNR and SSIM results for denosing of the first noisy images. **(a)** SSIM results of PM. **(b)** SSIM results of YK. **(c)** SSIM results of HM. **(d)** PSNR results of PM. **(e)** PSNR results of YK. **(f)** PSNR results of HM.

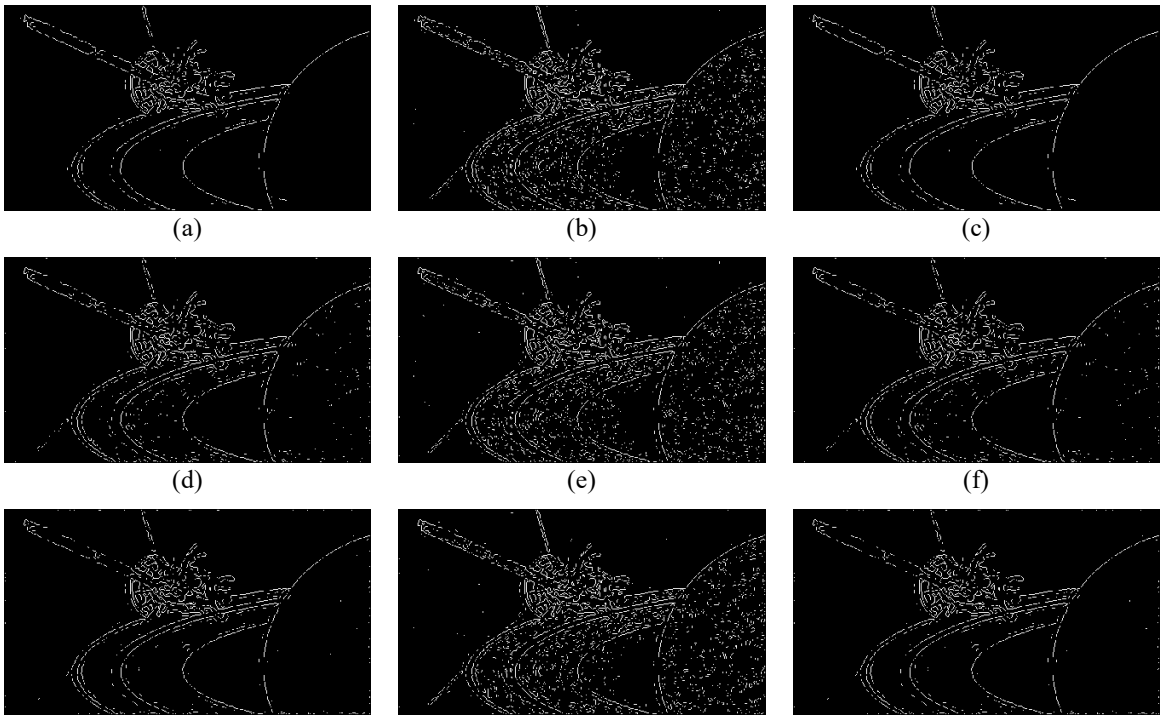


Figure 11. LoG Edge Detection results of denoised images in Fig. 8 (σ^2=20). **(a)** PM with K=10, **(b)** PM with TD, **(c)** PM with proposed model **(d)** YK with K=10, **(e)** YK with TD, **(f)** YK with proposed model, **(g)** PM with K=10, **(h)** PM with TD, **(i)** PM with proposed model.

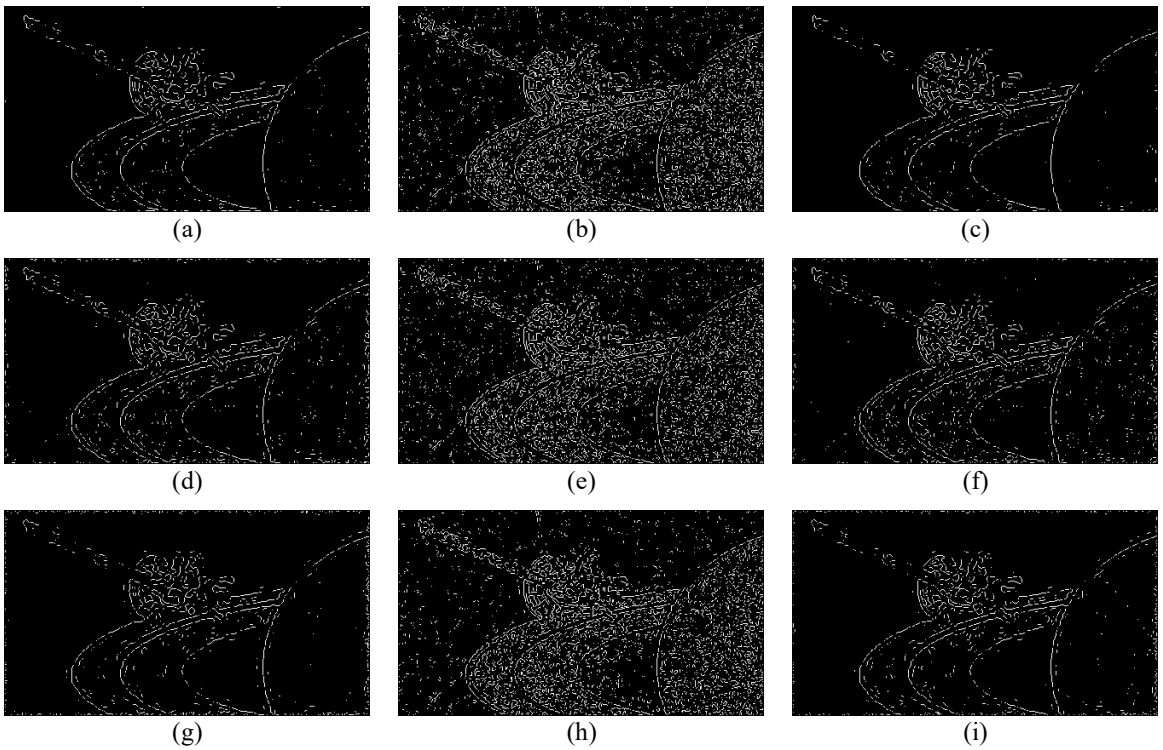
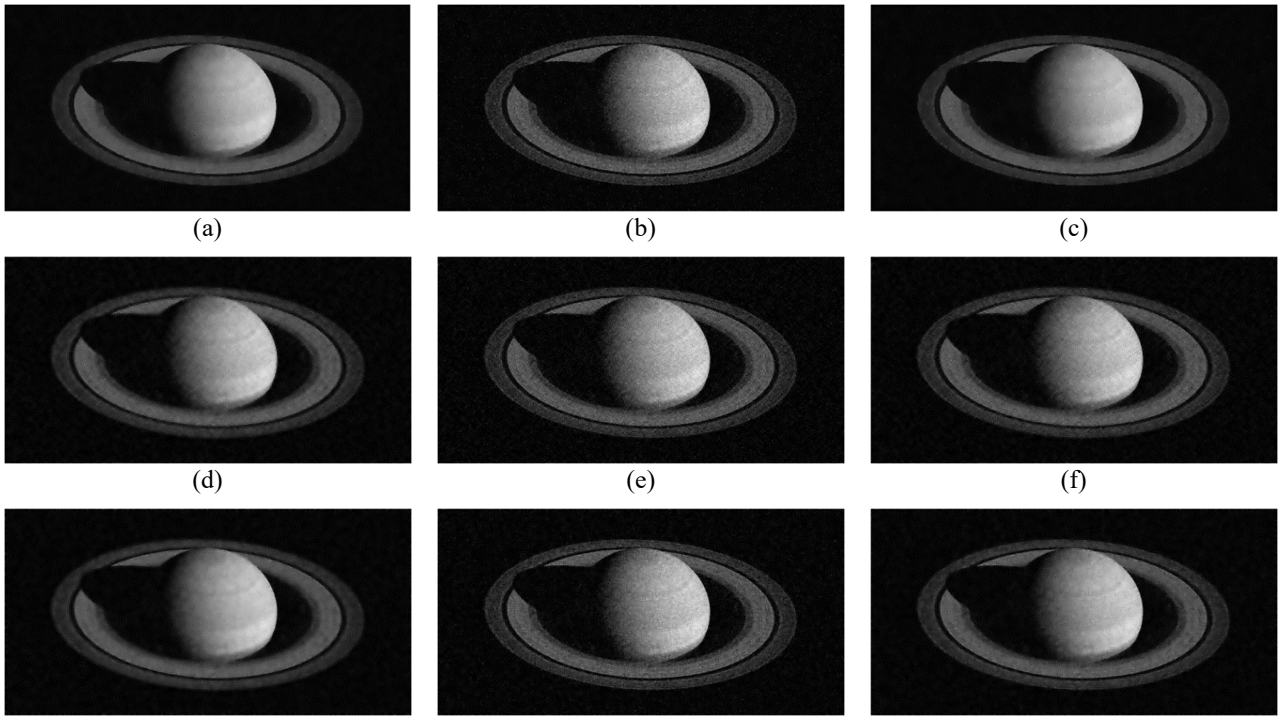


Figure 12. LoG Edge Detection results of denoised images in Fig. 9 (σ^2=40). **(a)** PM with K=75, **(b)** PM with TD, **(c)** PM with proposed model **(d)** YK with K=75, **(e)** YK with TD, **(f)** YK with proposed model, **(g)** PM with K=75, **(h)** PM with TD, **(i)** PM with proposed model.

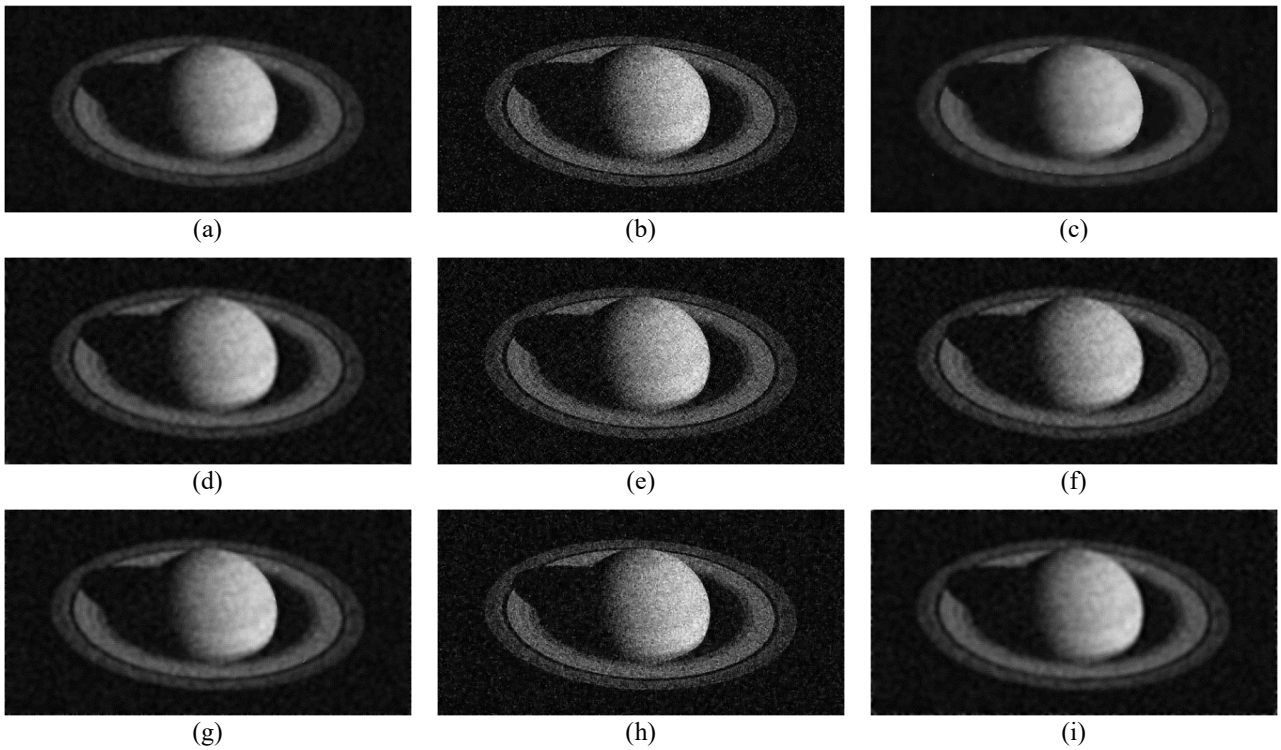


(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

(g) (h) (i)

Figure 13. ADF results of the second noisy images (σ^2=20), **(a)** PM with K=10, **(b)** PM with TD, **(c)** PM with proposed model **(d)** YK with K=10, **(e)** YK with TD, **(f)** YK with proposed model, **(g)** PM with K=10, **(h)** PM with TD, **(i)** PM with proposed model.



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

(g) (h) (i)

Figure 14. ADF results of the second noisy images (σ^2=40), **(a)** PM with K=75, **(b)** PM with TD, **(c)** PM with proposed model **(d)** YK with K=75, **(e)** YK with TD, **(f)** YK with proposed model, **(g)** PM with K=75, **(h)** PM with TD, **(i)** PM with proposed model.

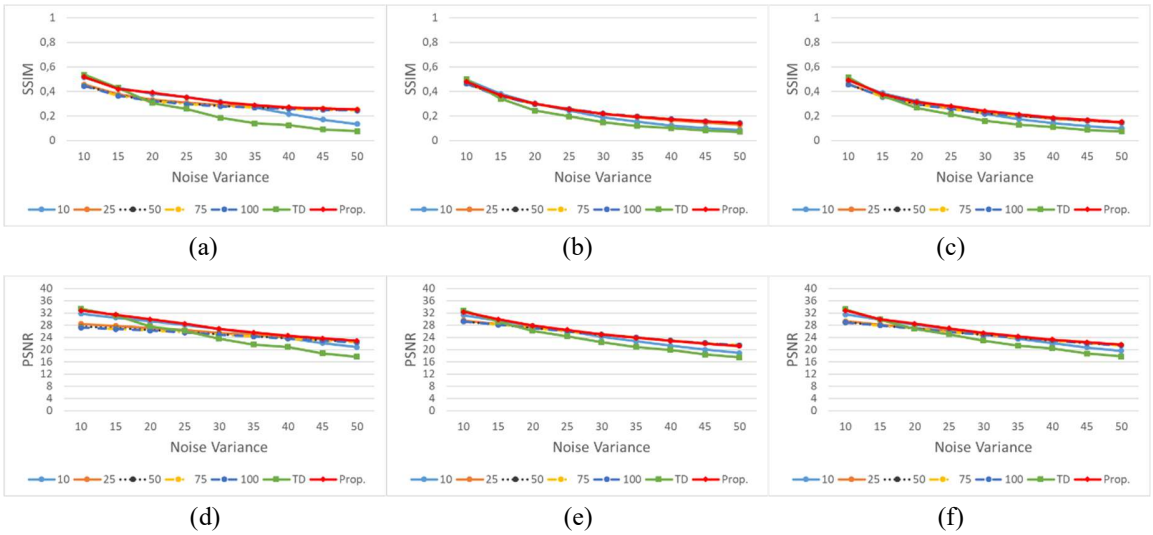


Figure 15. PSNR and SSIM results for denosing of the second noisy images. **(a)** SSIM results of PM. **(b)** SSIM results of YK. **(c)** SSIM results of HM. **(d)** PSNR results of PM. **(e)** PSNR results of YK. **(f)** PSNR results of HM.

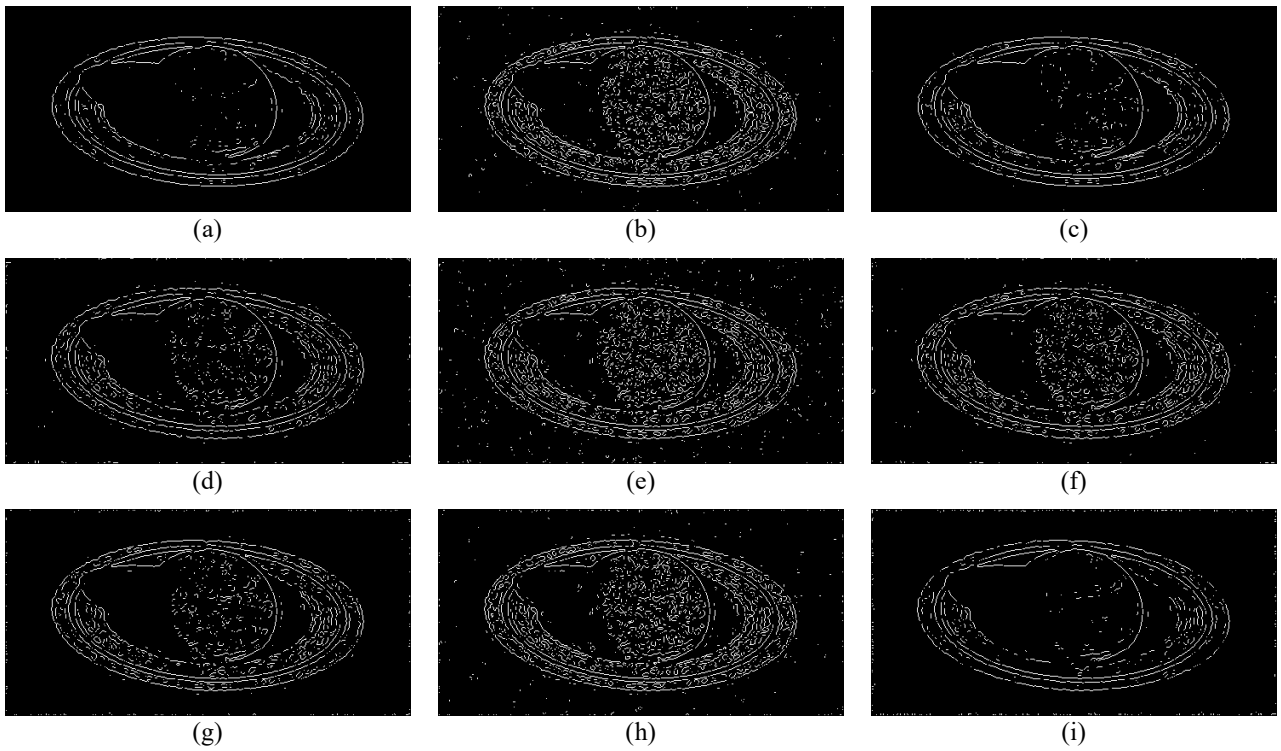


Figure 16. LoG Edge Detection results of denoised images in Fig. 13 (σ^2=20). **(a)** PM with K=10, **(b)** PM with TD, **(c)** PM with proposed model **(d)** YK with K=10, **(e)** YK with TD, (f) YK with proposed model, **(g)** PM with K=10, **(h)** PM with TD, (i) PM with proposed model.

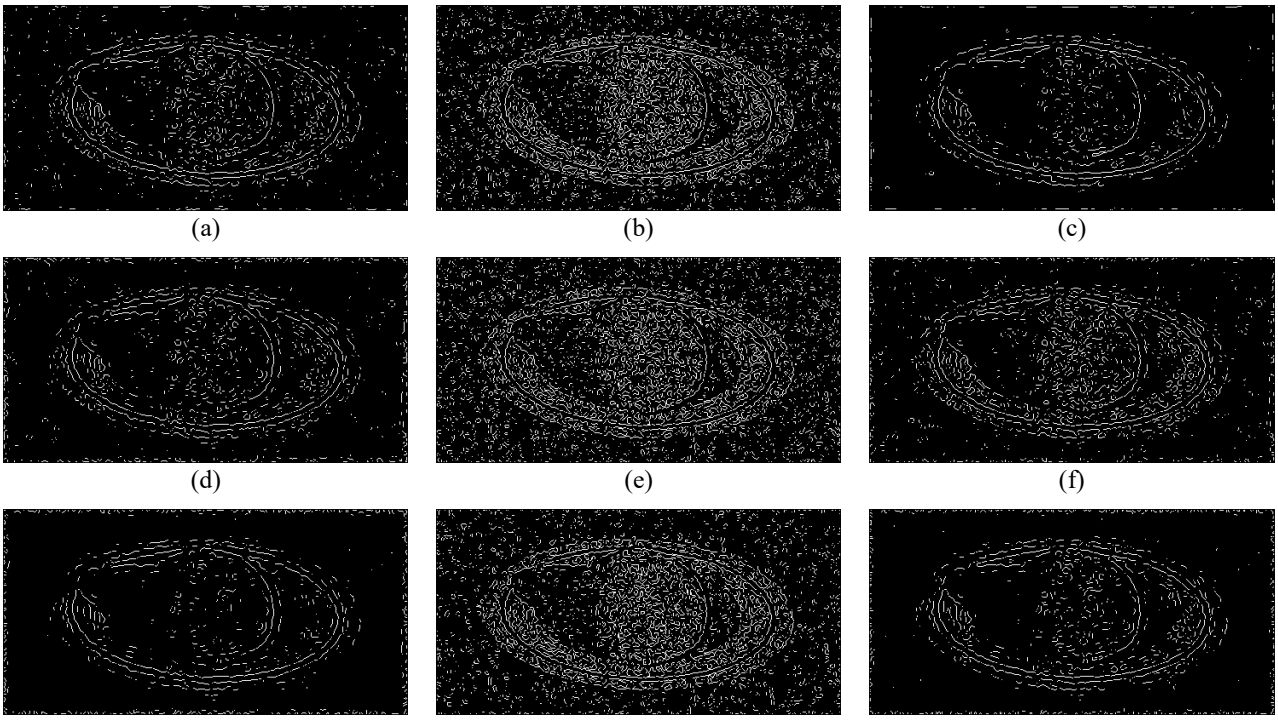


Figure 17. LoG Edge Detection results of denoised images in Fig. 14 (σ^2=40). **(a)** PM with K=75, **(b)** PM with TD, **(c)** PM with proposed model **(d)** YK with K=75, **(e)** YK with TD, **(f)** YK with proposed model, **(g)** PM with K=75, **(h)** PM with TD, (i) PM with proposed model.

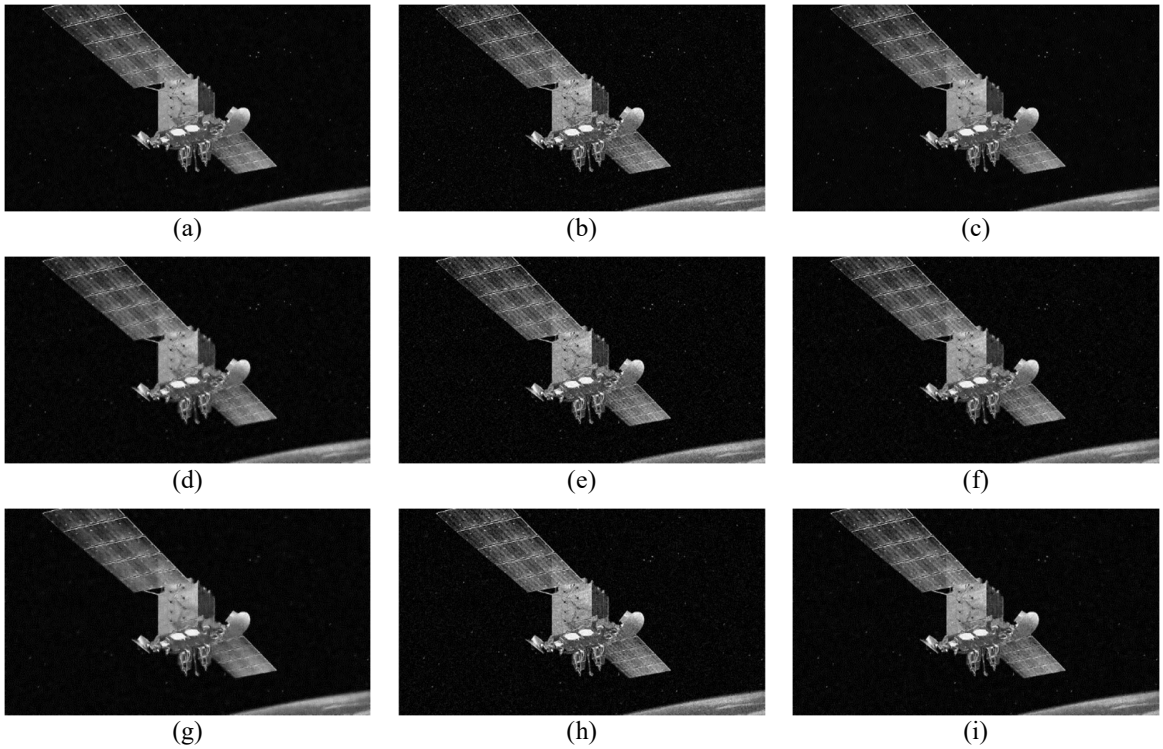


Figure 18. ADF results of the third noisy images (σ^2=20), **(a)** PM with K=10, **(b)** PM with TD, **(c)** PM with proposed model **(d)** YK with K=10, **(e)** YK with TD, **(f)** YK with proposed model, **(g)** PM with K=10, **(h)** PM with TD, **(i)** PM with proposed model.

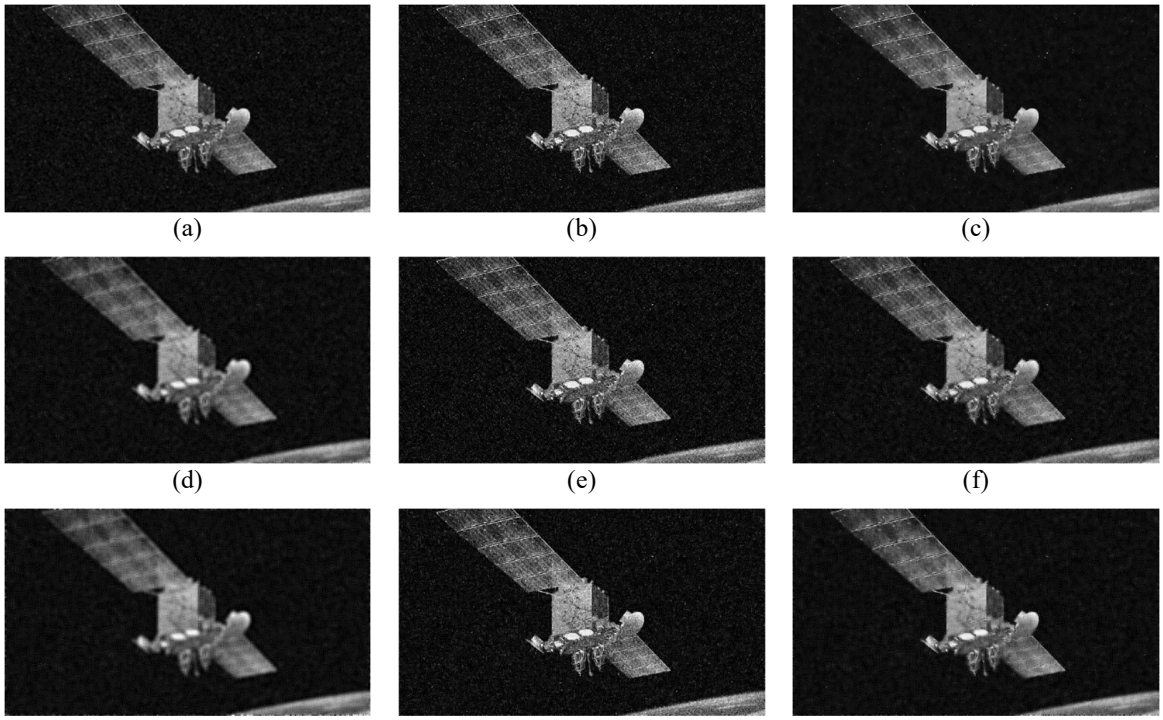


Figure 19. ADF results of the third noisy images (σ^2=40), **(a)** PM with K=75, **(b)** PM with TD, **(c)** PM with proposed model **(d)** YK with K=75, **(e)** YK with TD, **(f)** YK with proposed model, **(g)** PM with K=75, **(h)** PM with TD, **(i)** PM with proposed model.

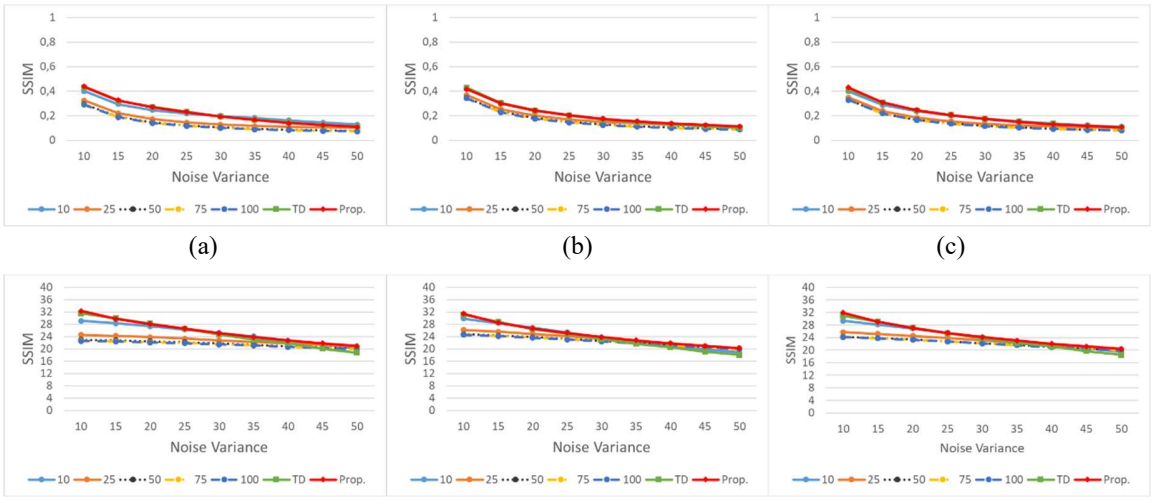


Figure 20. PSNR and SSIM results for denosing of the third noisy images. **(a)** SSIM results of PM. **(b)** SSIM results of YK. **(c)** SSIM results of HM. **(d)** PSNR results of PM. **(e)** PSNR results of YK. **(f)** PSNR results of HM.

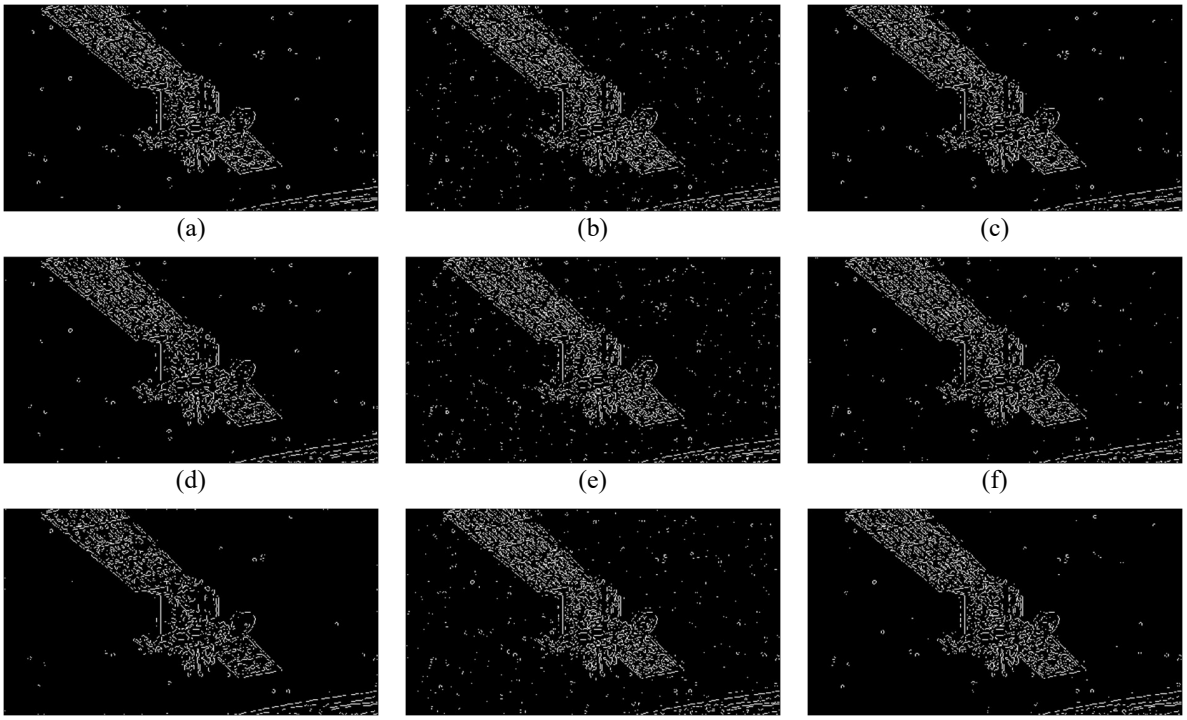


Figure 21. LoG Edge Detection results of denoised images in Fig. 18 (σ^2=20). **(a)** PM with K=10, **(b)** PM with TD, **(c)** PM with proposed model **(d)** YK with K=10, **(e)** YK with TD, **(f)** YK with proposed model, **(g)** PM with K=10, **(h)** PM with TD, **(i)** PM with proposed model.

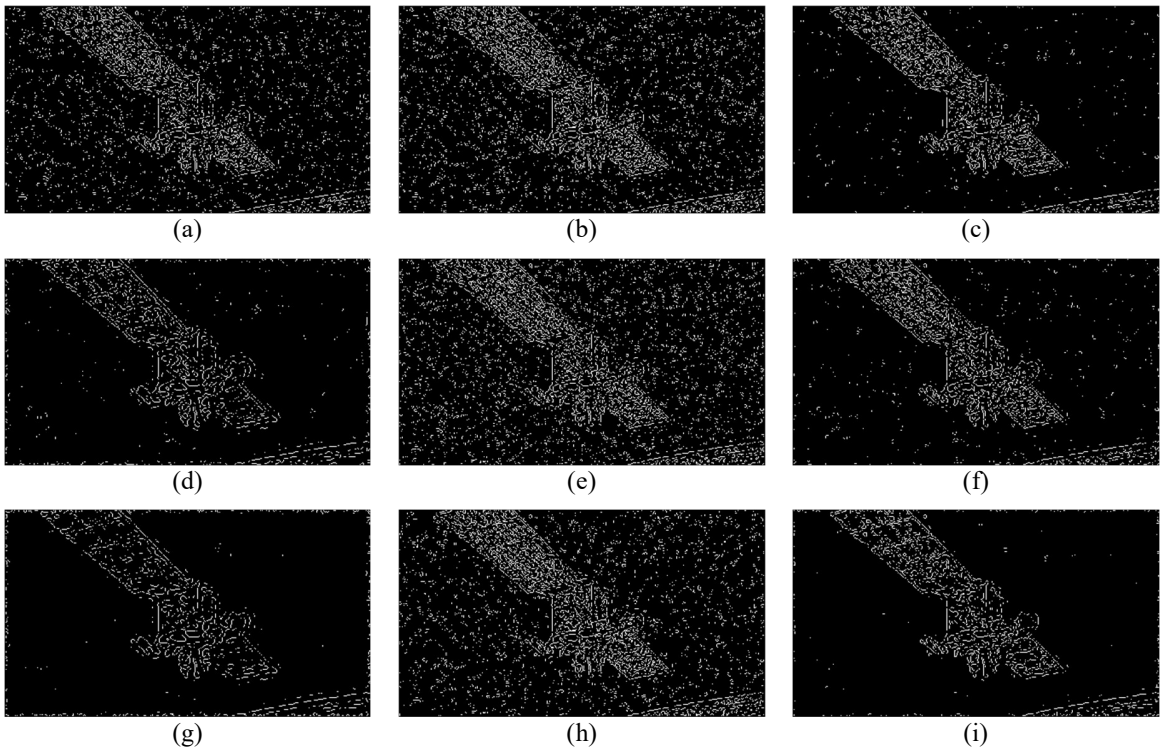


Figure 22. LoG Edge Detection results of denoised images in Fig. 19 (σ^2=40). **(a)** PM with K=75, **(b)** PM with TD, **(c)** PM with proposed model **(d)** YK with K=75, **(e)** YK with TD, **(f)** YK with proposed model, **(g)** PM with K=75, **(h)** PM with TD, **(i)** PM with proposed model.

4. Conclusion

In this study, a new adaptive method based on dissimilarity of pixels is proposed to determine the diffusion threshold value of anisotropic diffusion filters. In the proposed model, pixel dissimilarity is introduced to general ADFs. With the help of this model, it is no longer necessary for the user to determine a threshold value or to select different threshold values by trial and error. The proposed approach is tested using both conventional and fourth order ADFs. According to the experimental results, the threshold values determined adaptively with the help of the proposed method have the most successful denoising performance in all noise variances, while also protecting the edges. It is planned that the proposed approach in future studies will be applied on medical images by increasing the effectiveness of neural network structures.

Referanslar

Aja-Fernández, S., & Alberola-López, C. (2006). On the estimation of the coefficient of variation for anisotropic diffusion speckle filtering. *IEEE Transactions on Image Processing*, *15*(9), 2694-2701.

Ali, H. (2013). Fast Color Edge Detection Algorithm Based on Similarity Relation Matrix. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, *10*(5), 108.

Aydın, M., Hardalaç, F., Ural, B., & Karap, S. (2016). Neonatal jaundice detection system. *Journal of medical systems*, *40*, 1-11.

Barbu, T. (2016). A hybrid nonlinear fourth-order PDE-based image restoration approach. 2016 20th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC),

Charbonnier, P., Blanc-Feraud, L., Aubert, G., & Barlaud, M. (1994). Two deterministic half-quadratic regularization algorithms for computed imaging. Proceedings of 1st international conference on image processing,

Demirci, R. (2007). Similarity relation matrix-based color edge detection. *AEU-international Journal of Electronics and Communications*, *61*(7), 469-477.

Demirci, R., Guvenc, U., & Tanyeri, U. (2012). Anisotropic diffusion filter without conductivity parameters. 2012 16th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC),

Demirci, R., & Tanyeri, U. (2012). Anisotropic diffusion filter using Haar wavelet. 2012 16th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC),

Deng, L., Zhu, H., Yang, Z., & Li, Y. (2019). Hessian matrix-based fourth-order anisotropic diffusion filter for image denoising. *Optics & Laser Technology*, *110*, 184-190.

Gao, L., Yao, D., Li, Q., Zhuang, L., Zhang, B., & Bioucas-Dias, J. M. (2017). A new low-rank representation based hyperspectral image denoising method for mineral mapping. *Remote sensing*, *9*(11), 1145.

Guvenc, U., Elmas, C., & Demirci, R. (2008). Automatic Segmentation of Color Images. *JOURNAL OF POLYTECHNIC-POLITEKNIK DERGISI*, *11*(1), 9-12.

Hajiaboli, M. R. (2009). A self-governing hybrid model for noise removal. Advances in Image and Video Technology: Third Pacific Rim Symposium, PSIVT 2009, Tokyo, Japan, January 13-16, 2009. Proceedings 3,

Ham, B., Min, D., & Sohn, K. (2012). Robust scale-space filter using second-order partial differential equations. *IEEE Transactions on Image Processing*, *21*(9), 3937-3951.

Incelas, M. O., Demirci, R., Yavuzcan, H. G., Tanyeri, U., & Veske, E. (2014). Seeded region growing based detection of cells in fish blood stained with Natt-Herrick. 2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU),

Incetas, M. O., Demirci, R., & Yavuzcan, H. G. (2014). Automatic segmentation of color images with transitive closure. *AEU-international Journal of Electronics and Communications*, *68*(3), 260-269.

INCETAS, M. O., Demirci, R., & YAVUZCAN, H. G. (2019). Automatic color edge detection with similarity transformation. *Gazi University Journal of Science*, *32*(2), 458-469.

İncetaş, Tanyeri, U., Kılıçaslan, M., Yakışır Girgin, B., & Demirci, R. (2017). Eşik Seçiminin Benzerliğe Dayalı Kenar Belirlemeye Etkisi. 1st International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, Tokat/Turkey.

İncetaş, M. O., & Uçar, M. (2021, 16-18 May). *İğnecikli sinir ağina dayali benzerlik dönüşümü* ISPEC 10th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING & NATURAL SCIENCES, Siirt/Turkey.

İncetaş, M. O., VESKE, E., Nesrin, E., & DEMİRCİ, R. (2017). Automatic cells counting in Natt-Herrick stained fish blood. *Aquaculture Studies*, *17*(3), 283-294.

Jain, P., & Tyagi, V. (2016). A survey of edge-preserving image denoising methods. *Information Systems Frontiers*, *18*, 159-170.

Perona, P., & Malik, J. (1990). Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, *12*(7), 629-639.

Rafsanjani, H. K., Sedaaghi, M. H., & Saryazdi, S. (2016). Efficient diffusion coefficient for image denoising. *Computers & Mathematics with Applications*, *72*(4), 893-903.

Rafsanjani, H. K., Sedaaghi, M. H., & Saryazdi, S. (2017). An adaptive diffusion coefficient selection for image denoising. *Digital Signal Processing*, *64*, 71-82.

Tanyeri, U., & Demirci, R. (2018). Wavelet-based adaptive anisotropic diffusion filter. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, *18*(4), 99-106.

Tsiotsios, C., & Petrou, M. (2013). On the choice of the parameters for anisotropic diffusion in image processing. *Pattern Recognition*, *46*(5), 1369-1381.

Türk, F., Lüy, M., & Barışçı, N. (2020). Kidney and renal tumor segmentation using a hybrid V-Net-based model. *Mathematics*, *8*(10), 1772.

Türk, F., Murat, L., & BARIŞÇI, N. (2019). Machine learning of kidney tumors and diagnosis and classification by deep learning methods. *International Journal of Engineering Research and Development*, *11*(3), 802-812.

Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, *13*(4), 600-612.

Weickert, J. (1998). *Anisotropic diffusion in image processing* (Vol. 1). Teubner Stuttgart.

Xu, J., Jia, Y., Shi, Z., & Pang, K. (2016). An improved anisotropic diffusion filter with semi-adaptive threshold for edge preservation. *Signal Processing*, *119*, 80-91.

You, Y.-L., & Kaveh, M. (2000). Fourth-order partial differential equations for noise removal. *IEEE Transactions on Image Processing*, *9*(10), 1723-1730.

Yu, J., Tan, J., & Wang, Y. (2010). Ultrasound speckle reduction by a SUSAN-controlled anisotropic diffusion method. *Pattern Recognition*, *43*(9), 3083-3092.

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

UMAGD, (2023) 15(2), 574-583.

10.29137/umagd.1272085

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Research Article

An Enterprise Data Privacy Governance Model: Security-Centric Multi-Model Data Anonymization

Yağmur Şahin[1] *, İbrahim Doğru[1]

[1] *Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Information Security Engineering, 06560, Ankara, TÜRKİYE*
[2] *Gazi University, IoTLab, Department of Computer Engineering, 06500, Ankara, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 29/03/2023* ***Kabul / Accepted**: 15/04/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Abstract

The increasing need for data privacy and the rising complexity of data environments necessitate robust data anonymization techniques to safeguard personal and sensitive information. A multi-model approach to data anonymization can strike an optimal balance between privacy protection and data utility, integrating techniques such as data masking, differential privacy, machine learning algorithms, blockchain technology, and data encryption. This article introduces a Security-Centric Enterprise Data Anonymization Governance Model, a structured framework for managing data privacy across healthcare, finance, and government industries. The model ensures adherence to best practices and compliance with legal and regulatory requirements. The article addresses challenges in implementing data anonymization techniques, including maintaining data utility and preventing re-identification, by advocating for a multi-model approach that combines various technologies and methods. We suggest that by adopting this holistic approach, organizations can enhance their data protection measures and foster a culture of data privacy.

Key Words

"Data privacy, data anonymization, multi-model approach, data utility, data governance"

***Corresponding Author:** ygmrrshnn@gmail.com*

1.Introduction

Institutions in a variety of industries, including healthcare, finance, and government, deal with sensitive data concerning individuals and entities. The data is frequently used for research and analysis, and the insights gained from such analysis can be useful in shaping policy decisions and driving innovation.

Nonetheless, the use of these data raises significant privacy concerns, and institutions must take the necessary precautions to protect sensitive information from unauthorized access or misuse. Among these measures is the utilization of data anonymization techniques.

Recent studies indicate that data breaches are on the rise, with an increase of 62% in 2020 compared to 2022, resulting in 1,862 data compromises and approximately 422.1 million individuals affected in the United States alone (Statista, 2023). This highlights the urgency for organizations to adopt robust data privacy measures to safeguard sensitive information.

Various methods, including surveys, interviews, and data analytics, are used by organizations dealing with sensitive data. These techniques provide organizations with valuable insights into individuals and entities, enabling them to better comprehend trends and behaviors. However, these methods also present significant risks in the data collection phase and in regard to protection.

Data privacy through anonymization is a critical aspect of information management, and institutions must take proactive steps to ensure data is adequately protected. While data analysis is vital for institutional growth, protecting individual privacy is equally important.

Data anonymization is an approach to safeguarding data privacy, which involves removing identifying information from data sets while maintaining usability.

In this article, we will explore a security-centric enterprise data privacy governance model and explain how this approach can protect sensitive information while still allowing to facilitate data utility and data analysis.

The security-centric data anonymization governance model is a framework that outlines the various steps involved in managing data privacy. It encompasses everything from defining data privacy requirements to implementing technical and administrative controls. This multi-model provides a structured approach to data privacy management, ensuring that institutions adhere to best practices and meet legal and regulatory requirements.

We suggest that by implementing this model, enterprises can establish a culture of data privacy and integrate data protection into all aspects of their operations.

This paper is organized as follows: Section 2 offers a background overview; Section 3 examines relevant literature; Section 4 presents the proposed methodology; Section 5 reports the results; Section 6 showcases a hypothetical scenario employing a multi-model approach; Section 7 engages in a discussion of the study's outcomes; Section 8 addresses the study's limitations and provides recommendations for future research; and finally, Section 9 concludes the paper.

2.Background

Anonymization can be achieved through various methods, including aggregation, generalization, and masking (Lubarsky, 2010; Samarati & Sweeney, 1998).

While data anonymization is an important tool for protecting privacy, it presents significant obstacles that must be overcome to ensure its efficacy. The difficulty of completely removing all identifying information from a dataset is one of the greatest obstacles to data anonymization. In some cases, it may be possible to identify individuals based on seemingly innocuous information, such as their age, gender, or geographic location (El Emam et al., 2011). To address this challenge, data anonymization techniques must be carefully designed to ensure that all identifying information is removed or altered in a way that prevents re-identification.

Removing or altering data can make it less useful for analysis and may result in incomplete or inaccurate results. Therefore, data anonymization techniques must be carefully designed to balance privacy protection with data quality and utility when anonymizing data. It is important that anonymized data sets are still usable for analysis while protecting the confidentiality of the data.

To achieve this, organizations can use various techniques, such as differential privacy, which allows for more precise control over the amount of information that is removed or altered (Nyugen, 2019).

Additionally, the studies show anonymized datasets are still vulnerable to data breaches, which can compromise the privacy of individuals even if their identifying information has been removed (Ohm, 2009). Therefore, data anonymization techniques must be combined with robust data security measures, such as encryption and access controls, to ensure that anonymized data is protected from unauthorized access.

To overcome these challenges and ensure effective data anonymization, organizations must adopt a comprehensive approach to data privacy management (Kalloniatis et al., 2013).

For these and similar reasons, clearly defined boundaries, approaches, and multi-model solutions are needed.

3.Related Works

Multi-model applications refer to software applications that can work with multiple data models and sources simultaneously (Lu & Holubová, 2019).

In the context of the Enterprise Data Privacy Governance Model and data anonymization, multi-model applications can provide a powerful tool for managing complex data environments while protecting the privacy of individuals.

One of the key benefits of multi-model applications in the context of data privacy is their ability to aggregate and anonymize data from multiple sources. This is particularly important for organizations that collect data from a variety of different sources, as it allows them to consolidate this data and apply anonymization techniques uniformly across all sources (Jiang & Torra, 2022).

Multi-model applications for enterprise data privacy governance models and data anonymization could include a combination of techniques and technologies that work together to protect and anonymize sensitive data appropriately. If we need to list the general lines of these approaches:

- Data masking and tokenization: These techniques involve replacing sensitive data with fictitious values or tokens to anonymize it. A multi-model approach might combine these techniques with other data anonymization methods, such as data perturbation or aggregation (Tachepun & Thammaboosadee, 2020).

- Differential privacy: This is a privacy-enhancing technique that involves adding random noise to data so that it becomes more difficult to identify individuals. A multi-model approach might use differential privacy in combination with other techniques to achieve greater privacy protection (Nyugen, 2019).

- Machine learning algorithms: These can be used to automatically identify and classify sensitive data in a dataset. A multi-model approach might use a combination of supervised and unsupervised machine learning algorithms to identify and protect sensitive data (Mahmood & Jusas, 2022).

- Blockchain technology: This can be used to create a tamper-proof and transparent record of data access and usage, which can help ensure data privacy and compliance. A multi-model approach might combine blockchain technology with other techniques to create a comprehensive data governance model (Kshetri, 2018).

- Data encryption: This is a method of encoding data so that it can only be accessed by authorized parties. A multi-model approach might use encryption in combination with other techniques to provide a multi-layered approach to data privacy (Muhasin et al., 2016).

We suggest that combining these approaches with anonymization techniques further strengthens their effectiveness. It is essential to recognize that each approach possesses its own unique advantages and limitations, and the optimal balance achieved through their integration creates a better effective defense mechanism.

4.Methodology

Data anonymization is the process of removing or obscuring identifying information from datasets, thereby protecting individuals' privacy and reducing the risk of data breaches.

The data anonymization lifecycle involves several stages, including data collection, preparation, transformation, and evaluation. Data anonymization can be applied using many methods, such as k-anonymity, l-diversity, and t-closeness, each of which provides different levels of protection and utility for the data (Sweeney, 2002; Machanavajjhala et al., 2007).

In light of related research, we divided the data anonymization lifecycle into several key stages:

Stage I: The first stage entails identifying the data that must be anonymized, including the types of data and specific fields containing identifying information. This stage necessitates a thorough understanding of the data and its application and familiarity with any applicable data protection regulations.

Stage II: The second stage of the data anonymization lifecycle entails determining the best anonymization method. There are several methods for anonymizing data, including k-anonymity, l-diversity, and t-closeness, each of which provides varying levels of data protection and utility (Zhou & Pei, 2011). Enterprises must select the appropriate method based on the specific data to be anonymized and the level of privacy protection desired (LeFevre et al., 2006).

Stage III: The implementation of the anonymization process is the third stage of the data anonymization lifecycle. This may entail creating and implementing algorithms to perform anonymization, as well as creating policies and procedures to ensure data security throughout the process (Cavoukian & Jonas, 2011). In this stage, enterprises must also ensure that the anonymization process does not have a negative impact on the data's utility, as this can reduce the data's usefulness for analysis and decision-making (Mackey et al., 2016).

Stage IV: The final stage is data evaluation, in which organizations attempt to re-identify individuals from anonymized data to test the effectiveness of the anonymization process (Mourby et al., 2018). This stage entails evaluating the anonymized data's quality and utility, such as the accuracy of statistical analysis and the data's usefulness for the intended purpose (Xu et al., 2006).

The data anonymization lifecyle illustration is presented below to show how these stages appear in practice:

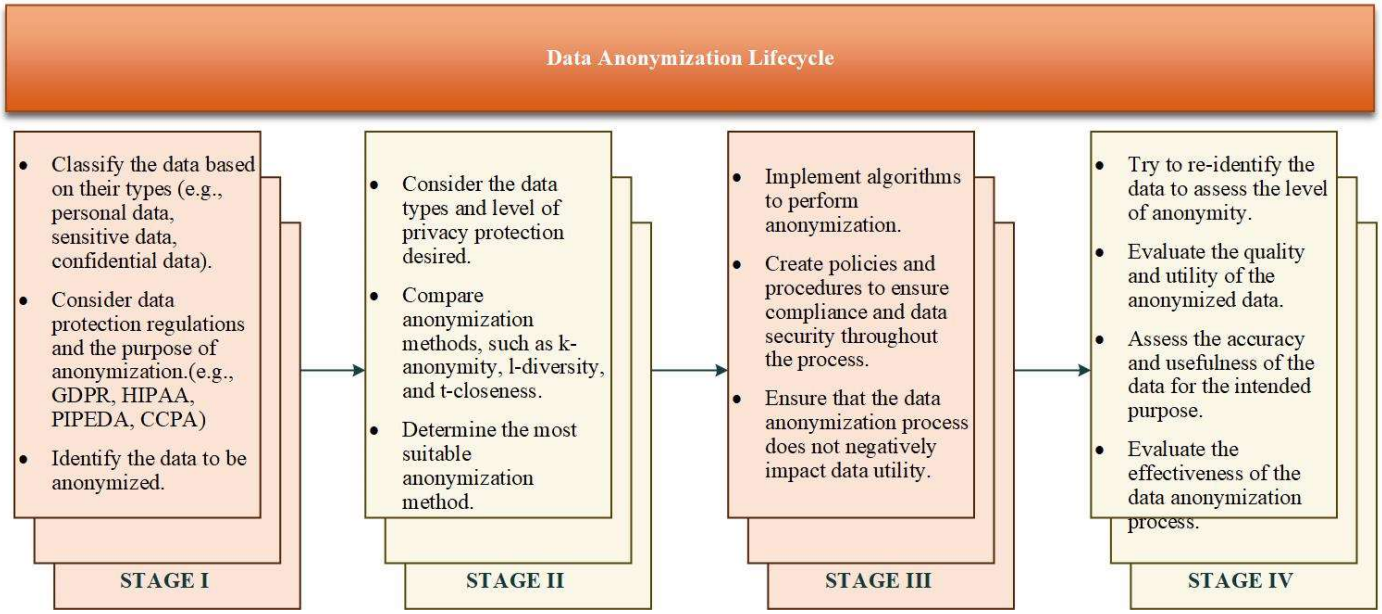


Figure 1. Data anonymization lifecycle stages

When anonymizing data, organizations must also comply with data protection regulations such as GDPR (General Data Protection Regulation) and CCPA (California Privacy Act). This includes making certain that anonymized data cannot be used to identify individuals and that individuals have the right to request that their personal data be deleted (ICO, 2023).

For example, the General Data Protection Regulation (GDPR) in the European Union requires organizations to anonymize personal data before using it for research, statistical analysis, or other purposes. The purpose of this regulation is to protect the fundamental right to privacy and to prevent the misuse of personal data (Directive 95/46/EC, 2018). Similarly, the Health Insurance Portability and Accountability Act (HIPAA) in the United States requires healthcare organizations to de-identify protected health information (PHI) before using it for research or other purposes (HIPAA, 2003).

Furthermore, many other countries have similar data protection laws, such as Singapore's Personal Data Protection Act, Australia's Privacy Act, and Canada's Personal Information Protection and Electronic Documents Act (PIPEDA). All of these laws require organizations to protect personal data by implementing data anonymization techniques.

5.Results

In today's digital world, data is a valuable asset for organizations, and protecting it has become a top priority. By anonymizing data, organizations are able to remove personally identifiable information from datasets, making it more difficult for unauthorized parties to identify individuals in the data. However, anonymization alone may not be enough to protect data from cyber threats. To ensure the security and confidentiality of anonymized data, organizations must implement additional technical and organisational measures. As

mentioned briefly in the introduction, organizations can implement several cybersecurity measures in conjunction with data anonymization to protect data. The most effective strategy is to combine their common uses.

A real-world example of the risks associated with inadequate cybersecurity measures in anonymization is the 2018 MyFitnessPal data breach. In this incident, the personal information, including usernames, email addresses, and hashed passwords, of approximately 150 million users was stolen. Although the passwords were hashed, the attackers were able to access sensitive user data by using brute force methods due to a lack of appropriate cybersecurity measures (MyFitnessPal data breach, 2018).

This incident emphasizes the importance of strong cybersecurity measures in the anonymization process to prevent unauthorized access and potential re-identification. To ensure the security of anonymized data, organizations must implement a combination of technical and procedural safeguards, such as access controls, encryption, and regular security audits. Furthermore, employee training and awareness programs can help to foster a cybersecurity culture within an organization while reducing the risk of human error or insider threats (NIST, 2017).

The best way to assimilate the multi-model approach is to follow the steps to prevent potential threats through scenarios. We can have an empowered approach if we follow this process sequentially and include data anonymization processes.

In 2018, the National Institutes of Health (NIH) launched a new initiative called the All of Us Research Program. This program aims to collect health data from one million participants to help advance precision medicine. To protect participants' privacy, the NIH uses a combination of de-identification techniques, including removing direct identifiers such as names and addresses and modifying or removing certain data elements to further protect privacy (National Institutes of Health, 2022).

Below, we analyzed this healthcare sector scenario, where they are using de-identification techniques to protect patient privacy while allowing researchers to analyze medical data. We then integrated these stages with a security-centric approach and, finally, developed a hypothetical scenario to demonstrate the stages of the proposed security-focused multi-model data anonymization method.

- **Data Inventory and Classification:** The healthcare organization needs to first identify all the types of data it has collected and classify them based on the level of sensitivity. This process helps the organization to identify all the data that has been collected, including sensitive information, and determine the appropriate anonymization techniques to use for each type of data.

- **Data De-Identification:** The organization should employ appropriate de-identification techniques, such as removing personal identifiers such as names, addresses, and social security numbers or replacing them with pseudonyms. To further reduce the risk of re-identification, the organization should consider techniques such as data generalization or suppression. This stage involves applying appropriate de-identification techniques to remove or obscure personal identifiers to protect the privacy of individuals. Using pseudonyms, generalization, or suppression of data can help reduce the risk of re-identification.

- **Data Validation and Quality Control:** The organization should validate the anonymization process's effectiveness by testing the data for any potential re-identification risks. This can be accomplished through the use of statistical methods or other tools that assess the level of risk for re-identification. Quality control measures should also be implemented to ensure the de-identified data is accurate and reliable.

- **Secure Storage and Access Controls:** The de-identified data should be stored securely, with access controls in place to limit who can view or access the data. This can include physical controls such as secure storage rooms or electronic controls such as passwords or biometric authentication. By storing the data securely and implementing access controls, the organization can limit who can access the data and prevent unauthorized disclosure.

Some cyber security techniques can also be applied at each stage of the data anonymization process. Incorporating these processes into the data anonymization steps ensures that all of these steps have consistent security stages.

5.1 Introducing Security Centric Approach to the Data Anonymization Stages

- **Data Inventory and Classification:** Using Access Controls to limit who can view or access the data and implement network segmentation to isolate sensitive data from other parts of the network (Mohammady et al., 2021).

- **Data De-Identification:** Using Encryption to protect the data during the de-identification process and implement Data Masking or Tokenization techniques to further reduce the risk of re-identification (Ajayi & Adebiyi, 2014).

- **Data Validation and Quality Control:** Using Vulnerability Scanning and Penetration Testing to identify any weaknesses in the de-identified data and implement Data Loss Prevention (DLP) tools to detect any unauthorized attempts to access or distribute the data (Kim & Kim, 2012).

- **Secure Storage and Access Controls:** Using Encryption and Secure Hashing to protect the data at rest and implement Role-Based Access Controls (RBAC) or Attribute-Based Access Controls (ABAC) to limit who can access the data (Jin et al., 2012).

Examples of methods that can be incorporated into anonymization stages with the security-centric multi-model approach is shown in the illustration below:

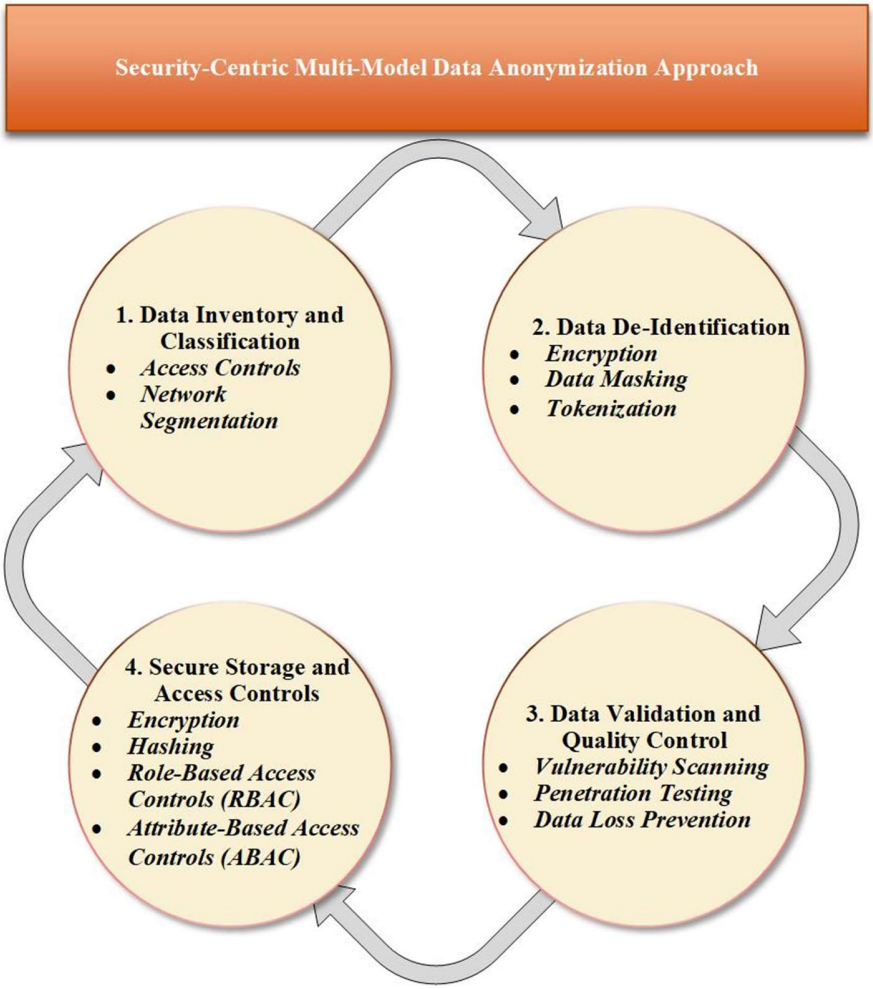


Figure 2. Security-Centric Multi-Model Data Anonymization Approach

In order to illustrate how well these processes can work together, we have incorporated them into the hypothetical scenario presented below. We will refer to the organization as "ABC Corporation."

6.A Hypothetical Scenario with a Security-Centric Multi-Model Approach

- Data Inventory and Classification–ABC Corporation begins by conducting a data inventory and classification to identify all data types and determine their sensitivity levels. The organization uses access controls to limit who can view or access the data and implements network segmentation to isolate sensitive data from other parts of the network. Additionally, ABC Corporation uses data loss prevention (DLP) tools to detect any unauthorized attempts to access or distribute the data.

- Data De-Identification–During the de-identification process, ABC Corporation employs encryption to safeguard the data. They implement data masking or tokenization techniques to further reduce the risk of re-identification. ABC Corporation uses techniques such as k-anonymity and differential privacy to guarantee that the data has been adequately de-identified.

- Data Validation and Quality Control–After de-identifying the data, ABC Corporation performs data validation and quality control to ensure the accuracy of the de-identified data. They use vulnerability scanning and penetration testing to identify any weaknesses

in the de-identified data. Additionally, ABC Corporation uses DLP tools to detect any unauthorized attempts to access or distribute the data.

- Secure Storage and Access Controls–ABC Corporation uses encryption and secure hashing to protect the data at rest. They implement role-based access controls (RBAC) or attribute-based access controls (ABAC) to limit who can access the data. ABC Corporation also performs regular audits to ensure that access controls are working appropriately.

We specified security parameters and hypothesized that "ABC Corporation" implemented the additional security measures outlined below:

- Access Controls–ABC Corporation uses Access Controls to limit who can view or access sensitive data. For example, only authorized employees with a legitimate business need can access confidential financial data.

- Network Segmentation–To further protect sensitive data, ABC Corporation has implemented Network Segmentation. This means that sensitive data is isolated from other parts of the network, making it more difficult for cyber criminals to access.

- Encryption–ABC Corporation uses Encryption to protect data during transmission and at rest. For example, sensitive data is encrypted when transmitted between servers or devices, and when stored on servers or devices.

- Data Masking–In order to further reduce the risk of data re-identification, ABC Corporation implements Data Masking. This means that sensitive data is replaced with random or fictitious data to conceal the original data. For example, instead of storing the actual social security number of an employee, the number could be masked by replacing it with a series of random numbers and letters.

- Tokenization–Similar to Data Masking, ABC Corporation also employs Tokenization techniques to further reduce the risk of re-identification. This involves replacing sensitive data with a unique token or identifier. For example, a credit card number could be replaced with a token that is only understood by authorized parties.

- Vulnerability Scanning–ABC Corporation uses Vulnerability Scanning to identify any weaknesses in their systems or processes that could be exploited by cyber criminals. For example, a regular vulnerability scan could identify an unpatched software vulnerability that needs to be addressed.

- Penetration Testing–In addition to vulnerability scanning, ABC Corporation also employs Penetration Testing to identify any weaknesses in their defenses. This involves a simulated cyber-attack that is conducted by an authorized third party to identify vulnerabilities that could be exploited by cybercriminals.

- Data Loss Prevention (DLP)–ABC Corporation uses Data Loss Prevention (DLP) tools to detect and prevent any unauthorized attempts to access or distribute sensitive data. For example, DLP tools could be configured to monitor all outgoing emails and prevent any emails containing sensitive data from being sent to unauthorized recipients.

ABC Corporation, as previously discussed, has implemented Security-Centric Multi-Model Approach to provide additional layers of security for their sensitive data. To protect their network and endpoints from cyber threats, they use a combination of technologies such as firewalls, intrusion detection systems, and anti-virus software. For example, they employ a next-generation firewall capable of detecting and blocking malicious traffic in real time.

We argue that ABC Corporation can reduce the risk of data breaches and unauthorized access to their data by implementing these methods.

7.Discussion:

The study results highlight the importance of a comprehensive and multi-model approach to data anonymization, particularly in the context of the Enterprise Data Privacy Governance Model. The favorable aspects of this approach include the ability to balance privacy protection with data quality and utility and the potential for increased effectiveness when combining various anonymization techniques and cybersecurity measures. This is in line with the literature, which emphasizes the need for holistic data privacy management to ensure compliance with legal and regulatory requirements *(Ohm, 2009)*.

However, the study also reveals some unfavorable aspects, such as the complexity of implementing multiple data anonymization techniques and the potential weaknesses of each technique. This underscores the importance of finding the right balance between these methods to create the most effective defense mechanism. Comparing the proposed security-centric multi-model approach with existing literature, it is evident that adopting a combination of techniques such as data masking, tokenization, differential privacy, machine

learning algorithms, blockchain technology, and data encryption offers a robust and holistic solution to data privacy challenges (Jiang & Torra, 2023; Tachepun & Thammaboosadee, 2020; Nyugen, 2019; Mahmood & Jusas, 2022; Kshetri, 2018).

In conclusion, the multi-model approach allows organizations to capitalize on the strengths of each technique while mitigating their weaknesses, ultimately providing a more effective solution for data privacy governance.

8.Study Limitations:

There are several limitations in this study that should be acknowledged. The study primarily focuses on a theoretical framework and hypothetical scenario, which may not fully capture the challenges that organizations face when implementing data anonymization techniques in real-world settings. Future studies could benefit from examining case studies or conducting empirical research to validate the proposed multi-model approach in practice.

9.Conclusion

Data privacy is a crucial aspect of modern organizations, especially as sensitive data plays a critical role in research, policymaking, and innovation. The security-centric enterprise data anonymization governance multi-model offers a comprehensive framework that enables institutions to manage data privacy effectively while ensuring compliance with legal and regulatory requirements. By adopting this model, organizations can create a data privacy culture that permeates all operations.

However, achieving effective data anonymization is a complex task, necessitating the use of various techniques to balance privacy protection with data quality and utility. A multi-model approach that combines methods such as data masking, tokenization, differential privacy, machine learning algorithms, blockchain technology, and data encryption can provide robust and holistic solutions to data privacy challenges. This approach allows organizations to harmonize their data privacy efforts, capitalizing on the strengths of each technique while mitigating their weaknesses. The model emphasizes the importance of assessing the organization's data privacy risk and implementing appropriate controls to mitigate these risks.

Ultimately, the combination of the security-centric enterprise data anonymization governance model and a multi-model approach to data anonymization can help organizations protect sensitive information while maintaining data utility for research and analysis. By doing so, institutions can strike the delicate balance between preserving individual privacy and leveraging data to drive innovation and growth.

References:

Ajayi, O. O., & Adebiyi, T. O. (2014). Application of Data Masking in Achieving Information Privacy. *IOSR Journal of Engineering,* 4(2), 13-21.

Cavoukian, A., & Jonas, J. (2011). Privacy by design: A framework for designing privacy into the new technologies. *Identity in the Information Society*, 4(1), 3-23. doi: 10.1007/s12394-010-0052-3

Directive 95/46/EC, (2016). Retrieved from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02016R0679-20160504&qid=1532348683434

El Emam, K., Jonker, E., Arbuckle, L., & Malin, B. (2011). A systematic review of re-identification attacks on health data. *Plos One,* 6(12), 28071. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0028071

HIPAA, (2017). De-identification standard, Retrieved from: https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2017-title45-vol1/pdf/CFR-2017-title45-vol1-sec164-514.pdf (accessed on 26 March 2023).

ICO, (2021). *How do we ensure anonymisation is effective?* https://ico.org.uk/media/about-the-ico/documents/4018606/chapter-2-anonymisation-draft.pdf (accessed on 26 March 2023).

IDStrong (2022). MyFitnessPal Breach: Learn About MyFitnessPal Hack. https://www.idstrong.com/sentinel/myfitnesspal-data-breach/ (accessed on 26 March 2023.)

Jassim, H., Atan, R., Jabar, M., & Abdullah, S. (2018). Factors and model for sensitive data management and protection in information systems' decision of cloud environment. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology,* 96, 8097–8108.

Jiang, L., & Torra, V. (2022). On the Effects of Data Protection on Multi-database Data-Driven Models, *Integrated Uncertainty in Knowledge Modelling and Decision Making,* 226–238.

Jin, X., Krishnan, R., & Sandhu, R. (2012). *A unified attribute-based access control model covering DAC, MAC and RBAC.* In Data and Applications Security and Privacy XXVI: 26th Annual IFIP WG 11.3 Conference, 26, 41-55.

Kalloniatis, C., Mouratidis, H., Vassilis, M., Islam, S., Gritzalis, S., & Kavakli, E. (2014). Towards the design of secure and privacy-oriented Information Systems in the Cloud: Identifying the major concepts. *Computer Standards & Interfaces,* 36(4), 759-775. https://doi.org/10.1016/j.csi.2013.12.010

Kim, J., & Kim, H. J. (2012). *A Study on Privacy Preserving Data Leakage Prevention System.* In Recent Progress in Data Engineering and Internet Technology, 2 191-196.

Kshetri, N. (2018). Blockchain's roles in meeting key supply chain management objectives. *International Journal of Information Management,* 39, 80-89. doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2017.12.001

LeFevre, K., DeWitt, D. J., & Ramakrishnan, R. (2006). *Mondrian multidimensional k-anonymity.* In 22nd International conference on data engineering, 25-25.

Lu, J., & Holubová, I. (2019). Multi-Model Databases: A New Journey to Handle the Variety of Data. *ACM Computing Surveys,* 52(3).

Lubarsky, B. (2017). Re-Identification of "Anonymized" Data. *Georgetown Law Technology Review,* 202, 1-12.

Machanavajjhala, A., Kifer, D., Gehrke, J., & Venkitasubramaniam, M. (2007). L-Diversity: Privacy beyond k-Anonymity. *The ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data.* 1(1), 3.

Mackey, E., Elliot, M., & O'Hara, K. (2016). *The anonymisation decision-making framework.* (1st Edition). UK Anonymization Network.

Mahmood, Z., & Jusas, V. (2022). Blockchain-Enabled: Multi-Layered Security Federated Learning Platform for Preserving Data Privacy. *Electronics,* 11(10), 1624. http://dx.doi.org/10.3390/electronics11101624

Mourby, M., Mackey, E., Elliot, M., Gowans, H., Wallace, S. E., Bell, J., … Kaye, J. (2018). Are 'pseudonymised' data always personal data? Implications of the GDPR for administrative data research. *UK. Computer Law & Security Review,* 34(2), 222–233. doi:10.1016/j.clsr.2018.01.002

Nguyen, A. (2022). Understanding Differential Privacy. Retrieved from: https://towardsdatascience.com/understanding-differential-privacy-85ce191e198a

NIH, (2022). Achieving the Principles through a Precision Medicine Initiative Data Security Policy Framework, All of Us Research Program. Retrieved from: https://allofus.nih.gov/protecting-data-and-privacy/precision-medicine-initiative-data-security-policy-principles-and-framework-overview/achieving-principles-through-precision-medicine-initiative-data-security-policy-framework

NIST, (2014). Framework Version 1.0, Retrieved from: https://www.nist.gov/cyberframework/draft-version-11

Ohm, P. (2009). Broken Promises of Privacy: Responding to the Surprising Failure of Anonymization. *UCLA Law Review*, 57, 1701.

Oqaily, M., Jarraya, Y., Mohammady, M., Majumdar, S., Pourzandi, M., Wang, L., & Debbabi, M. (2021). SegGuard: Segmentation-Based Anonymization of Network Data in Clouds for Privacy-Preserving Security Auditing. *The IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 18(5), 2486–2505. doi:10.1109/TDSC.2019.2957488

Samarati, P., & Sweeney, L. (1998). *Generalizing Data to Provide Anonymity When Disclosing Information (Abstract).* Proceedings of the Seventeenth ACM SIGACT-SIGMOD-SIGART Symposium on Principles of Database Systems, 188. doi:10.1145/275487.275508

Statista, (2023). Retrieved from: Number of data breaches and victims U.S. Retrieved from: https://www.statista.com/statistics/273550/data-breaches-recorded-in-the-united-states-by-number-of-breaches-and-records-exposed/

Sweeney, L. (2002). Achieving k-Anonymity Privacy Protection Using Generalization and Suppression. *The International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems,* 10, 571-588.

Tachepun, C., & Thammaboosadee, S. (2020, July). *A Data masking guideline for optimizing insights and privacy under GDPR compliance.* In Proceedings of the 11th international conference on advances in information technology, 1-9.

Xu, J., Wang, W., Pei, J., Wang, X., Shi, B., & Fu, A. W. C. (2006, August). *Utility-based anonymization using local recording.* In Proceedings of the 12th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining, 785-790.

Zhou, B., & Pei, J. (2011). The k-anonymity and l-diversity approaches for privacy preservation in social networks against neighborhood attacks. *Knowledge and information systems*, 28(1), 47-77.

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

UMAGD, (2023) 15(2), 584-597.

10.29137/umagd.1276612

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Investigation of Temperature and Stress Distributions in a Dental Implant Prosthesis

İkram Taşdemir[1*], Cemalettin Aygün[2]

[1]Gümüşhane University, Department of Biotechnology, 29100, Gümüşhane, TÜRKİYE
[2]Karadeniz Technical University, Faculty of Marine Sciences, Department of Marine Engineering Operations, 61080, Trabzon, TÜRKİYE

***Başvuru/Received**: 04/04/2023 **Kabul / Accepted**: 28/04/2023 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Abstract

Titanium and its alloys are widely used in various implant applications due to their biocompatibility and the ability to modify their alloy compositions. Because of its minimal impact on the human body and its resistance to chemical reactions, titanium has become popular in the field of dentistry in recent years and is considered a safe option for implant applications. Artificial dental crowns and dental root implant prostheses are typically produced using titanium alloys (Ti-6Al-4V). In this study, the FE package software ANSYS was used to investigate temperature and stress distribution in a dental implant prosthesis. 3D model was created and subjected to two different input conditions: two different temperatures (45° C and 10° C) under the 100 N compressive load and a fluid (beverage + air) flow rate of 1 m/s. The highest temperature was considered as food/beverage taken from a stove, while the lowest temperature was considered as beverage temperature taken out of the refrigerator. Based on the results of the thermal, von Mises stress, and total deformation analyses, it was determined that the implant prosthesis did not conduct heat well to the tooth root and had good compressive strength (48 MPa) under the load, which was better than its yield strength. Furthermore, it was found that a significant portion of the applied load was borne by the artificial dental crown. The aim of this study is to investigate the thermal and mechanical properties of the Ti-6Al-4V alloy, the behavior that is occur when it is exposed to temperature and compression stress. In this context, it is aimed to determine the incompatibilities that may occur at the bone-implant interface and to emphasize that mechanical compatibility is an important issue besides biocompatibility.

Key Words

"Dental prosthesis, Finite Element Analysis, Thermal and Stress Analysis, Ti-6Al-4V, Single Tooth"

***Sorumlu Yazar:** caygun@ktu.edu.tr*

1. Introduction

1.1 Anatomy of the tooth

The tooth is each of the small bone-like and hard formations in the mouth, which is the beginning of the digestive system, one end of which is embedded in the bones of the upper and lower jaws and the other end is free and is the organ whose main function is to provide mechanical digestion of foods. As it can be seen in Fig. 1, the tooth; It consists of enamel, dentin, cementum, and tooth pulp. Enamel is the hardest substance in the body. It surrounds the tooth as an outermost protective layer. It is not sensitive because it does not contain nerve cells. 97% of its structure is made of consists of calcium salts. Dentin is the layer below the enamel. It makes up 75% of an adult human tooth. Although it has the same density as bone, it is sensitive to heat and touch. When necessary, they can regenerate dentin tissue with the repair cells they contain. Cementum is a bony layer that covers the root and is very thin. It allows the tooth root to attach to the jawbone. 65% is inorganic matter. Pulp (Tooth Core) is the name given to the middle part of the tooth and the soft tissue found here. It continues to the tip of the root. There are blood vessels in this part, and thanks to these vessels, the tooth is protected from infection and always remains active.

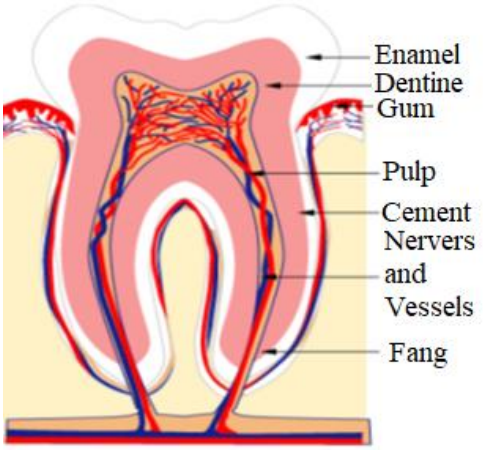


Fig. 1. The structure of the tooth (Dentanorm, 2018)

The tasks of the teeth seen in Fig. 2 are briefly as follows: The front teeth in the lower and upper jaw are called “incisors”. The canines, which are also called "dog teeth" and "eye teeth", come after the incisors, and there are four of them in the upper and lower jaws. Their ends are sharp, and they are useful for breaking the food. The molars are located behind the canines. The molars, which are different from each other in structure, are five in each half-jaw, two premolars and three molars, and a total of ten in one jaw. All premolars have two bumps each for chewing and clamping (Dentanorm, 2018).

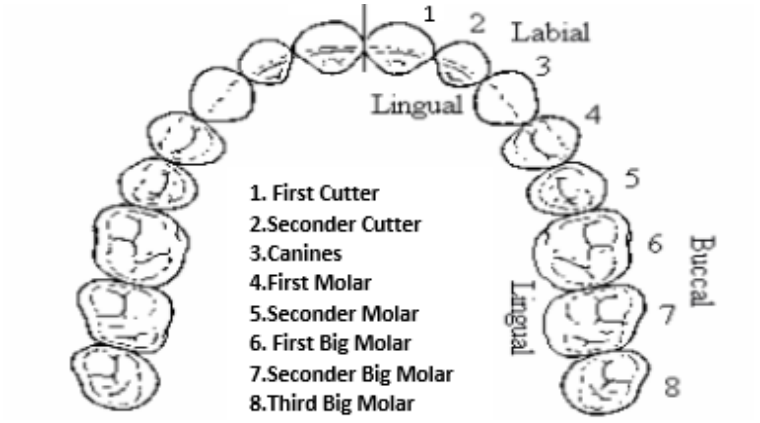


Fig. 2. Names and numbers of teeth inrelative to the midline (Dentanorm, 2018)

In the case of diet, some genetic factors and lack of care for teeth, cavities occur. In this case, its treatment is necessary. However, if it is not intervened in time, tooth deficiency occurs. Although it is quite troublesome and costly, the most preferred method is implanting treatment for missing teeth.

1.2 Treatment method with implant

In today's dentistry, implants have become routine applications in terms of aesthetics as well as fulfilling the functions of lost natural teeth. The amount, quality, and quantity of bone in the area where the implant will be placed are important criteria for implant success (Akça et al., 2002; Hasan et al., 2010; Neldam et al., 2010; Raviv et al., 2010). All dental implants used today are endosseous (intra-bone) implants in the form of tooth roots and are placed inside the jawbone like a real root. As seen in Fig. 3, the jawbone accepts the titanium (Ti-6Al-4V) screw, and the bone tissue grows on the screw. Tissue development is the component of the implant path that makes the implant look and feel like a natural tooth (Stevens et al., 1971). Prior to the advent of root-shaped endosseous implants, most implants were blade endosseous implants and subperiosteal implants that were fitted and screwed onto the jawbone to which the tooth frame was applied, due to the shape of the metal portion that remains in the bone. Additionally dental implants can be used to support many prostheses such as dental crowns, implant supported bridges and dentures (Stevens et al., 1971). A unique implant consists of a titanium screw with a rough outer surface or a smooth surface that resembles a tooth root. Most dental implants consist of commercially pure titanium, which has four classes according to its carbon and iron content. The use of Grade five titanium has increased in the recent past. Grade five titanium, Titanium 6Al-4V, is considered to exhibit the same degree of osseointegration as pure titanium. On the other hand, Ti6Al4V material has higher stress strength and fracture strength (Palmer, 2007; Karakurt, 2018). Today, implants are still made from pure (Class one-four) titanium, but some systems (Endopore and NanoTite®) use the Ti6Al4V alloy. Implant surfaces are treated by plasma spraying, anodizing, acid etching and sandblasting methods to increase the surface area and the integration potential (Nobel Active, 2008). The bone-acceptable biological material, titanium, is the metal most suitable for implant construction. It is also used in plates and screws applied in some fractures in the medical field. It is one of the most corrosion resistant metals. Since it is accepted by the human organism, there is no fear of rejection by the body (Lutton, 1998; Ben-Nissan, 1998). Titanium forms a stable and protective oxide film layer. However, this leads to absorption of proteins and differentiation in bone cells (Subaşı and Karataş, 2012).

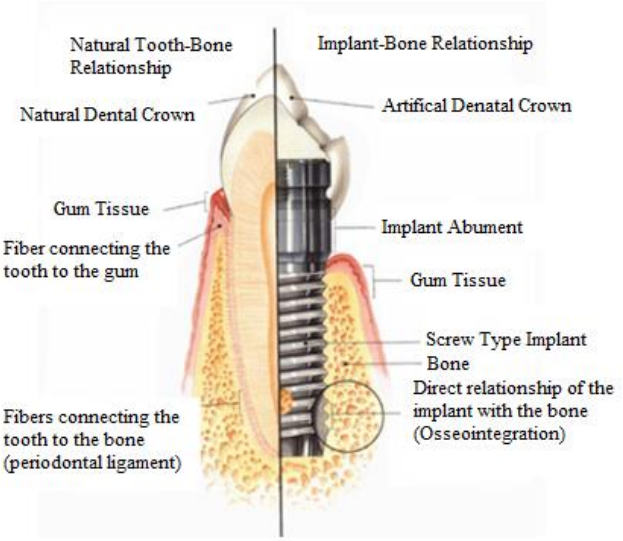


Fig. 3. Comparison of real tooth and implant (Lutton, 1998; Ben-Nissan, 1998)

Implants and implant-supported prostheses offer a comprehensive solution to all types of tooth loss and functional impairment. Single missing teeth can be replaced without disturbing healthy neighboring teeth using implant-supported prostheses. Implants can also be used to create fixed bridges for multiple missing teeth, eliminating the need for removable dentures. In cases of complete edentulism, fixed prostheses are a preferable alternative to removable prostheses (palate). These are the primary objectives of implants, as outlined by Stevens et al. (1971). Implants and implant-supported prostheses aim to provide a more natural and aesthetically pleasing appearance while maintaining stable teeth. Implants offer a high level of durability and prevent bone loss in the areas where teeth have been extracted or bone has thinned over time, which can cause variations to the facial profile. Additionally, the improved chewing function provided by implants leads to more balanced nutrition, eliminating stomach problems caused by poor chewing ability (Lutton, 1998; Ben-Nissan, 1998). Implants have some drawbacks such as higher cost compared to other treatment options, longer treatment duration, and the need for meticulous clinical and laboratory evaluation. In addition, proper oral hygiene, and cleaning procedures before and after implant placement are necessary. However, despite these drawbacks, implants are still attractive for scientists due to their significant advantages. There have been numerous studies conducted on implants to explore their potential and improve their functionality (Lutton, 1998; Ben-Nissan, 1998). Here are a few examples of recent studies on dental implants: Damlar et al. (2014) investigated the von Mises stresses that occur in response to the force applied during the chewing of the jaw by applying 100 N force on two commercial dental implants models. In their study Baştürk and Zor (2006), they carried out stress analysis by modeling an implant that can be applied to these tooth models and the effect of the horizontal angle of the tubercles on deformation and tension during loading and mounting the implant to the tooth. In dental models, the horizontal angles of the tubercle are 3°, 22°, 45°. The force that came to the tubercle on the upper surface of the tooth during chewing was applied vertically as 58 N

(≈ 6 kg). Göçer (2010) investigated the effects of two different commercial implant systems, one highly developed and a standard one, with different materials and force values in terms of geometry and strength. In the study, human biting force was used as a load. This value corresponds to a range from 222N to 522N in an adult male. This load was applied to make three separate angles (perpendicular to the surface, 60° and 30°) to the tooth surface. Küçük et al. (2009) and Dalkız et al. (2002) investigated the stress distributions of an implant in the second molar region of the lower jaw restored with a metal-ceramic crown under different loading conditions. Asar and Burgas (2009) examined the stress distributions caused by implant-supported wing bridges in different bone types. Arpa (2021) used implants made of titanium, zirconium, cobalt and gold, and prostheses made of zirconium and porcelain materials mounted on these implants. By exposing the different pairs of materials and the natural tooth to real-life conditions, he obtained numerical solutions for fifty-four different combinations using the Ansys 14.5 (CFX) program. They examined the temperature distributions under thermal conditions where there is water flow at 5 °C, 60 °C and air flow at -10 °C. Ormianer et al. (2009) experimentally examined the temperature rise in dental implants during the intake of hot beverages in vivo. A brief literature survey has revealed the importance of dental implants in dentistry. In the literature search, although only one (Arpa,2021) study was conducted under thermal conditions where water flow and air flow were performed as thermal analysis, the velocity or fluid flow rate of the liquid when drinking the beverage was specified.

In this study, a commercial implant was used to consider a more realistic situation; the convection and within the implant conduction effects were not neglected. Heat transfer occurs when drinking a beverage, considering the velocity and contact of the air entering the mouth with the liquid. In addition, the heat, and compressive strengths of titanium alloys (Ti-6Al-4V), which are often used in artificial dental crowns and tooth roots, were examined separately. The aim of this study is to investigate the thermal and mechanical properties of the Ti-6Al-4V alloy, the behavior that is occur when it is exposed to temperature and compression stress. In this context, it is aimed to determine the incompatibilities that may occur at the bone-implant interface and to emphasize that mechanical compatibility is an important issue besides biocompatibility.

Titanium alloys, which have superior properties, are widely used in various fields as well as dentistry. Ti-6Al-4V alloy has a wide range of applications due to many properties such as high strength, low density, and corrosion resistance. It is used in aviation, aerospace industry, medicine, and other industries. Table 1 shows the places where titanium alloys are commonly used.

Table 1. Applications of titanium alloys (Şap et al. 2019)

Applications	**Titanium Alloys**
Gas Turbine Engine Material	Ti-5,8AL-4Sn-3,5Zr-0,7Nb-0,5Mo-0,35Si-0,06C Ti-6Al2Sn4Zr-6Mo Ti-4Al-4Mo-2Sn-0,5Si
Airframe	Ti-10V-2Fe-3Al Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al Ti-15Mo-2,8Al-3Nb-0,2Si
Ballistic Armor	Ti-6Al-1,8Fe-0,2Si
Geothermal and Offshore Pipes	Ti-6,8Mo-4,5Fe-1,5Al
Good Sporting Materials (light and high strength)	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al
Dental and Medical Applications	Vanadium-free ve Ti-6Al-4V, equivalent alloys
Medical Orthopedic Instruments	NiTi-Cu

2. Theory And Method

In this study, FE package software ANSYS was used. Temperature levels of 45^{o} C, 10^{o} C, along with the surface load of 100 N were applied to the three-dimensional dental implant prosthesis, respectively. The fluid (beverage + air) velocity was assumed as 1 m/s. Temperature and stress distributions were investigated at these input conditions. During the model design, the short dental implants in the literature were examined in detail and modeled appropriately and analyzed (Fig. 4).

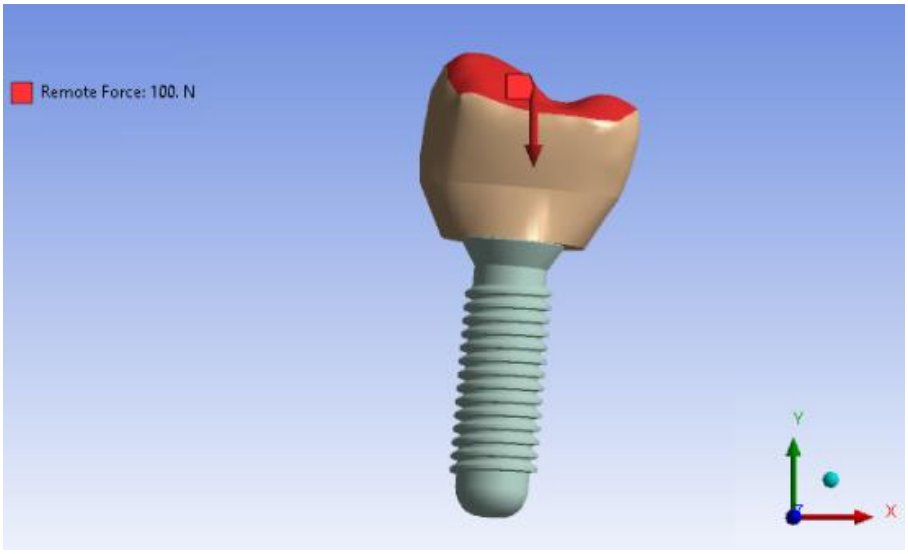


Fig. 4. The implant model used in the FE analyses and application of surface force

After the implant model was transferred to the Ansys Workbench program (Static Structural), the material properties of the tooth root and artificial tooth crown were entered. This process was performed by selecting the mechanical properties of each element on the model structure, if it is available in the material library of software package, and if not, by manually.
Two important material parameters, modulus of elasticity and the Poisson's ratio of the materials, are given in Table 2, and the thermal properties of titanium and dentin materials used in this study are given in Table 3, respectively.

Table 2. The mechanical properties of the materials used in the study (Şap et al. 2019)

Materials	**Elasticity Modulus (GPa)**	**Poisson Ratio (ν)**	**References**
Cortical Bon	10.7	0.30	Holmes et al., 1994; Meijer et al., 1994; Melo et al., 1995; Papavasilliou et al., 1996; Sertgöz, 1997; Barbier et al., 1998; Teixera, 1998; Akça et al., 2020.
Trabecular Bone	1.37	0.30	Holmes et al., 1994; Meijer et al., 1994; Sertgöz, 1997; Barbier et al., 1998.
Dentine	18.6	0.31	Melo et al., 1995; Geng et al., 2001; Aykul et al., 2002.
Titanium	115	0.35	Holmes et al., 1994; Texiera, 1998.
Acrylic	3	0.35	Tanino et al., 2007.
Mucosa	0.68	0.45	Pellizzer et al., 2010; Verri et al., 2011; Cunha et al., 2011.
Stainless Steel	190	0.31	Barao et al., 2008.
Nylon Resin	2.4	0.39	Pellizzer et al., 2010; Verri et al., 2011.

Table 3. The thermal properties of the materials used in the study (Matweb)

Material Properties	Dentine	Titanium (Ti-6Al-4V)
Density (kg/m^3)	2140	4430
Specific Heat (J/kgK)	1380	526
Thermal Conductivity Coefficient (W/mK)	0.57	6.7

Prior to numerical analysis, a validation study was conducted, and the result were compared with a study published in the literature (Göçer, 2010). The comparison between the results of the study conducted by Göçer (2010) and the results obtained from this study is shown in Fig. 5 as a bar graph. The difference observed between the results of the studies shown in the graph is due to the mesh structure of the studies and was in permissible level of error of 10%.

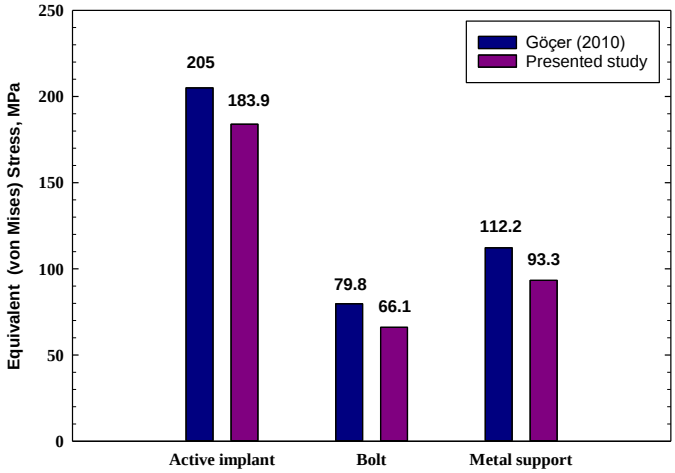


Fig. 5. A comparison of the literature of this study

The maximum and minimum principal stress values as well as the von Mises stress values of the implant's crown and root were calculated following loading, and the images were evaluated. A similar approach was considered in the thermal analysis as well.
After the material properties were defined in the program, the mesh structure was established. During the study, the curvature structure was used by choosing an advanced mesh structure. To obtain more realistic results, a mesh independent solution has been obtained. After the mesh structure of all surfaces of the model was created, the simulation step was started. At this stage, the force to be applied to the model was determined as 100 N based on the literature survey. By applying this force to the model, the deformation, and von-Mises (equivalent) stress variation on the implant were investigated.
In the thermal analysis performed in ANSYS (Fluid Flow), temperatures of 45^o C and 10^o C were applied to the model. For the highest temperature the temperature of food/beverage taken from a stove and the lowest temperature was accepted as the temperature of the beverage/food taken out of the refrigerator.

3. Results And Discussion

Although various cases have been studied, when the numerical solutions obtained were examined, it was noted that the solutions were very similar and therefore all the data were not mentioned in the current study. While evaluating the results; to make the implant and prosthesis temperature incompatible with real applications, it was assumed that they were equal to the body temperature.

3.1. Thermal Analysis

The data obtained from the numerical analysis is presented in the form of figures in sequence Fig. 6 and 7 depict the 3D temperature variations for the model at temperatures of 10^o C and 45^o C, respectively. As it can be noted, the temperature distribution seems to be uniform.

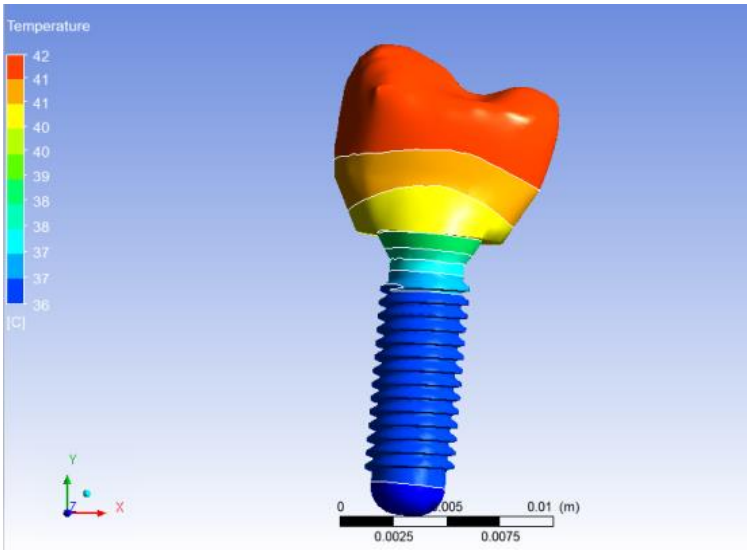


Fig 6. 3D temperature distribution on the implant at 45° C (hot drink case)

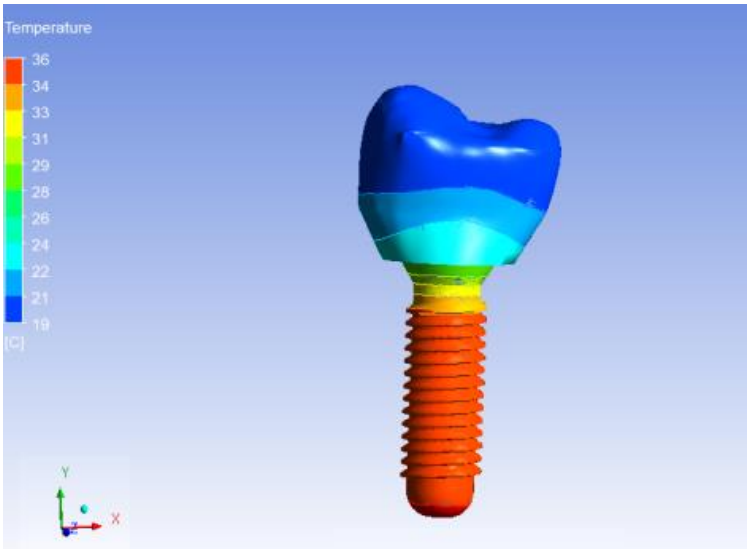


Fig 7. 3D temperature distribution on the implant at 10° C (cold drink case)

As seen from Fig. 6 and 7, it can be observed that the temperature is not instantly transferred to the implant root, thus preventing any potential problems that may occur in the gum and jawbone. The temperature variations in the implant prosthesis, as seen from Fig. 6 and 7, is lower in conductivity due to the artificial tooth crown being more insulated than the tooth root. Therefore, any potential issues such as cracking, breakage, and similar problems in the gum, jawbone, and artificial tooth crown caused by instantly variations in temperature have been prevented. This way, any deformations due to temperature variations that may occur between the implant prosthesis and the jawbone surface have been avoided.

For the 45° C temperature condition, the temperature distributions along the x, y and z sections are shown in graphs (Fig. 8).

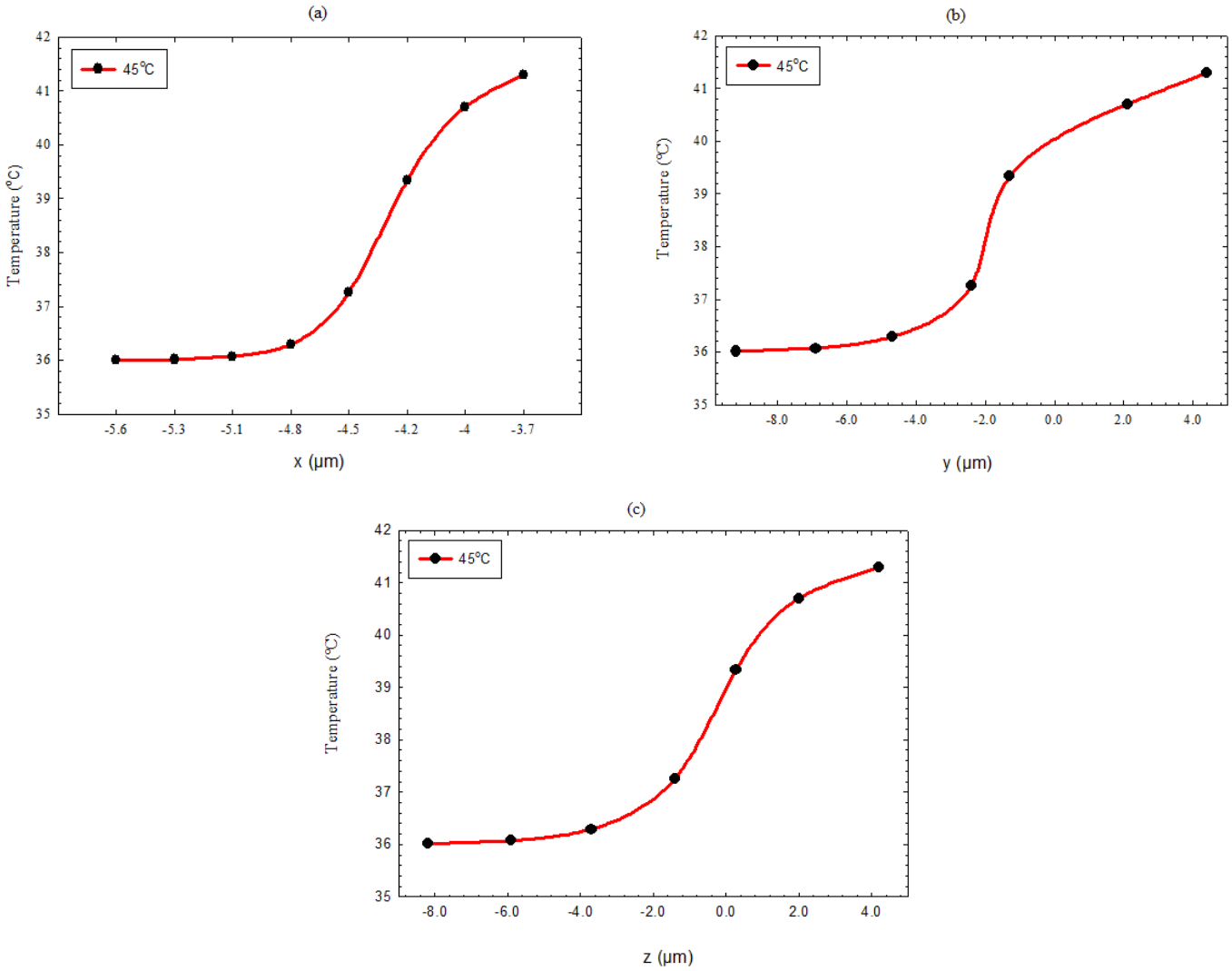


Fig. 8. Temperature distribution along the x-y-z-axis

The distribution with respect to the y-axis when a temperature of 45°C is applied is given in Fig. 8b. As seen from the graph, the temperature variations occur slowly up to 4.7 µm and then accelerates. This is because the artificial tooth crown is made of a more insulating material. The thermal conductivity coefficients of the crown materials used in dental implants are low. This is important in terms of reducing sensitivity caused by temperature variations in the mouth, as dental implants do not conduct heat well. The thermal conductivity coefficient of Ti-6Al-4V alloy is approximately in the range of 6.7-7.4 W/mK, while that of zirconium is approximately in the range of 2.5-3 W/mK. These values indicate that dental implants are an insulating material. The crown materials in dental implants are designed to reduce excessive sensitivity when in contact with hot or cold beverages or food.
Fig. 11 (a, b, c) show graphs showing the distance of temperature relative to the x, y, and z axes.

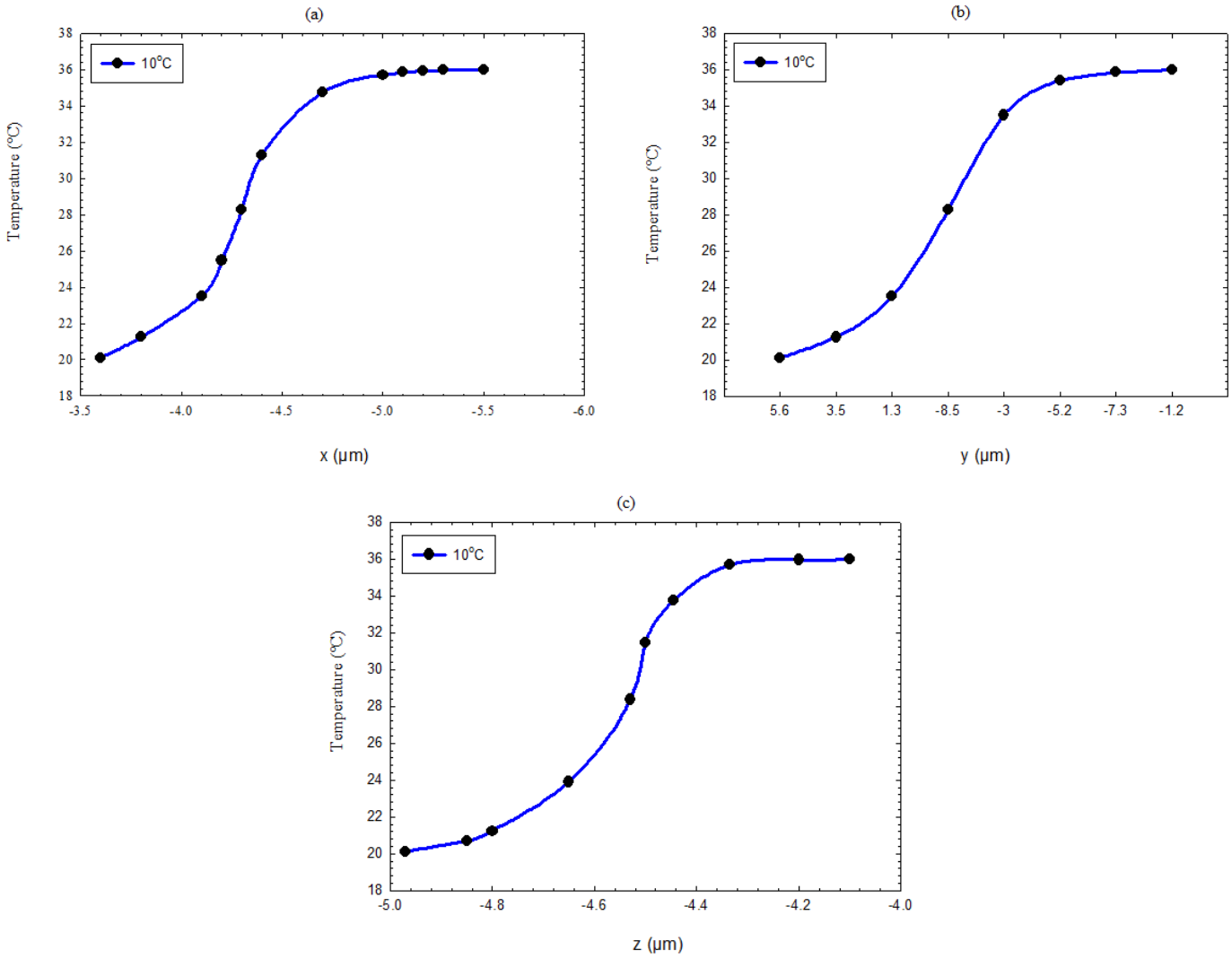


Fig. 11. Temperature distribution along the x-axis

As can be noted from the graphs, the temperature distributions are quite like each other. Because the artificial tooth crown is more insulating than the tooth root, the temperature is gradually transmitted up to the distance of -4.4 µm and then the temperature remains constant. The physical reason for this situation was previously explained in terms of heat transfer.

3.2. Mechanical Analysis

The deformation and von-Mises (equivalent) stress variations on the implant were examined by applying 100 N force to the model (Fig. 12 and 13). According to the implant stress value and color scale, the red areas for maximum principal stress and the blue areas for minimum principal stress are the regions where the lowest values are seen. According to the implant stress value, the red areas for maximum principal stress and the blue areas for minimum principal stress are the regions where the lowest values are recorded.

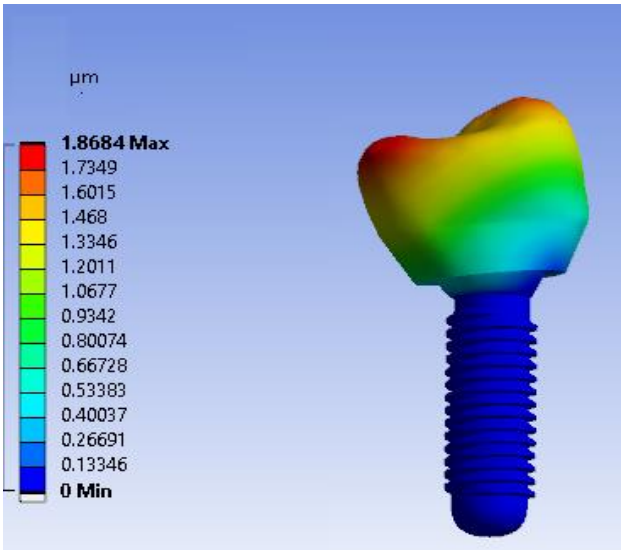


Fig. 12. Total deformation on the implant at different angles

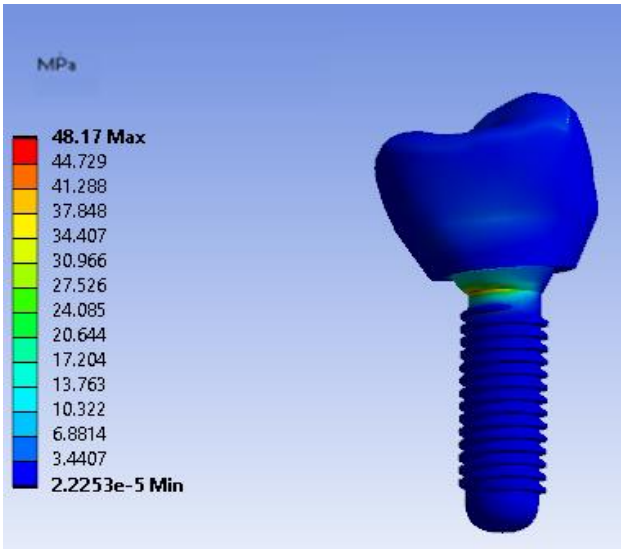
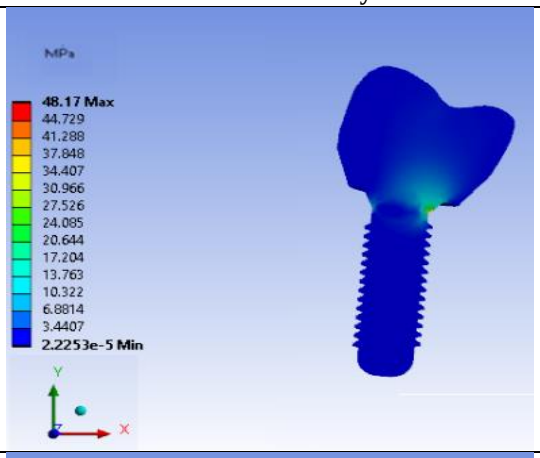
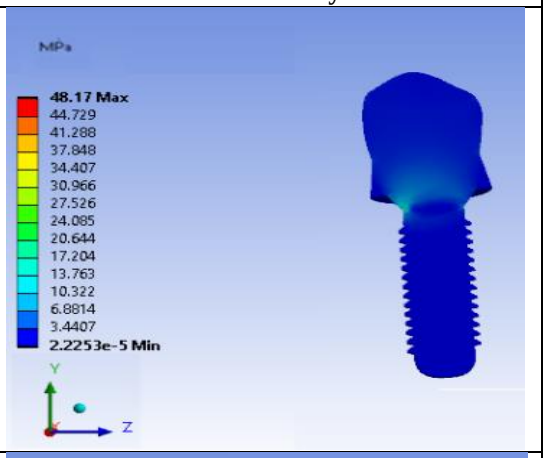
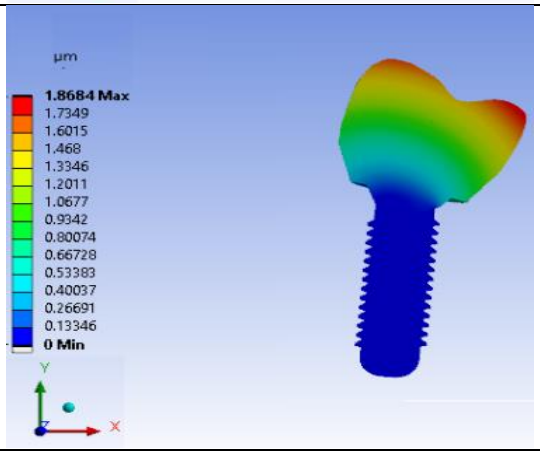
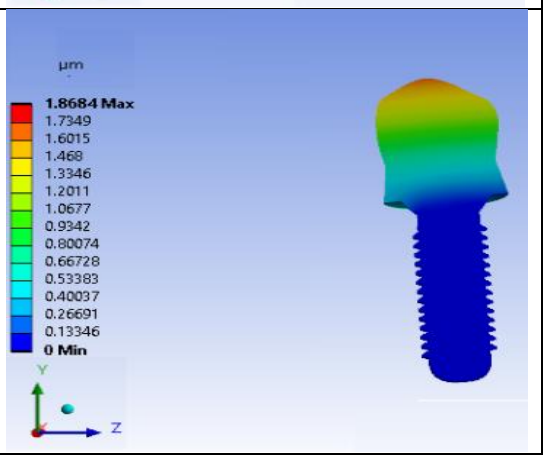


Fig. 13. von Mises (equivalent) stress distribution

Table 4 shows von Mises stresses and total deformation X-Y and Y-Z section views. As a result of the analysis, when the von Mises stresses on the implant are examined as seen in Table 4, it is seen that the maximum compression occurs in the tooth root. This can increase the risk of implant failure or various problems. Therefore, this stress caused by the incompatibility at the bone-implant interface can prevent the implant from functioning properly. In addition, since the stresses occurring in the tooth root do not reach the compressive strength, it is seen that the implant is durable under static conditions. As the temperature increases, the von Mises stress decreases due to the expansion of the material, while its displacement increases (Taşdemir, 2021).

Table 4. von Mises stresses and total deformation cross-section

	Cross section x-y	Cross section y-z
von Mises		
Deformation		

When the total deformation on the implant is examined in Table 4, it is seen that the highest amount of deformation with 1.868 µm is concentrated in the artificial tooth crown of the tooth and decreases towards the root of the tooth. Fig. 14, 15, and 16 show the variation of von Mises stresses with respect to the x, y and z axes.

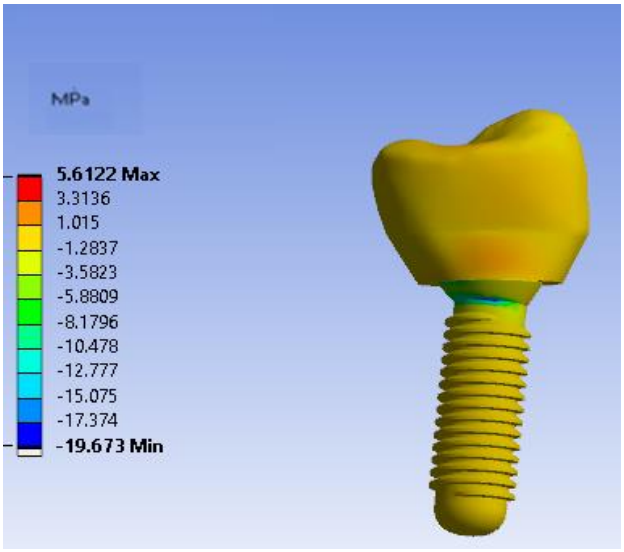


Fig 14. von Mises stress distribution in the x-axis

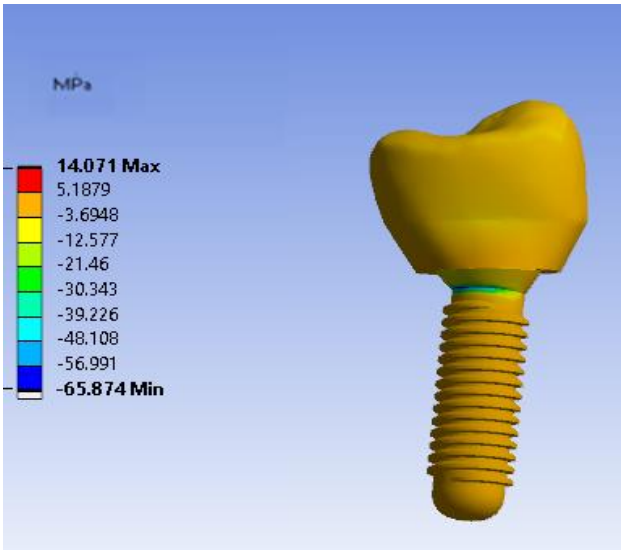


Fig. 15. von Mises stress distribution in the y-axis

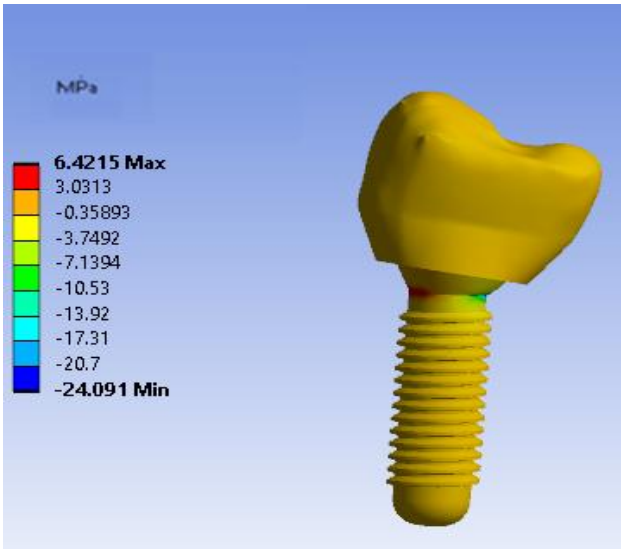


Fig. 16. von Mises stress distribution in the z-axis

As a result of the analysis, as can be seen in Fig. 14, 15 and 16, the maximum von Mises stress was realized as 14 MPa. The reason for this is that 100 N force was applied to the implant prosthesis in the y-direction.

4. Conclusion

Theoretical (numerical) and experimental analysis methods are used to evaluate the stresses caused by chewing forces and temperature in scientific studies aimed at developing medical treatments. Despite its limitations, the finite element stress analysis method can accurately and completely model complex geometries and material properties. Additionally, this method is widely used due to its advantages such as the ability to make variations in the generated model, obtain stress type, distribution, and deformation together and very accurately, present stresses in understandable numerical values, and easy control of the experimental aim. Therefore, the finite volume stress and thermal analysis method has been preferred in the study.

- Upon analyzing the results of the von Mises stress distribution and total deformation analysis showed that the implant prosthesis exhibited high stress and compressive strength. It was also observed that the artificial dental crown covered a significant portion of the total deformation, while the tooth root showed minimal deformation. These results agreed with those reported in a previous study.
- It was determined that the highest stress values upon loading occurred in the crown and the lowest stress values occurred in the root.

- According to the results of the study, while a uniform distribution was observed in three principal axes in thermal examination of the implant, non-uniform values were detected in three principal axes in mechanical examination.
- The chewing force applied due to the tooth geometry causes non-uniform stress distribution in all axes, and this reveals the importance of mechanical compatibility between the implant root and the bone interface. A similar situation will occur in the stress change due to temperature change.
- Implants can be exposed to stress values up to 48.17 MPa, which can lead to problems at the implant-bone interface, especially in the presence of conditions such as osteoporosis and menopause that cause bone loss and affect differentiated bone cells. Therefore, mechanical compatibility as well as biocompatibility is very important for the success of dental implant prosthesis.
- Artificial tooth crowns and tooth roots are usually made using titanium alloys (Ti-6Al-4V). Nevertheless, these alloys may cause problems at the implant-bone interface due to factors such as loss of bone volume and bone resorption or differentiation in bone structure. Therefore, the design and selection of dental implant prosthesis materials should be made by considering the bone structure of the patient.
- It has been observed that materials commonly used in dentistry, such as titanium alloys (e.g., Ti-6Al-4V), have insulation properties and exhibit durability characteristics depending on temperature changes and compressive stress. Taking these properties into consideration, producing materials for dental applications that are both cost-effective and consider the issue of bone loss could contribute significantly to the economy of our country.

Performing this study time-based and simultaneously will allow more detailed results to be obtained. In addition, it is important to include statistical study on the patients with bone loss and bone diseases due to osteoporosis, menopause.

References

Akça, K., Cehreli, M.C. & İplikçioglu, H. A. (2002). Comparison of Three-Dimensional Finite Element Stress Analysis With In vitro Strain Gauge Measurements on Dental Implants. International Journal of Prosthodontics, 15(2), 115-121.

Ansys Fluent 15.0 User's Guide, Ansys Inc., 2016.

Arpa, İ. (2021). Numerical Investigation of The Thermal Properties of Different Dental Prosthesis and Implant Materials. Dicle University. Master's Thesis.

Asar, V. and Burgaz, Y. (2009). The evaluation of the influence of implant supported cantilever bridges on stress distribution in different bone types. Gazi University, Journal of the Faculty of Dentistry, 26(1), 47-58.

Baştürk, K. and Zor., M. (2006). Effect of Veneer Geometry on Stress in an Implanted Human Jaw. Dokuz Eylül University Faculty of Engineering, Graduation Project.

Dalkız, M., Zor, M., Aykul, H., Toparlı, M., and Aksoy, S., (2002). The Three-Dimensional Finite Element Analysis of Fixed Bridge Restoration Supported by the Combination of Teeth and Osseointegrated Implants. Implant Dentistry, vol.11, no.3, 293-300.

Damlar, İ., Özyılmaz, E., Altan, A. Ve Özyılmaz, E. (2014). Investigation of Stress Distributions of Two Commercial Implant Systems by Three-Dimensional Finite Element Analysis Method. Süleyman Demirel University, Journal of Engineering Sciences and Design, 2(3), 175-180.

Dentanorm A.Ş, (2018). website access address http://www.hekimim.com/genel/genel_bilgi.hml

Göçer B. and Zor, M. (2010). Stress analysis of Dental Implant Systems. Dokuz Eylül University Faculty of Engineering, Graduation Project.

Hasan, I., Heinemann, F., Aitlahrach, M. ve Bourauel, C. (2010). Biomechanical Finite Element Analysis of Small Diameter and Short Dental Implant. Biomedical Technology, 55(6), 341-350.

Karakurt, M. (2018). Investigation of Stress Distribution on Implant, Abutment, Screw and Bone Using Finite Element Analysis Method of Fixed Implant Bridge Prosthesis Prepared with Different Superstructure Materials. Dicle University, Specialization Thesis in Dentistry.

Küçük, M., Çömlekoğlu, E.M., Zor, M., (2010). The Effect of Crown Geometry on Stress Distribution of a Single Implant Restoration: A Finite Element Analysis. Dokuz Eylül University Faculty of Medicine, Türkiye Klinikleri Journal of Dental Sciences, 16(2), 136-141.

Lutton and Ben-Nissan, B. (1998). Innovative Bio-ceramics. Mat. Tech., (Vol 27). Australia.

Matweb material mechanical properties website access address http://www.matweb.com

Neldam, C.A. and Pinholt, E.M. (2010). State of the Art of Short Dental Implants: A Systematic Review of the Literature. Clinical Implant Dentistry and Related Research, 10, 1708-8208.

Nobel Active™ Technical Story, Nobel BioCare Services AG, 2008.

Ormianer, Z., Feuerstein, O., Rawi, E., Nachum, S. and Weiss, E.I. (2009). In Vivo Variations in Dental Implant Temperatures During Hot Beverage Intake: A Pilot Study. Implant Dentistry, 18(1), 38-45.

Palmer R. (2007). Ti-unite Dental Implant Surface may be Superior to Machined Surface in Replacement of Failed Implants. The Journal of Evidence-based Dental Practice, 7(1), 8-9.

Raviv, E., Turcotte, A. ve Harel-Raviv, M. (2010). Short Dental Implants in Reduced Alveolar Bone Height. Quintessence International, 41(7), 575-579.

Şap, S., Şap, E. and Kırık, İ. (2019). The Use of Titanium and Alloys as A Biomaterial. III. International Battalgazi Multidisciplinary Studies Congress, pp., 1052-1059, Malatya, Türkiye, 21-23 Eylül.

Stevens, I.J. ve Alexander, J. (1971). Bone Implant. US Patent No. 3,579,831.

Subaşı, M. and Karataş, Ç. (2012). A Review on Implants Made of Titanium and Titanium Alloys. Journal of Polytechnic, 15(2), 87-103.

Taşdemir, İ. (2021). Numerical investigation of filler materials used in dentistry for dentals with advanced damage. Gümüşhane University. Master's Thesis.

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

UMAGD, (2023) 15(2), 598-609.

10.29137/umagd.1287314

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Al6061 Matrisli SiC, Al_2O_3 ve Kömür Cürufu Tozu Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Sertlik ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

Investigation of Hardness and Wear Behavior of Al6061 Matrix SiC, Al_2O_3, and Coal Slag Powder Reinforced Hybrid Composites

Rahmi Kocaman[1], **Serkan Ateş**[2]

[1]*Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, 06560 Ankara, TÜRKİYE*
[2]*Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 15030 Burdur, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 25/04/2023* ***Kabul / Accepted**:07/05/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Öz

Bu çalışmada Metal Matrisli Kompozitlerde (MMK), termik santralde yakıt olarak kullanılan kömürün yanması sonucunda kazan altında oluşan atık kömür cürufunun takviye olarak kullanılabilirliğine ve SiC, Al_2O_3 ile uyumuna odaklanılmıştır. Matris olarak otomobil ve havacılık endüstrisinde sıklıkla kullanılan Al6061 alaşımı seçilmiştir. Kompozitler ağırlıkça % 1, 3, 5, ikili hibrit kompozitler ağırlıkça % 4, 6, 8 ve üçlü hibrit kompozitler ise ağırlıkça % 7, 9, 11 takviye-hacim oranlarında 22-59µm toz boyutuna sahip takviyeler kullanılarak üretilmiştir. Kompozitlerin üretiminde sıvı hal üretim yöntemlerinden olan iki kademeli karıştırmalı döküm yöntemi kullanılmıştır. Üretilen kompozitlerin mikro yapıları taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenerek takviyelerin varlığı ve takviyenin içyapıda homojen dağılımı tespit edilmiştir. Kompozitlerin sertlikleri Brinell sertlik ölçüm yöntemi ile belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında üretilen kompozitlerin aşınma davranışını ölçmek ve kuru sürtünmeli aşınma testlerini yapmak için kullanılan standart testlerden Pin on Disk yöntemi kullanılmıştır. Kömür cürufu tozu takviyeli kompozitler başarı ile üretilmiştir. Sertlik ölçümlerinde kömür cürufu tozunun da kompozitin sertliğini arttırmada neredeyse SiC ve Al_2O_3 kadar etkili olabildiği belirlenmiştir. Kömür cürufu tozu takviyesi de diğer takviye elemanları gibi kompozitlerin aşınma dayanımını artırmıştır.

Anahtar Kelimeler

"Kompozit, Aşınma, Sertlik, Al6061, Kömür Cürufu Tozu"

Abstract

In this study, we have focused on the use of waste coal slag, which is formed under the boiler due to the combustion of coal used as fuel in thermal power plants, as reinforcement in Metal Matrix Composites (MMC), and its compatibility with SiC and Al2O3. Al6061 alloy, frequently used in the automobile and aerospace industry, was chosen as the matrix. Composites were fabricated using reinforcements with 22-59 µm powder size at reinforcement-to-volume ratios of 1, 3, 5 wt%, binary hybrid composites at 4, 6, 8 wt%, and ternary hybrid composites at 7, 9, 11 wt%. Two-stage stir casting method, which is one of the liquid-state production methods, was used in the production of composites. The microstructures of the composites were investigated by scanning electron microscopy to determine the presence of reinforcements and the homogeneous distribution of the reinforcement in the microstructure. The hardness of the composites was determined by the Brinell hardness measurement method. Pin on Disk method, one of the standard tests used to measure the wear behavior of the composites produced within the scope of this study and to perform dry friction wear tests, was used. Coal slag powder-reinforced composites were successfully produced. Hardness tests revealed that coal slag powder can increase the composite's hardness s almost as effectively as SiC and Al_2O_3. Coal slag powder reinforcement also increased the abrasion resistance of composites like other reinforcement elements.

Key Words

"Composite, Wear, Hardness, Al6061, Coal Slag Powder "

***Sorumlu Yazar:** sates@mehmetakif.edu.tr*

1. Giriş

Günümüzde teknoloji alanındaki gelişmeler, artan enerji ihtiyacını özellikle de elektrik enerjisine olan bağımlılığı beraberinde getirmektedir. Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumunun 2021 yılı kömür "linyit" sektör raporuna göre ülkemizde elektrik kurulu gücünün %31.5'ini hidroelektrik santralleri, %25.6'sını doğalgaz ile çalışan santraller oluştururken %20.4'ünü de kömürle çalışan santraller oluşturmaktadır (Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu [TKİK], 2021). Ülkemizdeki kömür sadece termik santrallerde değil aynı zamanda sanayi tesislerinde ve konutların ısıtılmasında kullanılmaktadır. 2022 TÜİK verilerine göre Kömür tüketiminin %82'si elektrik üretiminde, %10,8'i sanayi sektörlerinde, %7,5'i ise konut ve işyerlerinde gerçekleşmiştir (Türkiye İstatistik Kurumu [TÜİK], 2022). Gerek enerji üretiminde gerekse ısıtmada kömür tüketimi oldukça fazladır. Söz konusu tüketim beraberinde atıkları ve bunların nasıl bertaraf edileceği sorusunu akla getirmektedir. TÜİK verilerine göre ülkemizde katı yakıtlı termik santrallerden 2021 yılında 19362267 ton kül ve cüruf atığı ortaya çıkmıştır (TÜİK, 2020). Termik santrallerde kömürün yakılması sonucunda, baca gazlarına karışarak yukarı çıkan ve filtreler tarafından yakalan uçucu kül termik santral atıklarının yaklaşık %75-80'ini oluştururken, fırının tabanındaki su dolu bir haznede toplanan, parçacık boyutu 12,7mm'nin altında, koyu gri, granüler ve gözenekli bir malzeme olan taban cürufu ise %20-25'ini oluşturur (Annual Book of ASTM Standards, 1992). Dünya genelinde taban cürufunun %85'inden fazlası açık barajlarda ve düzenli depolama alanlarında depolanmaktadır (Coal Combustion by Products, 2020). Taban cürufunun uygun olmayan şekilde saklanması ve imha edilmesi devasa çevresel tehlikeler yaratır. Taban cürufu depolama alanlarının yakınında yaşayan insanlarda arsenik kontaminasyonundan dolayı kanser gelişme ihtimali %2'dir (USEPA, 2010). Söz konusu sağlık tehlikeleri, taban cürufunun bertaraf edilmesi için başka yöntemler bulmayı zorunlu kılmıştır (Singh et al., 2018). Bu zorunluluk nedeniyle, endüstrinin farklı dallarında ortaya çıkan atık yan ürünleri atık olarak değil, kaynak olarak kabul edilmiş ve bir dizi yeni ve yenilikçi geri dönüşüm çözümü ortaya çıkmıştır (Panagopoulos ve diğerleri, 2019; Panagopoulos & Haralambous, 2020; Gao et al., 2021). Böylelikle atıkların yeniden kullanılması gibi atık yönetimi konuları giderek önem kazanmaya başlamış ve araştırmacılar atıkların kompozit üretiminde takviye elemanı olarak kullanılabilirliği üzerine odaklanmışlardır.

Kompozit malzemeler iki veya daha çok malzemenin, en iyi özelliklerinin yeni oluşturulan malzemede bir araya getirilmesi amacıyla makro düzeyde birleştirilmesi ile elde edilir (Lloyd, 1994). Kompozit malzeme matris ana fazı ve bunun içine dağılmış takviye elemanlardan oluşur (Hahn & Tsai, 1980). Kompozitin matris fazında kullanılan malzeme metal ve alaşımları ise bu durumda metal matrisli kompozit olarak isimlendirilir. Metal matrisli kompozitler de sıklıkla kullanılan matris malzemeleri alüminyum alaşımlarıdır. Bunun nedeni, alüminyum alaşımlarının hafif olmasının yanı sıra bakır, titanyum ve magnezyum gibi diğer matris malzemelerine göre daha ekonomik olmasıdır (Rohatgi, 1991). SiC, Al_2O_3, TiO_2, B_4C, TiC, MgO, Zirkon vb. sert seramik partiküllerin alüminyum alaşımlarına eklenmesi ile partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozitler üretilmiştir. Bu partiküllerin eklenmesi kompozitin sertliği ve mukavemetini arttırırken sünekliğini önemli ölçüde düşürmektedir (Kaczmar et al. 2000; Prasad and Asthana 2004; Pawar and Utpat 2014; Lokesh et al. 2013; Gündoğan ve Özsarı 2019; Prashanth et al. 2017; Robin et al. 2015). Alüminyum matrisli kompozitler, izotropik malzeme özellikleri nedeniyle monolitik metallere göre daha yüksek mukavemet, sertlik ve yorulma dayanımına sahip olmalarının yanı sıra daha hafif olmaları nedeni ile endüstride geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Partikül takviyeli Al6061 matrisli kompozitler geniş bir sıcaklık aralığında iyi mekanik ve fiziksel özellikler gösterdiklerinden, otomotiv bileşenleri ve uçak gövdelerinde kullanılabilirler (Mahendra et al. 2013; Kumar et al. 2011).

Alüminyum matrisli kompozitlerin üretimi için çeşitli yöntemler mevcuttur (Ünlü 2008; Mondal et al. 2008; Ramesh and Safiulla 2007). Bu üretim yöntemleri arasında, sıvı hal üretim yöntemleri, basitliği ve büyük miktarlarda üretime uygunluğu nedeni ile endüstride sıklıkla kullanılmaktadır (Ramesh and Safiulla 2007: Hashim et al. 1999). Karıştırmalı döküm yöntemi 1981 yılında Surappa & Rohatgi tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemde seramik partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin hazırlanması için girdap karıştırma tekniği kullanılmıştır (Surappa and Rohatgi 1981).

Literatür incelendiğinde Al6061 matrisli, SiC ve Al_2O_3 takviyeli kompozitlerin üretimi ve incelenmesi ile ilgili çok sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Umanath ve arkadaşları (2013), karıştırmalı döküm tekniği kullanarak Al6061 alaşımına ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranlarında SiC ve Al_2O_3 ilave ederek kompozit üretmişler ve takviyenin artan oranlarında aşınma miktarında azalmanın yanı sıra aşınan yüzeyde daha fazla yüzey pürüzlülüğü meydana geldiğini tespit etmişlerdir (Umanath et al. 2013). Seshappa ve Prasad (2022), çalışmalarında karıştırmalı döküm yöntemi kullanarak, Al7075 alaşımına ağırlıkça % 2, 4, 6 ve 8 oranlarında SiC ve Al_2O_3 ilave ederek hibrit kompozit üretmişler ve SiC ve Al_2O_3'in artan oranlarında sertliğin artarak maksimum sertlik değerinin 199 Vickers değeri ile %8 oranında takviye içeren hibrit kompozitte meydana geldiğini, aşınma değerlenin ise artan takviye miktarı ile azaldığını bildirmişlerdir (Seshappa and Prasad 2022). Sharma ve arkadaşları (2022), ise çalışmalarında karıştırmalı döküm yöntemi ile ağırlıkça %4, 8 ve 12 oranlarında SiC'ü Al6061 alaşımına ilave ederek kompozit üretmişler ve takviyenin artan oranlarında kompozitin sertliğinin 150 Vickers değerine kadar arttığını belirlemişlerdir (Sharma et al. 2022). Ayrıca Kumar ve arkadaşları (2010), sıvı hal üretim yöntemi kullanarak, Al6061 alaşımına ağırlıkça % 2, 4 ve 6 oranlarında SiC, Al7075 alaşımına ise benzer oranlarda Al_2O_3 ilave ederek kompozit ürettiler. Ürettikleri kompozitlerde hem SiC hem de Al_2O_3 ilavesinin sertliği arttırırken, aşınma oranında azalmaya neden olduğunu belirlediler (Kumar et al. 2010).

Bunların yanı sıra literatür taramasında taban cürufunun inşaat endüstrisinde belirli bir dereceye kadar potansiyel bir çimento ikamesi haline getirilebileceğini öne süren çalışmaların (Singh et al. 2018; Hooton and Bickley 2014; Kim and Lee 2015; Muthusamy et al.

2020) yanı sıra taban cürufunun içeriğinde bulunan SiO_2, Al_2O_3, CaO ve Fe_2O_3 gibi sert oksitlerin varlığı nedeni ile seramik endüstrisinde hammadde olarak kullanım olanaklarını araştıran çalışmalar da mevcuttur (Benavidez et al. 2003; Villanova and Bergmann 2007; Bayca vd. 2008). Ancak literatürde metal matrisli kompozit üretiminde taban cürufunun takviye elemanı olarak kullanımı ile ilgili çalışmalar çok nadirdir. Taban cürufunun içeriğinde bulunan SiO_2, Al_2O_3, CaO ve Fe_2O_3 gibi sert oksitlerin varlığı, takviye elemanı olarak kullanımında umut vericidir. Bu nedenle metal matrisli kompozit üretiminde katma değerli bir ürün olarak ortaya çıkması olasıdır.

Bu çalışmada otomotiv ve havacılık endüstrisinde sıklıkla kullanılan Al6061 alaşımına partikül takviyeli kompozit üretiminde sıklıkla kullanılan SiC ve Al_2O_3 seramiklerinin yanı sıra taban cürufu tozu ilave edilerek metal matrisli hibrit kompozitler üretilmiştir. Otomotiv endüstrisinde eş çalışan parçaların sayısı oldukça fazla olup, eş çalışan parçalarda meydana gelen aşınmaların parça ömrünü etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğu göz önüne alındığında üretilen kompozitlerde elde dilecek sertlik artışı ve aşınma miktarındaki azalma direk olarak ömür artışında önemli bir etken olacaktır. Bunun yanı sıra kompozitlerde kullanılan karbür ve sert seramik takviye elemanlarının üretimi çok teknolojik ve pahalı bir süreç olduğundan, bunları üretebilen ülke sayısı oldukça sınırlıdır. Bu yüzden ülkeler ihracata yönelmekte bu da hem ekonomik kayıplara hem de daha fazla enerji tüketimine neden olmaktadır. Böylece geleneksel takviye elemanları yerine atıkların kullanımı çok daha önemli hale gelmektedir. Taban cürufu tozu da hem bertaraf edilmesindeki zorluklar hem de içeriği nedeni ile önemli bir takviye elemanı olmaya aday bir atık olarak değerlendirilerek bu çalışma da kompozitin sertlik ve aşınma değerlerine etkisi ve SiC ve Al_2O_3 seramikleri ile uyumuna odaklanılmıştır.

2. Gereç ve Yöntemler

Bu çalışmada matris malzemesi olarak Al6061 alaşımı, geleneksel takviye elemanlarından otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan SiC ve Al_2O_3 seramikleri ve atık takviye malzemesi olarak ise Zonguldak Eren Termik Santralinden temin edilen taban cürufları kullanılmıştır. SiC ve Al_2O_3 seramikleri 22-59µm arası tane boyutunda toz olarak piyasadan temin edilmiştir. Taban cürufları ise öncelikle bilyalı değirmende toz haline getirilip, daha sonra 250 ve 500 meshlik elekler kullanılarak elek analizinde 250 meslik elekten geçen, 500 meslik elekten geçmeyen tozlar toplanarak 22-59µm tane boyutuna sahip taban cürufu tozları elde edilmiştir. Al6061 alaşımının kimyasal kompozisyonu Tablo I'de, Al6061 ve geleneksel takviye elemanlarının fiziksel, mekanik özellikleri Tablo II'de, literatürden alınan taban cürufuna ait farklı kimyasal kompozisyonlar ağırlıkça % olarak Tablo III 'de verilmiştir.

Tablo I. Al 6061'in Kimyasal Bileşimi (ağırlıkça %) (https://asm.matweb.com., 03.04.2023)

Fe	Si	Cr	Mn	Mg	Zn	Cu	Ti	Diğer	Al
0,5	0,6-1,0	0,1	0,2-0,8	0,8-1,2	0,25	0,6-1,1	0,1	0,15	Kalan

Tablo II. Al6061, Al_2O_3 ve SiC'ün Fiziksel ve Mekanik Özellikleri (https://asm.matweb.com., 03.04.2023)

Özellik	**Al6061**	**Al_2O_3**	**SiC**
Yoğunluk (g/cm^3)	2,7	3,9	3,2
Maksimum kullanım sıcaklığı (^0C)	582	1700	1500
Eğme mukavemeti (MPa 20^0C'de)	386	350	450
Basma mukavemeti (MPa 20^0C'de)	607	2400	2650
Elastik modül (GPa)	68,9	395	425
Poission oranı	0,33	0,25	0,27
Sertlik (HV)	107	1750	2200

Tablo III. Taban Cürufunun Kimyasal Kompozisyonları (ağırlıkça %)

Kaynak	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**K_2O**	**Na_2O**	**CaO**	**MgO**	**SO_3**	**TiO_2**
Sanjith et al. 2015	48,71	29,23	4,29	0,55	1,45	7,56	1,84	3,96	2,41
Sani et al. 2010	54,80	28,50	8,49	0,75	0,08	4,20	0,35	0,12	2,71
Aydın 2016	55,10	28,10	8,30	1,50	1,90	1,10	0,85	1,40	1,75
Argiz et al. 2017	52,20	27,95	7,00	0,60	1,30	5,90	1,72	0,80	2,53
Martins et al. 2010	52,02	25,23	9,11	1,14	1,45	6,00	2,17	0,65	2,23

Kompozitler iki aşamalı bir karıştırma işlemi ihtiva eden, metal kalıba döküm yöntemi ile üretilmişlerdir. Yöntemin ilk aşamasında matris malzemesinin sıcaklığı elektrikli fırın kullanılarak 700ºC'ye yükseltildikten sonra 600ºC ye düşürülmüştür. Karıştırma işleminin ilk aşamasında bu sıcaklıkta yarı ergimiş halde bulunan matrise, sıcaklığı 250ºC ye çıkarılmış ve bu sıcaklıkta belli bir süre beklemiş takviye elemanları ilave edilerek elle karıştırılır. İkinci aşamada, takviye elemanları ilave edilmiş matris tekrar ısıtılarak sıcaklığı 800ºC'ye yükseltilir. Bu sıcaklıkta 10 dk boyunca 250d/d hızla karıştırılır. Bu aşamaya mekanik karıştırma adı verilir. Bu

esnada erimiş halde bulunan karışıma azot gazı püskürtülerek, ortamdan oksijenin uzaklaştırılması ve karbür oluşumu engellenmiş olur. Daha sonra önceden 250ºC ye ısıtılmış çapı 14mm, boyu 300mm olan üç kollu metal kalıplara oda sıcaklığında döküm yapılır. Soğuyan numuneler metal kalıptan çıkarılarak, deneyler için boyutlandırılır. Şekil 1'de karıştırmalı döküm ünitesi ve metal kalıp verilmiştir.

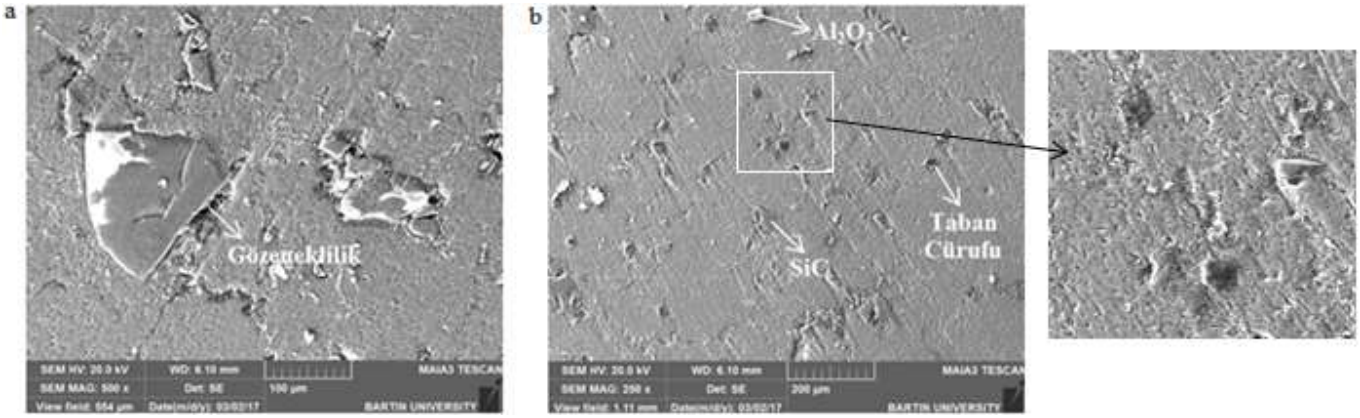


Şekil 1. Karıştırma Ünitesi ve Metal Kalıba Döküm

Kompozit üretiminde %1 , %3 ve %5 oranında takviye malzemeleri kullanılmıştır. %4 - %6 ve %8 takviye oranları kullanılarak ikili hibrit kompozitler ve %7 - %9 ve %11 takviye oranları ile üçlü hibrit kompozitlerin üretimi yapılmıştır. Kompozitlerin mikro yapıları görüntülemeleri için ise 6-1000000 x büyültme özelliğine sahip FEI Quanta FEG 450 marka elektron mikroskobu, sertlik ölçümlerinde ise Brinell sertlik ölçüm metodu kullanılmıştır. Aşınma deneyleri sabit kayma mesafesi, sabit dönme hızında 1N, 3N ve 5N yük değerleri uygulanarak Pin-On Disk cihazı ile yapılmıştır. Ayrıca sertlik ve aşınma ölçümlerinde meydana gelebilecek hataları bertaraf etmek için her bir numuneden 3 adet üretim yapılarak tüm ölçümler bu 3 numune için de aynı şartlarda tekrarlanmıştır.

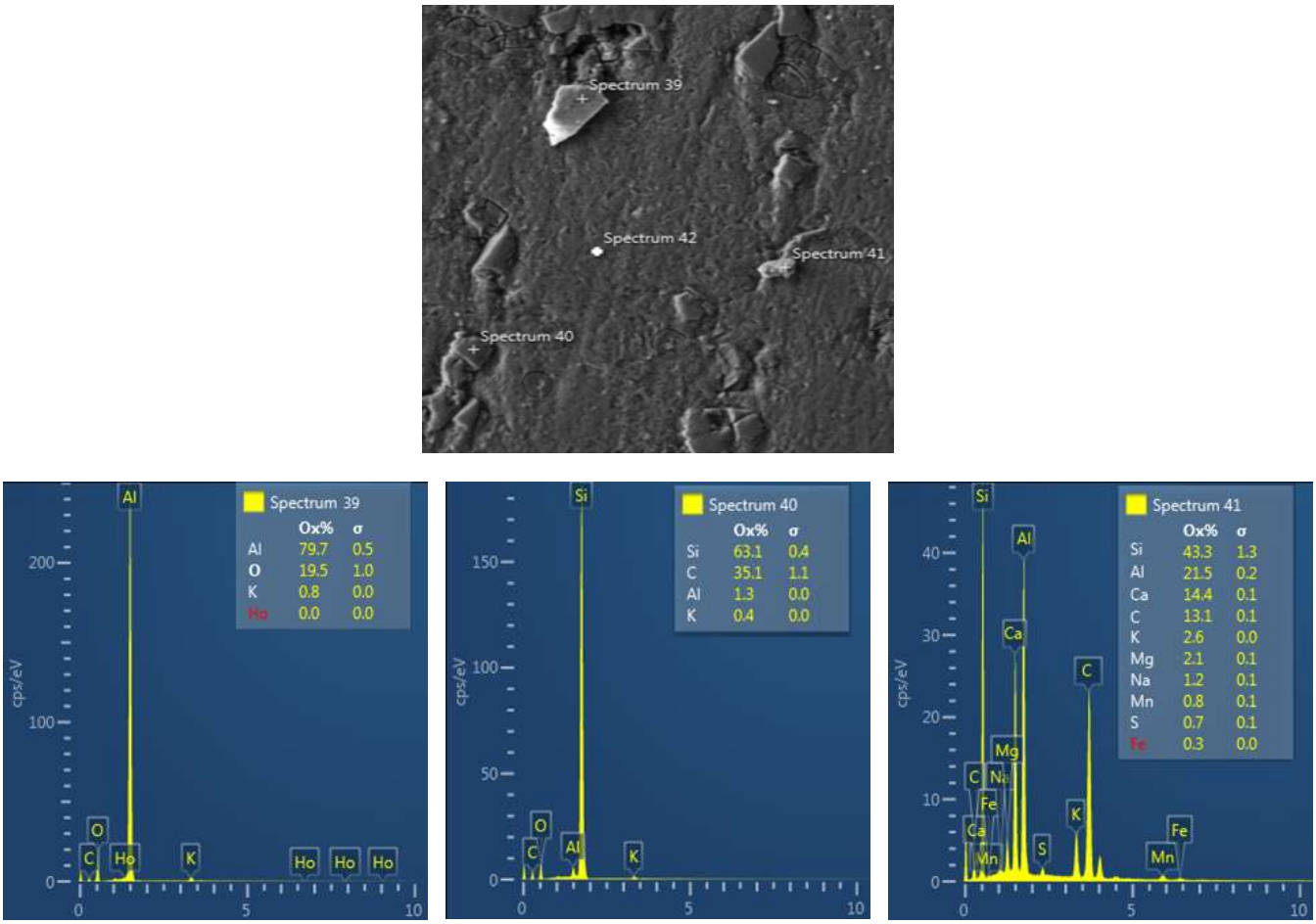
3. Bulgular ve Tartışma

Hassas kesme cihazında kesilen kompozitler bakalite alındıktan sonra mikro yapı incelemeleri için otomatik yüzey parlatma ve numune hazırlama cihazında sırasıyla 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh numarasına sahip zımparalar kullanılarak 400 d/d hızda 5 dakika süreyle zımparalanıp daha sonra keçe ile parlatılmıştır.



Şekil 2. (a) TEM 500 Büyütme; **(b)** TEM 250 Büyütme

Şekil 2'de verilen mikro yapı fotoğrafları incelendiğinde takviye elemanlarının içyapıda homojen dağıldıkları gözlemlenmiştir. Genel olarak takviye ile matris arasında iyi bir yapışma olduğu belirlense de bazı bölgelerde gözeneklilik meydana geldiği tespit edilmiştir. Eriyik haldeki Al6061 alaşımına eklenmeden takviye elemanları önce ön ısıtmaya tabi tutulduklarından genel olarak topaklanma gözlenmemiştir. Benzer bir durumu Ramachandra ve Radhakrishna (2006), karıştırmalı döküm tekniği ile ürettikleri Al (LM25) alaşımına, 500°C sıcaklığında ön ısıtmaya tabi tuttukları SiC takviyeyi ağırlıkça %5-10 oranında ekleyerek ürettikleri kompozit de gözlemlemişlerdir (Ramachandra and Radhakrıshna 2006). Sharma ve arkadaşları (2020) ise takviyeyi 200ºC sıcaklıkta ön ısıtmaya tabi tutarak ürettikleri kompozitin içyapısında topaklanma gözlemlememişlerdir (Sharma et al. 2020). Buna rağmen mikro yapı fotoğraflarından bazı bölgelerde topaklanma meydana geldiği görülmekte ve bunun da karıştırıcının geometrisi, karıştırma süresi vb. parametrelerin değiştirilmesi ile ileriki çalışmalarda giderilebileceği düşünülmektedir.

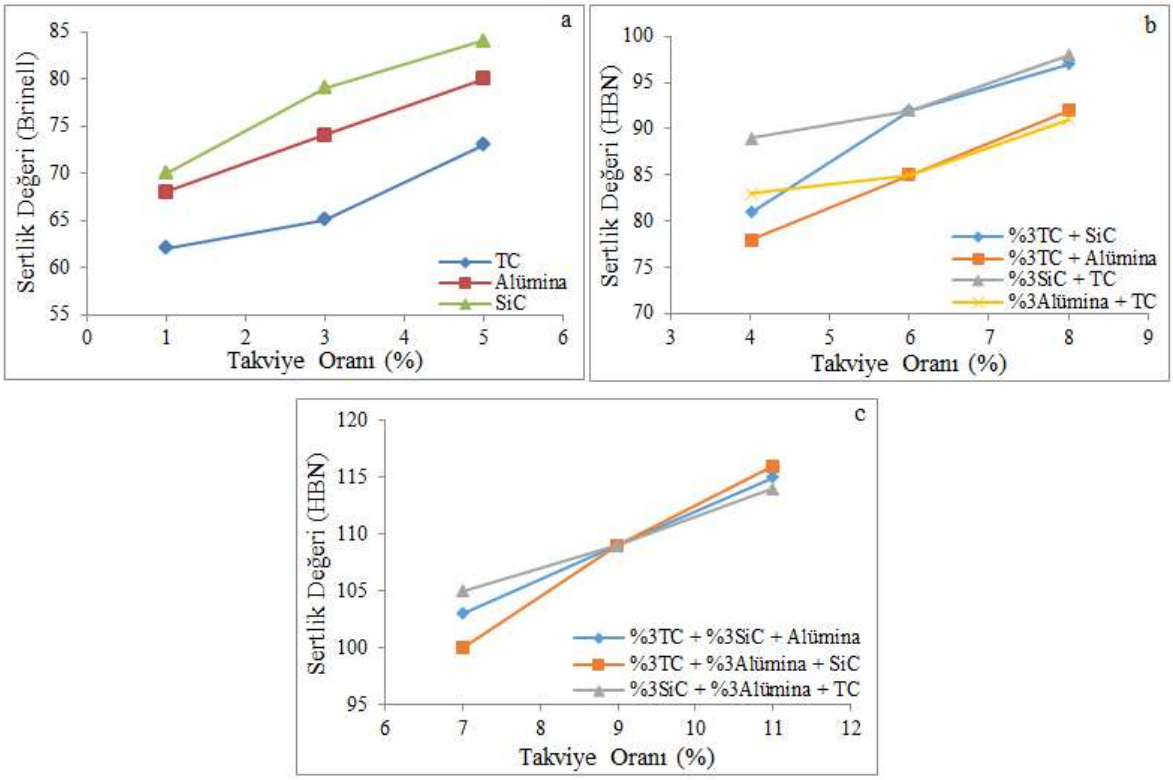


Şekil 3. Mikroyapı ve EDS Analizleri

Şekil 3'de verilen mikro yapı fotoğrafında da hem homojen dağılım hem de matris takviye arasında iyi bir yapışma görülmektedir. EDS analizleri incelendiğinde ise içyapıda SiC, Al_2O_3 ve taban cürufunun varlıkları belirlenmiştir.

3.1. Sertlik

Kompozitlerin sertlik ölçümleri ASTM (American Society for Testing and Materials) standartlarının E-10 versiyonuna göre Brinel sertlik ölçüm test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Brinell Sertlik Değeri (BSD) ölçümü için her bir numune üzerinde 5 farklı noktada ölçümler yapılmış, en yüksek ve en düşük değerler çıkarılmış, kalan değerlerin aritmetik ortalamalarının alınması yöntemiyle sertlik değerleri belirlenmiştir. Şekil 3'de Al6061 alaşımına % 1, 3 ve 5 oranlarında ilave edilen taban cürufu, Al_2O_3 ve SiC'ün alaşımın sertliğine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4. (a) Takviye elemanlarının kompozitin sertliğine etkisi; **(b)** Takviye elemanlarının ikili hibrit kompozitin sertliğine etkisi; **(c)** Takviye elemanlarının üçlü hibrit kompozitin sertliğine etkisi.

Al6061 alaşımı iki kademeli karıştırmalı döküm yöntemi ile tekrar üretilmiş ve sertliği 58BSD ölçülmüştür. Şekil 4 (a)'da taban cürufu, Al_2O_3 ve SiC'ün %1, 3 ve 5 oranlarında Al6061 alaşımına ilave edilmesi ile üretilen kompozitlerin sertlik değişimi gösterilmiştir. Taban cürufu, Al_2O_3 ve SiC'ün artan oranlarında kompozitin sertliği artmaya devam etmiştir. %5 taban cürufu takviyesi Al6061 alaşımının sertliğini %25.86, %5 Al_2O_3 takviyesi %37.93 ve %5 SiC takviyesi ise %44.83 oranında arttırmıştır. %5 taban cürufu ilavesi Al6061 alaşımının sertliğini 73BSD, %5 Al_2O_3 ilavesi 80BSD ve %5 SiC ilavesi ise 84BSD değerine yükseltmiştir.

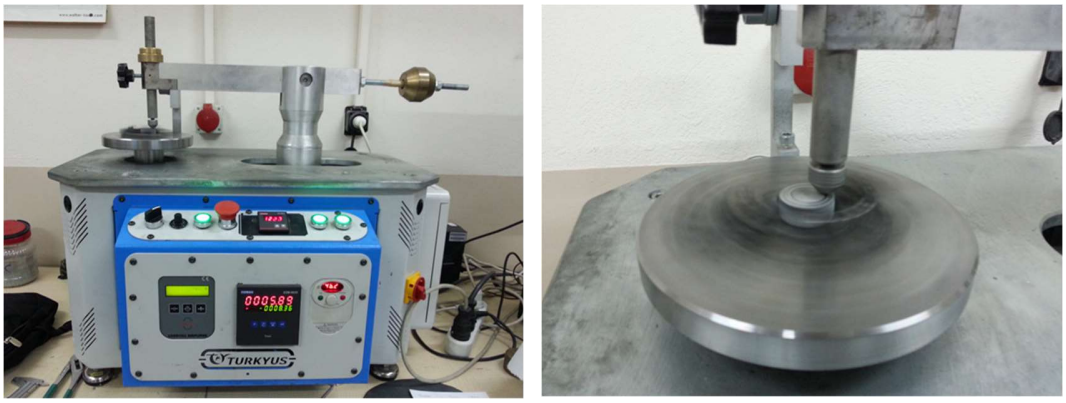
Şekil 4 (b)'de % 3 oranında sabit tutulmuş 1. takviye ile birlikte, 2. takviyenin % 1, 3 ve 5 oranlarında ilave edilmesi ile üretilen ikili hibrit kompozitin sertlik değişimi gösterilmiştir. 2. takviye elemanının artan oranlarında hibrit kompozitin sertliğinin arttığı belirlenmiştir. Sertliği 65BSD olan %3 taban cürufu takviyeli Al6061 alaşımına %5 oranında Al_2O_3 ilavesi sertliği % 41.54, %5 oranında SiC ilavesi ise % 49.23 oranında arttırmıştır. Sertliği 79BSD olan %3 SiC takviyeli Al6061 alaşımına %5 oranında taban cürufu ilavesi sertliği % 24.05 oranında arttırırken, sertliği 74BSD olan %3 Al_2O_3 takviyeli Al6061 alaşımına %5 oranında taban cürufu ilavesi ise sertliği % 22.97 oranında arttırmıştır. İkili hibrit kompozitlerde en yüksek sertlik değeri %3 SiC + %5 TC takviyeli olanda 98BSD olarak ölçülmüştür.

Şekil 4 (c)'de % 3 oranında sabit tutulmuş 1. ve 2. takviye ile birlikte, 3. takviyenin % 1, 3 ve 5 oranlarında ilave edilmesi ile üretilen üçlü hibrit kompozitin sertlik değişimi gösterilmiştir. Üçlü hibrit kompozitlerde en düşük sertlik değeri %3 TC + %3 Al_2O_3 + %1 SiC takviyeli olanda 100BSD olarak, en yüksek sertlik değeri ise %3 TC + %5 SiC + %3 Al_2O_3 takviyeli olanda 116BSD olarak belirlenmiştir.

Literatür incelendiğinde elde edilen sonuçları destekleyen araştırmaların olduğu görülmektedir. Örneğin Pawar ve arkadaşları (2014), karıştırmalı döküm yöntemiyle saf alüminyuma %2.5 ile 10 arasında değişen 4 farklı oranda SiC ilave ederek ürettikleri kompozitlerde, ilave miktarının artmasıyla kompozitin sertliğinin arttığını ve %10 SiC ilaveli kompozitin sertliğinin 60BSD olduğunu bildirmişlerdir (Pawar and Utpat 2014). Benzer şekilde Surappa ve Rohatgi (1981), karıştırmalı döküm yöntemiyle saf alüminyuma %1 ile 3 arasında değişen 3 farklı oranda Al_2O_3 ederek ürettikleri kompozilerde, ilave miktarının artmasıyla kompozitin sertliğinin arttığını ve %3 Al_2O_3 ilaveli kompozitin sertliğinin 37BSD olduğunu bildirmişlerdir (Surappa and Rohatgi 1981).

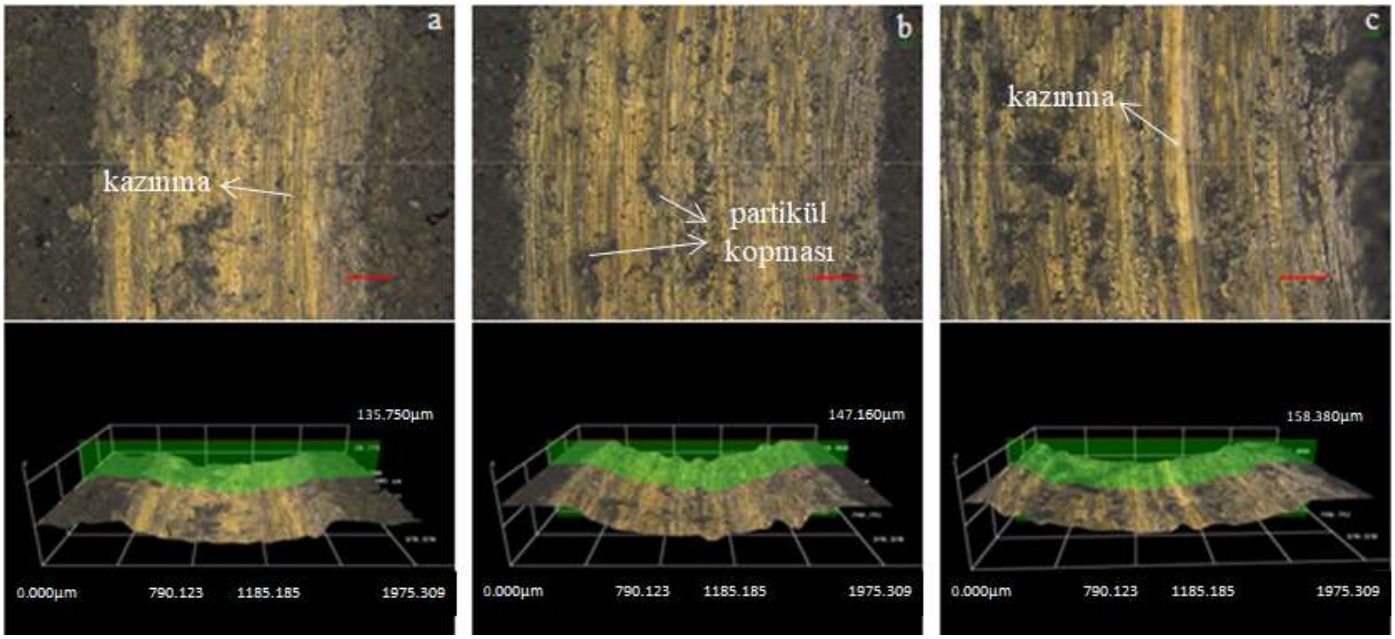
3.2. Aşınma

Üretilen kompozitlerin aşınma deneyleri şekil 5'te verilen TURKYUS marka pin-on disk cihazı kullanılarak, ASTM G 99 standardına göre yapılmıştır. Aşınma testlerinde 5mm çapında 60HRC değerine sertleştirilmiş çelik bilya uç kullanılmıştır.



Şekil 5. Aşınma test cihazı

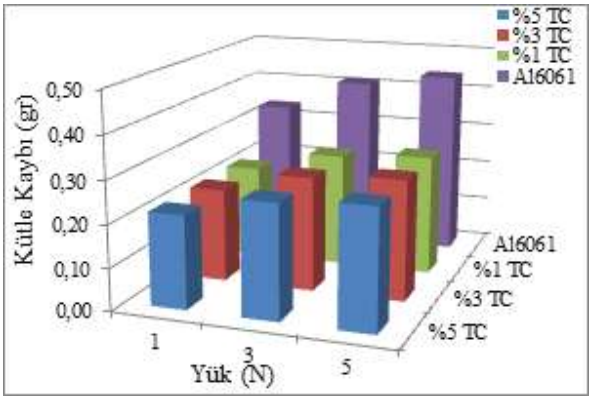
Deneyler 300m sabit kayma mesafesinde, 320dev/dk sabit kayma hızında ve 1N, 3N, 5N yük değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Tüm aşınma deneylerinin başlangıcında ve bitiminde, numunelerin ağırlıkları hassas terazi kullanılarak ölçülmüş ve kütle kaybı belirlenmiştir. Hem deney esnasında hem de ölçümler esnasında meydana gelebilecek hataları bertaraf etmek için her bir numuneden 3 adet üretilerek bu numuneler için aşınma deneyleri aynı şartlarda tekrarlanmıştır. Şekil 6'da %5 oranında taban cürufu içeren kompozitin 1N, 3N ve 5N yük değerlerinde aşınan yüzeylerine ait metal mikroskobu ve profilometre fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 6. Aşınma ve Profilometre Fotoğrafları **(a)** 1N; **(b)** 3N; **(c)** 5N

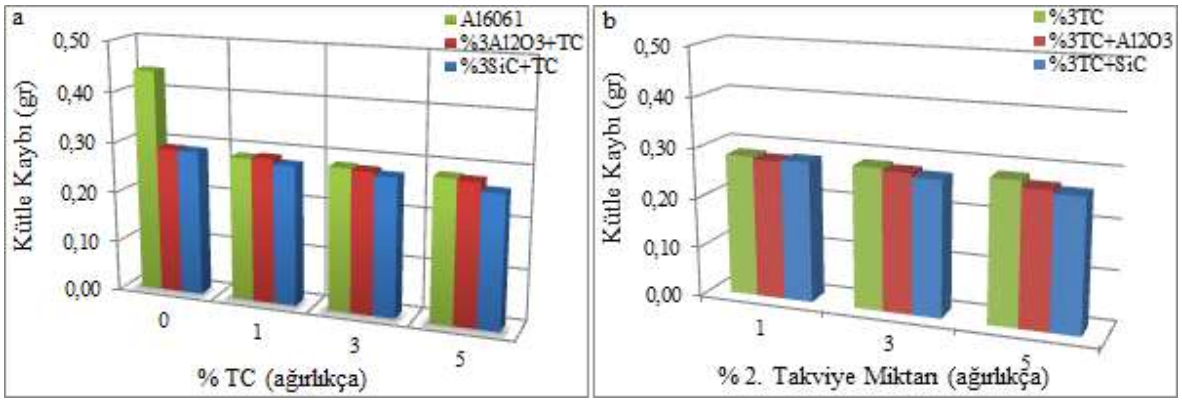
Şekil 6'da uygulanan yük arttıkça aşınan yüzeyin genişliği ve derinliği artmaktadır. Bununla birlikte yükün artması ile hem daha pürüzlü bir yüzey meydana gelmiş hem de yüzeyden kopan takviye elemanı miktarı artarak daha gözenekli bir yüzey oluşmuştur. Bunun nedeni matris/takviye ara yüzeyinde iyi bir yapışma meydana gelmemesi ve bazı bölgelerde topaklanmadan dolayı takviye partiküllerinin arasına yeterli miktarda matrisin yerleşememesi olabilir. %5oranında taban cürufu içeren kompozitin aşınmış yüzey morfolojisi incelendiğinde incelendiğinde kayma yönünde çizikler, kısıtlanmış oluklar ve pürüzsüz eğrilerin olduğu net bir şekilde görülmektedir. Bu çizikler aşınma testi sırasında numune yüzeylerinden kopan parçaların yüzeyleri çizmesinden abrasif türü bir aşınma mekanizmasının kanıtı olduğu söylenebilir.

Şekil 7'de Al6061 alaşımına ağırlıkça %1, 3 ve 5 oranlarında katılan taban cürufunun kompozitin aşınma miktarına etkisi verilmiştir.



Şekil 7. Taban cürufunun kompozitin aşınma miktarına etkisi

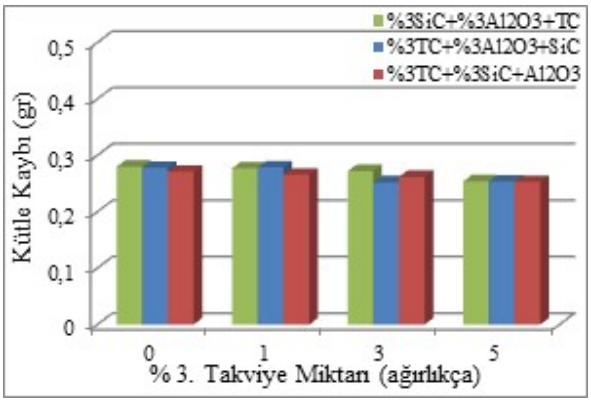
Şekil 7'de görüldüğü gibi, yükün artması ile hem Al6061 alaşımının hem de kompozitin aşınma miktarı artmıştır. Bununla birlikte Al6061 alaşımına katılan taban cürufunun her oranda aşınmayı azaltma yönünde bir etkisi olmuştur. Al6061 alaşımında 1N yük altında gerçekleştirilen kuru sürtünmeli aşınma deneyi sonucunda 0.3367gr kütle kaybı olurken, yük 5N değerine çıkarıldığında kütle kaybı 0.4415gr olmuştur. Alaşımına katılan taban cürufu miktarı ağırlıkça %5 olduğunda 1N yük altındaki kütle kaybı 0.2190gr, 5N yük de ise 0.2817gr olarak belirlenmiştir. Bu durumda %5 taban cürufu ilavesi ile kütle kaybında yaklaşık %34 oranında azaldığı belirlenmiştir. Takviyenin belli bir oranına kadar sertlik ile aşınma arasında bir ters orantıdan bahsedilebilir. Sertliğin artması ile aşınma miktarında azalma meydana gelmiştir. %5 taban cürufu katkısı ile Al6061 alaşımının sertliği 58BSD'den 73BSD'ne yükselmiş bu da aşınma miktarının azalmasına neden olmuştur. Bunun nedeni olarak taban cürufunun yapısında bulunan sert SiO_2 ve Al_2O_3 partikülleri gösterilebilir.



Şekil 8. (a) Taban cürufunun %3 SiC ve %3 Al_2O_3 ilaveli ikili hibrit kompozitin aşınmasına etkisi; **(b)** SiC ve Al_2O_3'ün %3 taban cürufu ilaveli ikili hibrit kompozitin aşınmasına etkisi

Şekil 8 (a)'da Al6061 alaşımına, %3 Al_2O_3 ve %3 SiC ilaveli kompozite, %1, 3 ve 5 oranlarında katılan taban cürufunun ikili hibrit kompozitin aşınma miktarına etkisi verilmiştir. Buna göre 5N yük altında Al6061 alaşımında 0.4415gr kütle kaybı meydana gelirken, alaşıma %5 oranında taban cürufu ilavesi ile kütle kaybı 0.2817gr'a düşmekledir. %3 Al_2O_3 + %5 taban cürufu ilaveli ikili hibrit kompozit de 0.2786gr kütle kaybına karşılık %3 SiC + %5 taban cürufu ilaveli ikili hibrit kompozit de ise 0.2615gr kütle kaybı ölçülmüştür.

Şekil 8 (b)'de %3 taban cürufu katkılı Al6061 alaşımının 5N yük altında kütle kaybı 0.2830gr olarak belirlenmiştir. %3 TC + %5 Al_2O_3 ilaveli hibrit kompozitin 5N yük altında kütle kaybı 0.2704gr, %3 TC + %5 SiC ilaveli hibrit kompozitin aynı yük altında kütle kaybı ise 0.2640gr olarak ölçülmüştür. Bu durumda Al_2O_3'ün aşınmaya etkisi %4.45, SiC 'ün ise %6.71 olarak belirlenmiştir. SiC 'ün sertlik değeri Al_2O_3'den daha yüksek olduğundan elde edilen sonuçların beklenilen sonuçlar olduğu söylenebilir.



Şekil 9. Takviye elemanlarının üçlü hibrit kompozitin aşınmasına etkisi

Şekil 9'da Al6061 alaşımına ilave edilen 2 takviyenin oranı %3'de sabit tutulurken 3. takviye %1, 3 ve 5 oranında ilave edilerek üretilen üçlü hibrit kompozitlerin kuru sürtünmeli aşınma deneyinde ölçülen kütle kayıpları verilmiştir. Buna göre 5N yük altında yapılan kuru sürtünmeli aşınma deneyinde 3. takviyenin %5 ilavesi ile üretilen üçlü hibrit kompozitlerde kütle kayıpları birbirine çok yakındır. 3. takviye elemanı olarak %5TC ilavesi ile oluşan kütle kaybı 0.2539gr, %5SiC ilavesi ile oluşan kütle kaybı 0.2534gr ve %5Al_2O_3 ilavesi ile oluşan kütle kaybı ise 0.2528gr olarak ölçülmüştür.

Literatür incelendiğinde elde edilen sonuçlara ulaşan benzer araştırmaların olduğu görülmektedir. Örneğin Suresh ve arkadaşları (2020), karıştırmalı döküm yöntemiyle Al7075 alaşımına %1, 2, 3 ve 4 oranlarında Al_2O_3 + SiC ilavesiyle hibrit kompozitleri başarıyla üretmişler ve pin-on disk yönteminde 1200m sabit kayma mesafesi, 3 farklı değişken yük değeri, 3 farklı kayma hızı kullanarak kuru sürtünmeli aşınma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. 20N yük ve 2m/s kayma hızı değerlerinde Al7075 alaşımında 0.018 gr kütle kaybına karşılık, alaşıma %3SiC ve %3Al_2O_3 ilave ettiklerinde 0.014gr kütle kaybı belirlemişlerdir (Suresha et al. 2020). Benzer şekilde Paladugu ve arkadaşları (2022), karıştırmalı döküm yöntemiyle Al6061-T6 alaşımına %3Al_2O_3 + %3SiC ilavesiyle hibrit kompozit üretmişler ve takviyesiz alaşım ile hibrit kompozitin kuru sürtünmeli aşınma dayanımını karşılaştırmışlardır. Takviye eklenmesi ile aşınma dayanımının %45 oranında arttığını belirlemişlerdir (Paladugu et al. 2022). Bunların yanı sıra literatürde metal matrisli kompozit üretiminde taban cürufunun kullanıldığı sadece 1 çalışmaya rastlanılmıştır. Subramani ve arkadaşları (Subramani vd. 2022), karıştırmalı döküm yöntemi ile Al2219 alaşımına taban cürufu ve Si_3N_4 ekleyerek ikili hibrit kompozit üretmişler ve pin-on disk yöntemiyle kuru sürtünmeli aşınma değerini inceleyerek, en düşük aşınma değerinin %10 taban cürufu + %4 Si_3N_4 takviyeli kompozit de meydana geldiğini bildirmişlerdir (Subramani et al. 2022).

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Al6061 matrisli, taban cürufu, SiC ve Al_2O_3 takviyeli kompozitler iki kademeli karıştırmalı döküm yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde üretilmiştir. Takviye elemanlarının kompozitin sertliğine ve aşınma miktarına etkisi incelenmiş elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

* SEM görüntülemeleri ve EDS analizleri sonucunda içyapıda taban cürufu takviyesi belirlenmiştir. Takviye elemanları 250ºC sıcaklığında ön ısıtmaya tabi tutularak ıslatma kabiliyetleri arttırılmış bu nedenle hem matrisle uygun bir ara yüzey bağı oluşturmuş hem de topaklanma gözlenmemiştir.

* 58 HBN sertliğindeki Al6061 alaşımına eklenen %5 taban cürufu ilavesi sertliği 73BSD, %5 Al_2O_3 ilavesi 80BSD ve %5 SiC ilavesi ise 84BSD değerine yükseltmiştir.

* Sertliği 65HBN olan %3 taban cürufu takviyeli Al6061 alaşımına %5 oranında Al_2O_3 ilavesi sertliği 92BSD, %5 oranında SiC ilavesi ise 97BSD değerine yükseltmiştir. Sertliği 79HBN olan %3 SiC takviyeli Al6061 alaşımına %5 oranında taban cürufu ilavesi sertliği 98BSD değerine yükseltirken, sertliği 74HBN olan %3 Al_2O_3 takviyeli Al6061 alaşımına %5 oranında taban cürufu ilavesi ise sertliği 91BSD değerine yükseltmiştir.

* Üçlü hibrit kompozitlerde en düşük sertlik değeri %3 TC + %3 SiC + %1 Al_2O_3 takviyeli olanda 103BSD olarak, en yüksek sertlik değeri ise %3 TC + %5 SiC + %3 Al_2O_3 takviyeli olanda 116 BSD olarak belirlenmiştir.

*Tüm kompozitlerde kuru sürtünmeli aşınma durumunda artan yük ile kütle kaybı artıştır.

* Al6061 alaşımına eklenen taban cürufu tüm oranlar için kuru sürtünmeli aşınmada kompozitin kütle kaybını azaltmıştır. %5 oranında katılan taban cürufu kompozitin kütle kaybını %34 oranında azaltmıştır.

* Taban cürufu ile Al_2O_3'in birlikte takviye malzemesi olarak kullanıldığı ikili hibrit kompozit de meydana gelen kütle kaybı taban cürufu ile SiC'ün birlikte kullanıldığı kompozit deki kütle kaybına kıyasla %2.26 oranında daha fazladır.

*Taban cürufu, SiC ve Al_2O_3 in birlikte takviye malzemesi olarak kullanıldığı üçlü hibrit kompozitin ise üretilen kompozitler arasında en düşük kütle kaybına sahip olduğu belirlenmiştir.

* Kompozitlerin aşınmış yüzey morfolojisi incelendiğinde abrazif aşınma mekanizmasının etkili olduğu belirlenmiştir.

Referanslar

Annual Book of ASTM Standards, 1992, Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, vol. 04.02, ASTM, Philadelphia, PA, USA, C 618-92a, 306-308.

Argiz, C., Sanjuán, M. Á., & Menéndez, E. (2017). Coal Bottom Ash for Portland Cement Production. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, Article ID 6068286, 7 pages. .https://doi.org/10.1155/2017/6068286.

Aydın, E. (2016). Novel Coal Bottom Ash Waste Composites for Sustainable Construction. Construction and Building Materials, 124, 582-588.

Bayca, S.U., Batar, T., Sayin, E., Solak, O., & Kahraman, B. (2008). The Influence of Coal Bottom Ash and Tincal (Boron Mineral) Additions on the Physical and Microstructures of Ceramic Bodies. J. Ceram. Proc. Res., 9(2), 118-122.

Benavidez, E., Grasselli, C., & Quaranta, N. (2003). Densification of Ashes from a Thermal Powerplant. Ceram. Int, 29, 61-68. https://doi.org/10.1016/S0272-8842(02)00090-1.

Coal Combustion Byproducts, Univ. Kentucky URL http://www.uky.edu/KGS/coal/coal-for-combustionbyproducts.php., (Erişim: 25.10.2020).

Gao, J.N., Shi, N., Guo, X.B., Li, Y.F., Bi, X.J., Qi, Y.F., Guan, J., & Jiang, B. (2021). Electrochemically Selective Ammonia Extraction From Nitrate by Coupling Electron- and Phase-Transfer Reactions at a Three-Phase Interface. Environ. Sci. Technol. 55(15), 10684-10694. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c08552.

Gündoğan, K., & Özsarı, A.R.B. (2019). Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilen AA2024 ve AA6061 Matrisli, B4C ve SiC Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mikroyapı, Mekanik ve Isıl İletkenlik Özelliklerine Basıncın Etkisi. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 11(2), 657-669.

Hahn, H. T., & Tsai, S. W. (1980). Introduction to Composite Materials. Basel, Technomic Publishing Co.

Hashim, J., Looney, L., & Hashmi, M.S.J. (1999). Metal Matrix Composites Production by Stir Casting Method. Journal of Material Processing Technology, 92-93, 1-7.

Hooton, R.D., & Bickley, J.A. (2014). Design for Durability: the Key to Improving Concrete Sustainability. Construct Build Mater, 67, 422–430. https://doi.org/10.1016/ j.conbuildmat.2013.12.016.

https://asm.matweb.com (03.04.2023)

Kaczmar, J.W., Pietrzak, K., & Wlosinski, W. (2000). The Production and Application of Metal Matrix Composite Materials. Journal of Materials Processing Technology, 106(1), 58-67.

Kim, H.K., & Lee, H.K. (2015). Coal Bottom Ash in Field of Civil Engineering: a Review of Advanced Applications and Environmental Considerations. KSCE J. Civ. Eng., 19, 1802-1818. https://doi.org/10.1007/s12205-015-0282-7.

Kumar, G.B.V., Rao, C.S.P., & Selvaraj, N. (2011). Mechanical and Tribological Behavior of Particulate Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites – a review. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 10(01), 59-91.

Kumar, G.B.V., Rao, C.S.P., Selvaraj, N., & Bhagyashekar, M.S. (2010). Studies on Al6061-SiC and Al7075-Al_2O_3 Metal Matrix Composites. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, 9(1), 43-55.

Lloyd, D. (1994). Particle Reinforced Aluminum And Magnesium Matrix Composites. International Materials Review, 39(1), 1-23.

Lokesh, N., Ramachandra, M., Mahendra, K.V., & Sreenith, T. (2013). Effect of Hardness, Tensile and Wear Behavior of Al- 4.5wt % Cu Alloy / Flyash / SiC Metal Matrix Composites. IJMER, 3(1), 381-385.

Mahendra, B.M., Arulshri, K.P., & Iyandurai, N. (2013). Evaluation of Mechanical Properties of Aluminium alloy 2024 Reinforced with Silicon Carbide and Fly Ash Hybrid Metal Matrix Composites. American Journal of Applied Sciences, 10(3), 219-229.

Martins, I.M., Gonçalves, A., & Marques, J. (2010). Durability and Strength Properties of Concrete Containing Coal Bottom Ash," in Proceedings pro077: International RILEM Conference on Material Science-AdIPoC-Additions Improving Properties of Concrete-Theme, 3, 275-283.

Mondal, M., Dutta, B.K., & Panigrahi, S.C. (2008). Wear Properties of Copper-Coated Short Steel Fiber Reinforced Stir Cast Al-2Mg Alloy Composites. Wear, 265(5-6), 930-939.

Muthusamy, K., Rasid, M.H., Jokhio, G.A., Budiea, A.M.A., Hussin, M.W., & Mirza, J. (2020). Coal Bottom Ash as Sand Replacement in Concrete: a Review. Constr. Build. Mater, 236, 117507, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117507.

Paladugu, S.R.M., Aparna, N.D., & Sreekanth, P.S.R. (2022). Mechanical and Wear Analysis of Al6061-SiC/Al_2O_3/B_4C Hybrid Metal Matrix Composites Using Stir Casting Process. Materials Today: Proceedings, 56(3), 1091-1096.

Panagopoulos, A., & Haralambous, K.-J. (2020). Environmental Impacts of Desalination and Brine Treatment-Challenges and Mitigation Measures. Mar. Pollut. Bull. 161, 111773, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111773.

Panagopoulos, A., Haralambous, K.-J., & Loizidou, M. (2019). Desalination Brine Disposal Methods and Treatment Technologies-a review. Sci. Total Environ. 693, 133545, 1-23. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.351.

Pawar, P.B., & Utpat, A.A. (2014). Development of Aluminium Based Silicon Carbide Particulate Metal Matrix Composite for Spur Gear. Procedia Materials Science,6, 1150-1156.

Pawar, P.B., & Utpat, A.A. (2014). Development of Aluminium Based Silicon Carbide Particulate Metal Matrix Composite for Spur Gear. Procedia Materials Science, 6, 1150-1156.

Prasad, S.V., & Asthana, R. (2004). Aluminum Metal-Matrix Composites for Automotive Applications: Tribological Considerations. Tribology Letters, 17(3), 445-453.

Prashanth, R., Shanmugasundaram, A., Abhinavaram, J., & Jagadeesh, S. (2017). The Role of TiC on the Hardness and Wear Resistance of AA7075 Using GTA. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 12(21), 5903-5913.

Ramachandra, M., & Radhakrıshna, K. (2006). Sliding Wear, Slurry Erosive Wear, And Corrosive Wear of Aluminium/SiC Composite. Materials Science-Poland, 24(2/1), 333-349.

Ramesh, C.S., & Safiulla, M. (2007). Wear Behavior of Hot Extruded Al6061 Based Composites. Wear, 263(1-6), 629-635.

Robin, N.K., Ilangovan, S., Arul, S., & Shanmugasundaram, A. (2015). Influence of Nickel Content on Mechanical Properties of Aluminium-Boron Carbide Hybrid Composite. International Journal of Applied Engineering Research, 10(12), 32311-32320.

Rohatgi, P. (1991). Cast Aluminum-Matrix Composites For Automotive Applications. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 43(4), 10-15.

Sani, M. S. H. M., Muftah, F., & Muda, Z. (2010). The properties of special concrete using washed bottom ash (WBA) as partial sand replacement. International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology, 1(2), 65-76.

Sanjith, J., Kiran, B., Chethan, G., & Mohan Kumar, K. (2015). A study on mechanical properties of latex modified high strength concrete using bottom ash as a replacement for fine aggregate. International Journal of Emerging Engineering Research and Technology, 3(6), 114-121.

Seshappa, A., & Prasad, B.A. (2022). Swirl Cast with Wire Cut Electric Discharge Machining For Investigational Purposes on Al-7075/Al_2O_3&SiC. Materials Today: Proceedings, 68, 2258-2264.

Sharma, H., Tiwari, S.K., Kumar, A., & Singh, D. (2022). Investigation of Mechanical and Erosive Behaviour of the Al 6061-SiC Composites Fabricated by Stir Casting. Materials Today: Proceedings, 68, 446-453.

Sharma, V.K., Chaudhary, S., Singh, R.C., Vikas, V., Sonia, D., & Goel, V. (2020). Reusing Marble Dust as Reinforcement Material for Better Mechanical Performance: Studies on Compositing Aluminum Matrix. Material Research Express, 6, 1265f6.

Singh, N., Mithulraj, M., & Arya, S. (2018). Influence of Coal Bottom Ash as Fine Aggregates Replacement on Various Properties of Concretes: a review. Resour Conserv Recycl, 138, 257-271. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.025.

Singh, N., Mithulraj, M., & Arya, S. (2018). Influence of Coal Bottom Ash as Fine Aggregates Replacement on Various Properties of Concretes: a review. Resour Conserv Recycl 2018;138:257–71. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.025.

Subramani, K., Arunkumar, T., Mohanavel V., Kolappan, S., Kailasanathan, C., Rathinam, B.B., Subbiah, R., & Kumar S.S. (2022). Investigation on Wear Characteristics of Al 2219/Si3N4/Coal Bottom Ash MMC. Materials Today: Proceedings, 62(8), 5514-5518.

Surappa, M.K., & Rohatgi, P.K. (1981). Preparation and Properties of Cast Aluminium-Ceramic Particle Composites. Journal of Materials Science, 16(4), 983-993.

Surappa, M.K., & Rohatgi, P.K. (1981). Preparation and Properties of Cast Aluminium-Ceramic Particle Composites. Journal of Materials Science, 16(4), 983-993.

Suresha, S., Gowdb G.H., & Devakumar, M.L.S. (2020). Wear behavior of Al 7075/Al_2O_3/SiC Hybrid NMMC's by Stir Casting Method. Materials Today: Proceedings, 24, 261-272.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), 2020, Atık, Haber Bülteni.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), 2022, Katı yakıtlar, Haber Bülteni.

Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (TKİK), 2021, Kömür "Linyit" Sektör Raporu.

U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 2010. Human and Ecological Risk Assessment of Coal Combustion Wastes

Umanath, K., Palanikumar, K., & Selvamani, S.T. (2013). Analysis of Dry Sliding Wear Behaviour of Al6061/SiC/Al_2O_3 Hybrid Metal Matrix Composites. Composites: Part B, 53, 159-168.

Ünlü, B.S. (2008). Investigation on Tribological and Mechanical Properties of Al_2O_3–SiC Reinforced Aluminum Composites Manufactured by Casting or PM method. Materials and Design. 2008;29(10):2002-2008.

Villanova, D.L., & Bergmann, C.P. (2007). Sinterability Study of Ceramic Bodies Made from a Mixture of Mineral Coal Bottom Ash and Soda-Lime Glass Cullet. Waste Manage Res., 25, 77-82. https://doi.org/10.1177/0734242X07069764.

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development
UMAGD, (2023) 15(2), 610-614
10.29137/umagd.1286392
Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023
Araştırma Makalesi / Research Article

3B Baskılanmış Bir Kanalda Sıvı Basıncının Damlacık Boyutu İle İlişkisi

Correlation Of Fluid Pressure And Microdroplet Size In A 3D-Printed Microfluidic Chip

Mustafa Tahsin Güler[1]

[1]*Kırıkkale Üniversitesi Fen Edebiyat Fakultesi Fizik Bölümü, 71450 Yahşihan/Kırıkkale, Türkiye*

***Başvuru/Received**: 21/04/2023* ***Kabul / Accepted**: 13/05/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Öz
Bu makale 3B baskılanmış bir mikro kanalada damlacık oluşumunun sıvı basıncı ile olan ilişkisini inceler. SLA (stereyolitografi) 3B yazıcı ile reçineden şefff mikroakışkan çip imal edilmiştir. Yağ içinde su mikro damlacıkarı sıvı odaklama tasarımında oluşturulmuştur. Yağ ve su girişleri sabit basınç kayanağı ile sürülmüştür. Mikroakışkan çipin mikrodamlacık oluşturma başarımı mikroskop vasıtasıyla gözlenmiştir. Mikrodamlacıkların boyutları sıvı basıncına göre belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler
"Mikroakışkanlar, 3B baskı, Mikrodamlacık"

Abstract
This paper reports the droplet formation performance of a 3D-printed microfluidic chip according to fluid pressure. SLA (stereolithography) 3D printer was employed for manufacturing the transparent microfluidic chip from resin. Water in oil microdroplets was produced on a flow-focusing design. Oil and water inlets were driven by a constant pressure source. The droplet production performance of the microfluidic chip was monitored through a microscope. The size of water droplets was determined according to pressure values.

Key Words
"Microfluidic, microdroplet, 3D-printing"

1. Introduction

Microfluidics open an era for fast and more inexpensive analysis systems which are known as micro total analyzing systems (µTAS). Disease diagnosis (Wu, et al. 2017), determination of antibiotic resistance (Ghorbanpoor, et al. 2022), molecular tests such as PCR (Li, et al. 2023) and LAMP (Oliveira, et al. 2020), as well as organ on a chip (Wu, et al. 2020), are among the applications of microfluidics. Microchannels, which are at the core of µTAS have challenging fabrication methods that require a cleanroom process. Yet, the invention of soft lithography enabled more researchers to access the field of µTAS technology. However, the need for clean rooms remained a drawback of soft lithography. Therefore, recently developed methods started to enable the clean room-free fabrication of microchannels.

Laser machining is one of the most widely adopted alternatives for microchannel manufacturing. It is possible to machine microchannel down to 1 µm resolution (Kim, et al. 2005) through a femtosecond laser. In comparison to soft lithography, which offers 0.5 µm resolution, femtosecond laser machining is a good but expensive alternative that also enables 3D engraving. CO_2 laser machining offers a relatively cost-effective microchannel manufacturing from thermoplastic (Bilican and Guler 2020) or PDMS (Guler 2022). It is also possible to engrave microchannel mold from PMMA (Guler, et al. 2021) or PDMS (Isiksacan, et al. 2016) by CO_2 laser machining.

***Sorumlu Yazar:** gulermt@kku.edu.tr*

The invention of 3D printing led the researcher to employ 3D printers to make microchannels. Fabrication of transparent microchannel was shown employing a Fused deposition modeling (FDM) 3D printer (Nelson, et al. 2019). In another work, multi-jet modeling (MJM) 3D printing was shown to make a T-junction microchannel (Donvito, et al. 2015). Also, SLA 3D printing method was used to fabricate transparent microchannels for biological application (Kecili and Tekin 2020; Lepowsky, et al. 2018). Alternative materials, such as perfluoropolyether, were also shown to be useful in SLA 3D printing of transparent microchannels (Kotz, et al. 2018).

Droplet production in T-junction and flow-focusing geometry has been shown for FDM 3D-printed microchannels (Morgan, et al. 2016; Tsuda, et al. 2015). Bhargava et. al. showed the fabrication of microfluidic elements via SLA 3D printer to produce and sense microdroplets (Bhargava, et al. 2014). Jans et. al. showed the fabrication of parallelized 3D microchannel for multiple productions of microdroplets via SLA 3D printing. This paper presents the droplet production performance of an SLA 3D-printed microchannel. Constant pressure sources generated a flow of oil and water phase inside the channel. According to the pressure value, droplet size was investigated. The upper and lower pressure value of water for a fixed oil pressure value was determined.

2. Materials and Methods

2.1 Fabrication of microchannels

Microchannels were designed at a computer-aided design program (Fusion 360). The microchannels were printed using an SLA 3D printer (Formlabs, Form 3) from clear resin (Formlabs, Clear V4). The design file was transferred to the SLA slicer (Formlabs, Preform 3.28.1) in STL format. The designed microchannel and its orientation in the Preform are shown in Figure 1. Microchannels were printed directly over the build platform without any raft; 25 µm layer thickness was adapted in legacy print settings. Fluid inlet outlet holes were designed as 2.3 mm in diameter. Microchannels were designed as 400 x 400 µm square profiles.

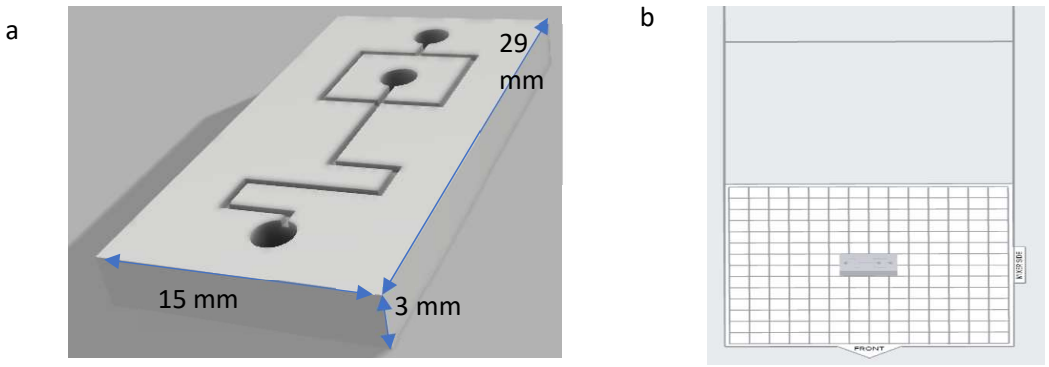


Figure 1 (a) View of the microchannel in CAD file **(b)** microchannel directly placed over the build platform in Preform software.

The 3D-printed parts were taken from the build platform via scalpel and dipped into isopropyl alcohol (IPA) for 30 minutes. Generally, the vent of the holes that are on the side, stuck to the build platform, were closed with a very thin layer of cured resin. The vent was opened using a pick and the 3D printed parts were washed under tap water and DI water respectively and dried with pressurized air. The 3D printed parts were dipped into the IPA again for 5 minutes and then washed with DI water and dried with pressurized air. The 3D printed parts were post-cured with a 405 nm wavelength UV lamp for 2 hours. After curing, 3D-printed microchannels were sealed with tape (3M crystal) from one side.

2.2 Flow in Microchannels

Fluid connections were done using silicon (Cole Palmer) or Tygon tubing (Cole Palmer) that have 0.094 inches outer diameter as shown in Fig. 2. For the connection of silicon tubing, the tip of the tubing should be cut inclined in order to fit into the hole. As the Tygon tubing is not as smooth as silicon, it doesn't need such a cutting process. DI water was mixed with red food dye to provide better monitoring. SF 100 silicon oil (Ultrakim, Ultrasil) was used as the other phase of the flow. Both DI water and silicon oil were put inside a 20 ml vial and connected to a computer-controlled pressure pump (Elveflow, OB1). Flow through the microchannel was monitored through an optical microscope.

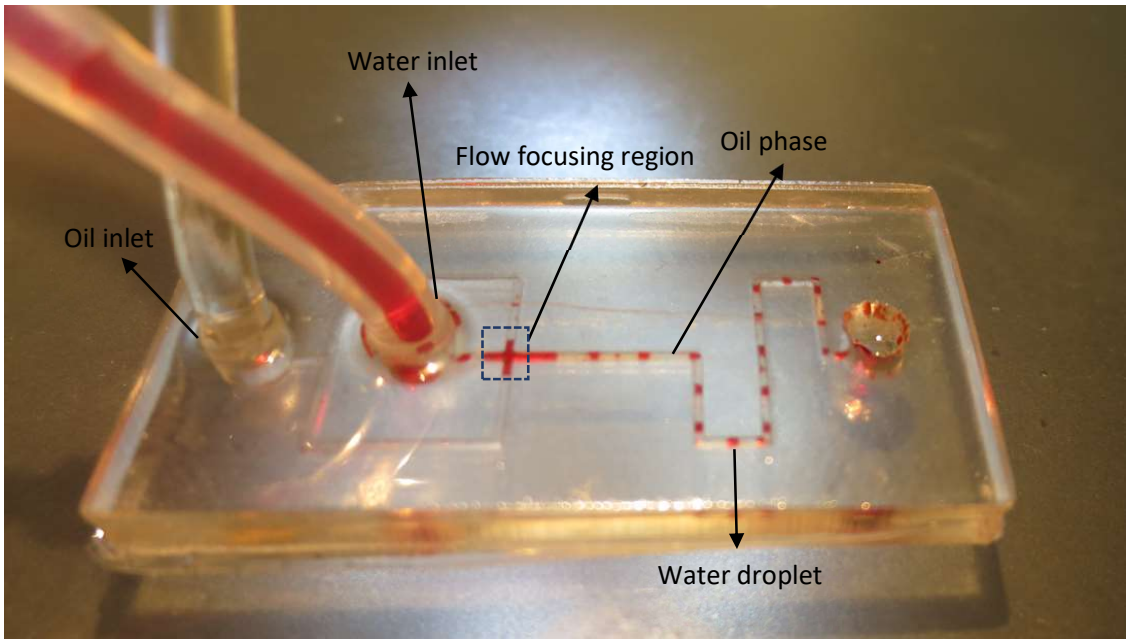


Figure 2 3D printed microfluidic chip with fluidic connection

3. Results and Discussions

3.1 Effect of pressure on droplet formation

Microdroplets were formed in flow-focusing geometry for several oil and water pressures. 100 mbar oil pressure was determined as the oil pressure for this work as it is neither too low nor too high. The produced water in oil microdroplets is shown in Fig. 3a. The droplets were formed at four different pressures of water from low to high. The low water pressure was 45 mbar and the high-water pressure was 60 mbar. On a fixed oil pressure of 100 mbar, when the water pressure was increased, the length of water droplets was increased; when the water pressure was decreased then the length of droplets was decreased as shown in Fig 3b. Above 63 mbar and below 45 mbar no stable droplet formation was achieved. Below 45 mbar water flow stopped and above 63 mbar two-phase flow evolved to continuous flow. This phenomenon can be explained by the hydrophilicity of the resin microchannel, unlike the PDMS microchannel. At the PDMS microchannel, the pressure range is wider which enables more different droplet sizes.

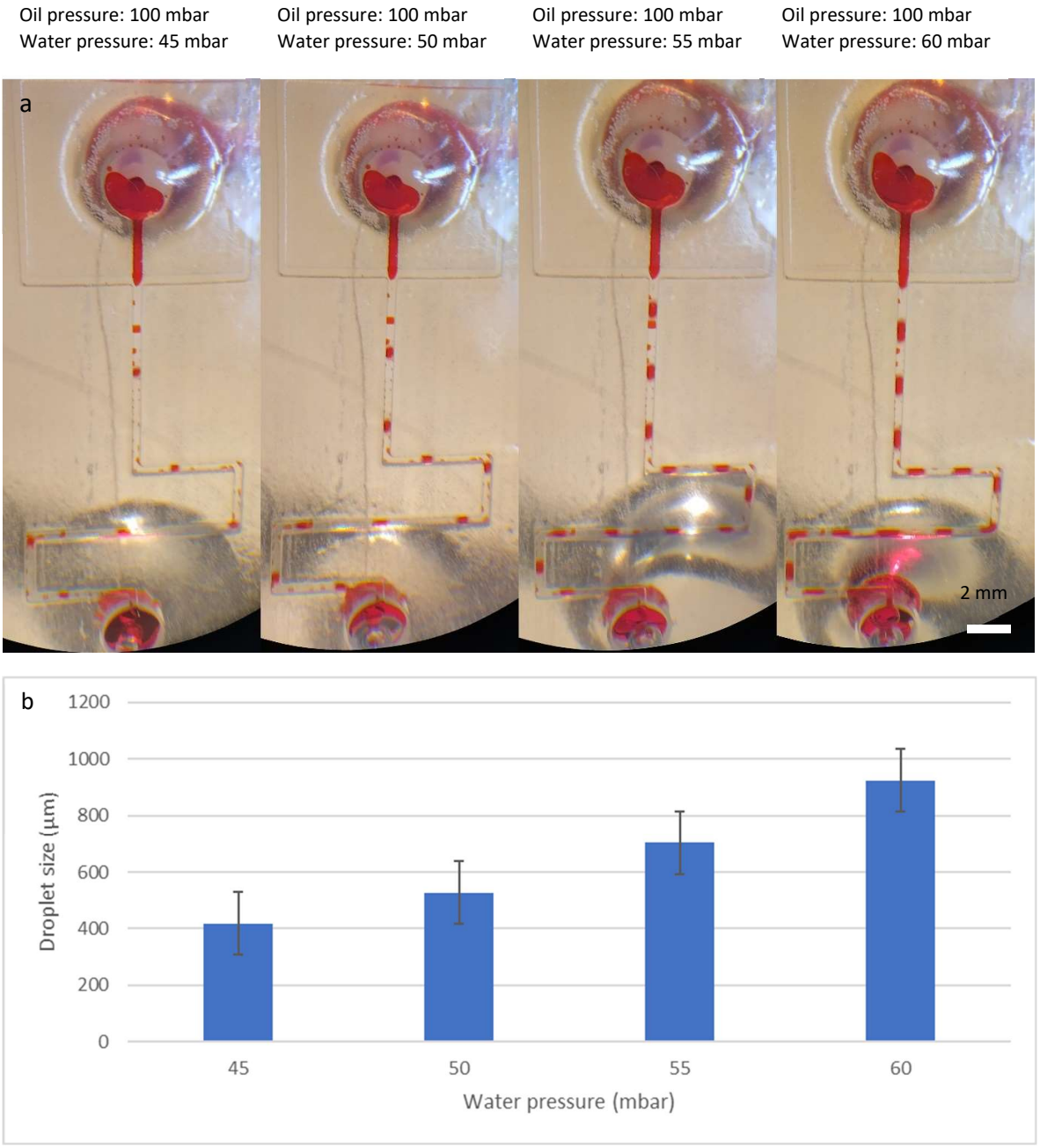


Figure 3 Water in oil droplets in a microchannel **(a)** Microscope photo microdroplets inside the channel for several water pressures. **(b)** Droplet size across water pressure.

A similar pattern showed itself at different oil pressure. At higher or lower oil pressure, by tuning the water pressure, droplet size increased or decreased which is similar to the experiment shown in Fig. 3. The only difference was the droplet formation frequency which is the out of scope of this work. Therefore, relative oil and water pressures affected the ratio of oil to water inside the microchannel.

Conclusion

Microdroplets were produced in a microchannel that has a flow-focusing geometry. Due to the hydrophilic composition of the 3D printed microchannels droplet production performance was lower than PDMS microchannels. The dripping regime was comparatively narrower than the hydrophobic channels too. The relative pressure of the water across oil pressure affected the droplet length inside the microchannel directly proportional. The total pressure of both fluids affected the droplet production frequency directly proportional as well.

Acknowledgments

This work was supported by the Scientific Research Projects Coordination Unit of Kırıkkale University. Project number 2021/043.

References

Bhargava, Krisna C, Bryant Thompson, and Noah Malmstadt (2014) Discrete elements for 3D microfluidics. Proceedings of the National Academy of Sciences 111(42):15013-15018.

Bilican, İsmail, and Mustafa Tahsin Guler (2020) Assessment of PMMA and polystyrene-based microfluidic chips fabricated using CO2 laser machining. Applied Surface Science 534:147642.

Donvito, Lidia, et al. (2015) Experimental validation of a simple, low-cost, T-junction droplet generator fabricated through 3D printing. Journal of Micromechanics and Microengineering 25(3):035013.

Ghorbanpoor, Hamed, et al. (2022) A fully integrated rapid on-chip antibiotic susceptibility test–A case study for Mycobacterium smegmatis. Sensors and Actuators A: Physical 339:113515.

Guler, M Tahsin (2022) Fabricating plasma bonded microfluidic chips by CO2 laser machining of PDMS by the application of viscoelastic particle focusing and droplet generation. Journal of Manufacturing Processes 73:260-268.

Guler, Mustafa Tahsin, Murat Inal, and Ismail Bilican (2021) CO2 laser machining for microfluidics mold fabrication from PMMA with applications on viscoelastic focusing, electrospun nanofiber production, and droplet generation. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 98:340-349.

Isiksacan, Ziya, et al. (2016) Rapid fabrication of microfluidic PDMS devices from reusable PDMS molds using laser ablation. Journal of Micromechanics and Microengineering 26(3):035008.

Kecili, Seren, and H Cumhur Tekin (2020) Adhesive bonding strategies to fabricate the high-strength and transparent 3D printed microfluidic device. Biomicrofluidics 14(2):024113.

Kim, Tyson N, et al. (2005) Femtosecond laser-drilled capillary integrated into a microfluidic device. Applied Physics Letters 86(20):201106.

Kotz, Frederik, et al. (2018) Highly fluorinated methacrylates for optical 3D printing of microfluidic devices. Micromachines 9(3):115.

Lepowsky, Eric, Reza Amin, and Savas Tasoglu (2018) Assessing the reusability of 3D-printed photopolymer microfluidic chips for urine processing. Micromachines 9(10):520.

Li, Zhenqing, et al. (2023) Lower fluidic resistance of double-layer droplet continuous flow PCR microfluidic chip for rapid detection of bacteria. Analytica Chimica Acta 1251:340995.

Morgan, Alex JL, et al. (2016) Simple and versatile 3D printed microfluidics using fused filament fabrication. PloS one 11(4):e0152023.

Nelson, Matt D, Nirupama Ramkumar, and Bruce K Gale (2019) Flexible, transparent, sub-100 μm microfluidic channels with fused deposition modeling 3D-printed thermoplastic polyurethane. Journal of Micromechanics and Microengineering 29(9):095010.

Oliveira, Beatriz, et al. (2020) Fast prototyping microfluidics: integrating droplet digital lamp for absolute quantification of cancer biomarkers. Sensors 20(6):1624.

Tsuda, Soichiro, et al. (2015) Customizable 3D printed 'plug and play'millifluidic devices for programmable fluidics. PLoS One 10(11):e0141640.

Wu, Jiandong, et al. (2017) Lab-on-a-chip platforms for detection of cardiovascular disease and cancer biomarkers. Sensors 17(12):2934.

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development
UMAGD, (2023) 15(2), 615-625.
10.29137/umagd.1217636
Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023
Araştırma Makalesi / Research Article

Eğrisel Alt Başlıklı Çelik Kirişlerin Ön Germeli Davranışının İncelenmesi

Analyzing Pre-Stressed Steel Beams with Lower Flange Arch Shape

Erkan Polat[1], Barlas Özden Çağlayan [2]

[1]*İstanbul Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, Ayazağa Kampüsü 34469, Maslak İstanbul, TÜRKİYE*
[2]*İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Kampüsü 34469, Maslak İstanbul, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 12/12/2022* ***Kabul / Accepted**: 30/05/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Öz

Bu çalışmada, daha önce teorik ve deneysel çalışmaları yapılan alt başlığı eğrisel, ön germeli I kirişin, kiriş eğrisel alt başlık formuna göre burkulma davranışı incelenip ideal kesit formunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için Sap 2000 programında 250 kadar sonlu elemanlar modeli hazırlanarak lineer elastik burkulma analizleri yapılmıştır. İlaveten FEMAP (Nastran) Sonlu elemanlar analizi programı ile de deneysel modele uygun solid sonlu elemanlar modeli oluşturulup nonlineer burkulma analizi yapılmıştır. Bu modellerde kiriş başlığı açıklık boyunca herhangi bir mesnetle desteklenmemiştir. Analizler sonucunda kiriş alt başlığının eğriselliği arttıkça burkulma yükü katsayısının arttığı görülmüştür. Ön germe kuvvetine ve açıklığa bağlı olarak, kiriş orta yüksekliği (h) / kenar yüksekliği (H) oranına göre yaklaşık h/H = 0,6 oranından düşük değerlerden itibaren, burkulma yükü katsayısının belirgin bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Bu davranışa kemer şeklini alan kiriş alt başlık levhasının burulmaya karşı gösterdiği direncin etkili olduğu yapılan analizlerle ıspatlanmıştır.

Anahtar Kelimeler
"Öngermeli çelik kiriş, Burkulma analizi, Sonlu elemanlar analizi, Alt başlığı Eğrisel I kiriş, Kemer Kiriş"

Abstract

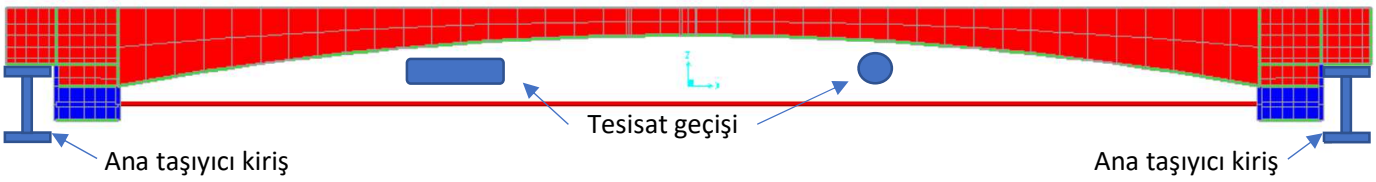
In this study, it is aimed to determine the ideal section height according to the beam mid-section height by examining the buckling behavior of pre-stressed beam with the lower flange arch shape of which theoretical and experimental studies have been done before, For this, about 250 finite element models were prepared in the Sap 2000 program and lineer buckling analyzes were performed. In addition, with the FEMAP (Nastran) Finite Element Analysis program, a solid finite element model prepared and nonlinear buckling analysis was performed. In these models, the beam head is not supported by any support along the span. As a result of the analysis made, it was seen that the buckling coefficient increased as the curvature of the lower beam flange increased. . Depending on the pre-tension force and span, it was observed that the buckling load coefficient increased significantly from values lower than the ratio of h/H = 0.6 according to the beam middle height (h) / edge height (H) . It has been proved by the analyzes that the resistance of the lower flange plate of the beam, which takes the form of an arch, against torsion is effective in this behavior.

Key Words
"Pre-stressed arch beams, Buckling analysis, Beams with Lower Flange Arch Shape, Finite elemnet analysis"

***Sorumlu Yazar:** polaterkan@hotmail.com*

1. Giriş

Alt Başlığı Eğrisel Çelik I Kirişin (AEIÇK) geliştirilmesindeki amaç, kirişin seçilen açıklık boyunca yanal burkulmaya veya burulmaya karşı herhangi bir yatay mesnetleme yapmadan, kirişin serbest bir şekilde üzerindeki yükleri güvenle taşımasıdır. Bunun yanında kirişe mimari estetik görünüm kazandırmak, kirişe zarar vermeden ve kat yüksekliğinden fedakarlık etmeden, mekanik, elektrik tesisatı gibi geçişlere yer açmak diğer önemli amaçlarındandır. Bu kiriş, özellikle açıklık boyunca kiriş yanal ötelenmesi tutulması istenmeyen veya kısıtlı olan yapılarda kullanılması avantajlı olacaktır.



Şekil 1. Öngermeli eğrisel alt başlıklı I kiriş için örnek görünüş.

Daha önce Polat ve Çaglayan (2018) tarafından AEIÇK için yapılan deneylerde, 6 m. uzunluğundaki alt başlığı eğrisel kiriş, yatayda kiriş boyunca tutulmadan akma gerilmesine kadar herhangi bir elastik burkulma gözlenmeden yüklenen düşey yükleri taşımış, plastik sınırdan sonra basınç başlığındaki yerel burkulma ile kapasiteye ulaşmıştır. Bu veriler sonucunda teorik model ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılıp, deney sonuçlarının teorik model ile birebir örtüştüğü gösterilmiştir. Bu çalışmada aynı kiriş boyutları referans alınarak diğer analizler yapılmıştır.

Bu çalışmada ideal kiriş alt başlık formunun bulunması için farklı formdaki kirişlerin burkulma yükü katsayılarını belirlenmesi hedeflenmiştir. Önceki çalışmalara ek olarak FEMAP (Nastran) Sonlu elemanlar analizi programı ile de solid sonlu elemanlar modeli oluşturulup kirişin nonlineer analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlerin birbirleriyle ve laboratuvarda yapılan test sonuçları ile tutarlı sonuç vermelerine dayanarak, farklı açıklıklar ve kiriş yükseklikleri için Sap 2000 de Shell elemanlar ile modeller hazırlanıp, kirişlerin burkulma davranışları incelenmiştir.

Literatürde yapılan araştırma sonucunda öngermeli çelik kemer kirişi ve çelik kemer köprülerin davranışı hakkında sınırlı deneysel çalışmalara rastlanmıştır.

Öngermeli çelik kirişlerle ilgili yapılan çalışmalardan bazıları şunlardır.

Literatürdeki ilk çalışma Whipple (1847) 'a aittir, dökme demir elemanların zayıf çekme kapasitelerini öngerme yoluyla telafi ettiğini fark etmiştir. Coff (1950), 76.2 metre uzunluğunda öngermeli çelik kirişli köprü üzerinde çalışmıştır. Magnel (1950-1954), halatları kirişin içine yerleştirmiş ve (gerilme uygulanan) bir çelik kirişin öngermeli deneysel sonuçlarını karşılaştırmıştır. Bir sonraki araştırmasında, çekme kablosundaki kaybı ölçebildi. Barnett (1957), Ağırlık ile öngermeli rot kolu ile Queen Post kirişi üzerinde çalışıldı. % 30'un üzerinde kapasite artışı elde etti. Petrov (1965-1967), tüm kiriş uzunluğu boyunca kablolarla tasarım yapmak için öngermeli çelik kirişlerin parametresi üzerinde çalışmıştır. Tochacek ve Mehta (1972), öngermeli çelik yapılar için güvenlik sorununun %20'ye kadar azaltılabileceğini belirtmişlerdir. Bradford (1991) öngermeli çelik kirişlerin burkulması üzerinde çalışmıştır. Özçatalbaş ve Özer (2007) içten öngermeli çelik I kiriş üretimi ve mekanik özellikleri incelenmiş, Park (2010) tendonlarla öngermeli kirişler için saptırıcı kullanıldığında eğilme kapasitesinin %30-40 oranında arttığını bulmuşlardır. Ren et ve diğerleri (2018), çoklu tendonlarla incelenen çelik derin kirişlerin eğilme özelliklerini araştırmışlardır.

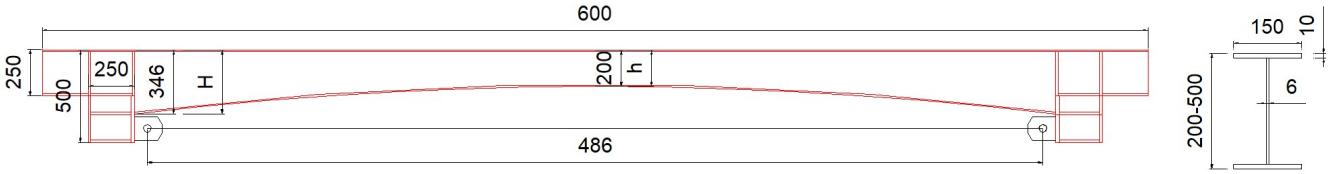
Öngermeli kemer kirişleri ile ilgili yapılan çalışmalar ise;

Austin ve Ross (1976), kemerlerin anti-simetrik burkulmasına yönelik, kritik yüklerin ve kritik reaksiyonların tanımlanması için analiz yöntemleri önerilmiştir. Pi ve Trahair (1999), çelik yay şeklindeki kirişlerin burkulma parametrelerini incelediler. Nazir (2003) Kemer köprüler üzerinde çalıştı ve öngerilmeli çelik kemerlerin köprü yük kapasitesine etkisi üzerine teorik araştırmalar yaptı. Dou ve diğerleri (2015-2018), sonlu eleman analizlerini kullanarak, düzlem içi pimli çelik kemerlerin eğilme-burulma nihai direnci ve çelik kafes kemerlerin düzlem içi elasto-plastik burkulma ve mukavemet tasarımı ile ilgili testler üzerinde çalışmıştır. Bharathi ve Kumar (2016) öngerme kullanarak mevcut kemer köprülerin yük kapasitesini arttırmayı incelediler. Sonuçlar, açıklıkları değişen kemer köprüler için karşılaştırıldı.

2. Modelleme ve Metot

İdeal kiriş alt başlık formunun bulunması için farklı alt başlık formundaki kirişlerin burkulma yükü katsayılarını bularak, katsayıların en yüksek olduğu durumdaki kiriş formunun belirlenmesi amaçlanmaktadır. Burkulma yükü katsayısı, sistem burkulma yükünün (Fb) , halihazırda uygulanan yüke (F) oranının (Fb/F) bir göstergesidir. Bir başka deyişle burkulmaya karşı güvenlik faktörüdür. Burkulma yükü katsayısı 1 den büyük ise sistemde burkulma beklenmez. 1'e eşit veya küçükse sistemde burkulma beklenir.

Yapılan analizlerde 6m. boyunda, 346 mm. kenar ve 200 mm. orta kiriş yüksekliği olan kiriş referans alınmıştır. Kiriş sol ve sağ uçlarda mesnetlere serbest olarak oturmaktadır.



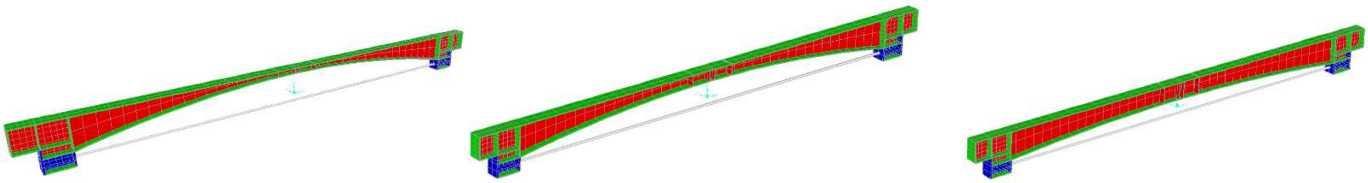
Şekil 2. Eğrisel alt başlıklı I kiriş kesiti, kenar ve orta yüksekliği

Kiriş ve halat malzeme özellikleri aşağıdaki gibidir.

Çelik kiriş malzemesi : S235 JR fy : 235 MPa

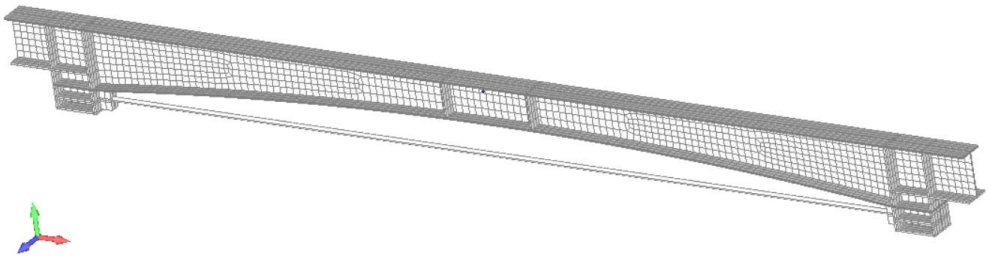
Öngerme halatı çapı Φ 28mm. TS1918 / 14 (AISI 316) fu : 180 /mm^2

Değişken kesitli bu kiriş için basınç başlığı emniyet gerilmesi 14.4 kN olarak hesaplanmıştır. Kirişe verilen ön germe kuvveti ile (ters moment etkisi oluşturacağından dolayı) kiriş alt başlığında basınç emniyet gerilmesinin biraz altında 10 kN/cm^2 basınç gerilmesi oluşturacak şekilde 98.1 kN olarak seçilmiştir. Sap2000 Modelinde öngerme kuvveti, kirişe negatif sıcaklık farkı verilerek tanımlanmıştır. Düşey yük olarak kiriş üst başlık basınç gerilmesi 13.1 kN/cm^2 ulaşacak kadar (66.34 kN) tekil yük yükleniştir. Bu tekil yük, her bir farklı kirişte aynı değerde kalacak şekilde kiriş açıklığı, 4m., 6m. ve 8m. için, kiriş kenar yüksekliği H: 340mm. ve 500 mm. için , kiriş orta yüksekliği 20 mm. artımlar ile h: 20mm~340mm. aralığı için ve öngerme kuvveti 20 kN, 50 kN 100 kN ve 150 kN değerlerinin her bir durumu için 250 kadar farklı sonlu elemanlar modeli analiz edilerek, burkulma yükü katsayısı değerleri bulunmuştur.



Şekil 3. Sap 2000 de modellenen değişik formdaki eğrisel alt başlıklı kiriş örnekleri

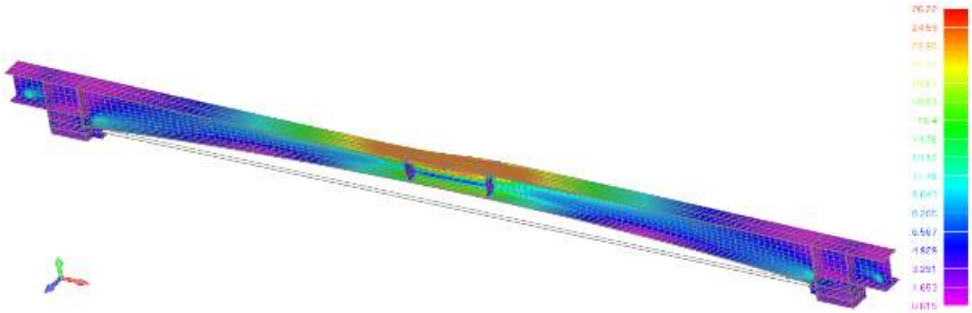
Sap 2000 lineer elastik sonlu elemanlar analizine ilave olarak, yine yukarda verilen referans AEIÇK için Femap (Nastran) programında da nonlineer analizi için solid sonlu elemanlar modeli hazırlanıp analiz edilmiştir. Femap (Nastran) programındaki nonlineer analizde malzeme ve geometrik açıdan nonlineer durum geçerlidir. Sap 2000 de bulunan burkulma yükleri, elastik burkulma yükleridir.



Şekil 4. FEMAP Femap (Nastran) Solid Sonlu elemanlar modeli ,

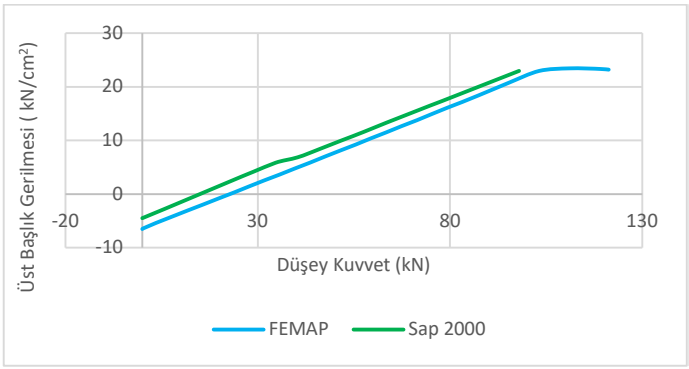
3. Analiz Sonuçlarının İrdelenmesi

Kiriş ortasında yüklenecek 66,34 kN değerindeki düşey tekil yük altında kiriş üst başlığında 13kN/cm^2 emniyet gerilmesine ulaşılmakta ve bu yük altında yapılan nonlineer burkulma analizi sonucunda ise 137,4 kN burkulma yükü bulunmuştur. Bu durumda nonlineer burkulma yükü katsayısı 137,4 / 66,34= 2,07 olmaktadır. Sap 2000 de ise elastik burkulma yükü katsayısı 1,8 olarak bulunmuştur. Bu burkulma yük katsayılarına göre yük güvenle taşınmaktadır denilebilir.

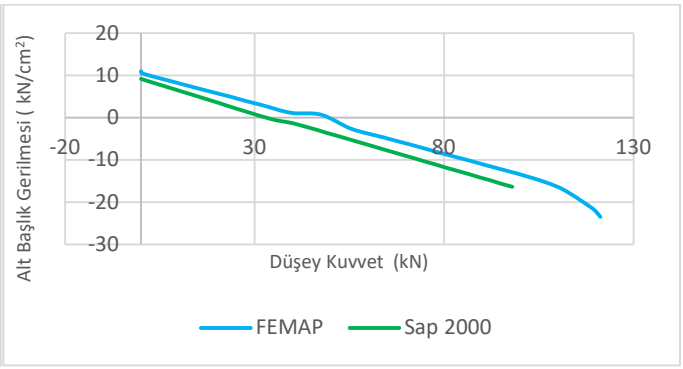


Şekil 5. FEMAP (Nastran) sonlu elemanlar modeli – nonlineer burkulma analizi sonucu

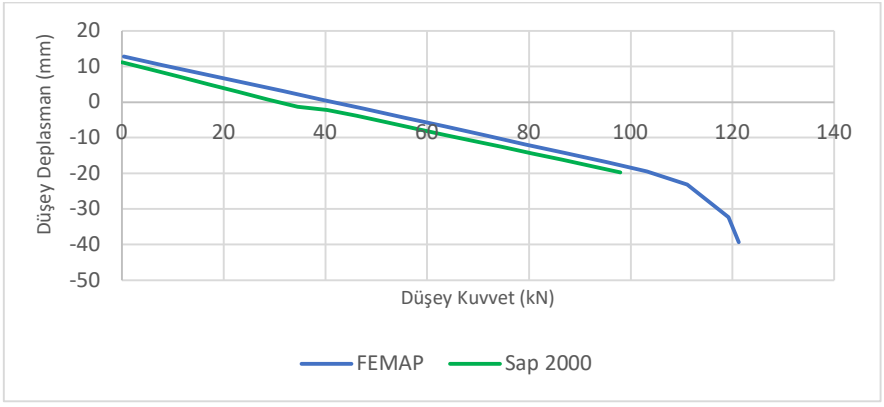
FEMAP (Nastran) sonlu elemanlar modeli ile yapılan analizde her yük artımı için Sap 2000 ve deney sonuçları ile benzer gerilme ve deplasman değerleri elde edilmiştir. Farklı programlardan tutarlı sonuç elde edilmesi modellerin doğru girildiğini ve sonuçların doğruluğunu güçlendirmektedir.



(a)



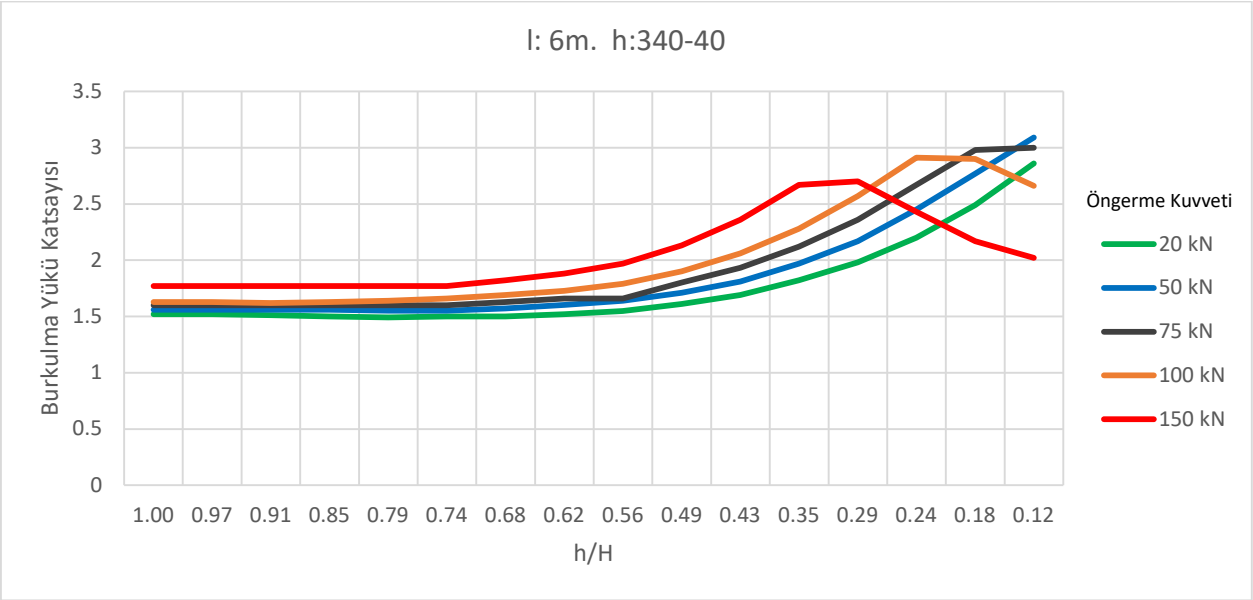
(b)



(c)

Şekil 6. FEMAP (Nastran) – Sap 2000 analiz sonuçlarına göre Kiriş alt (a) – üst (b) başlık gerilme ve düşey deplasman (c) karşılaştırma grafiği

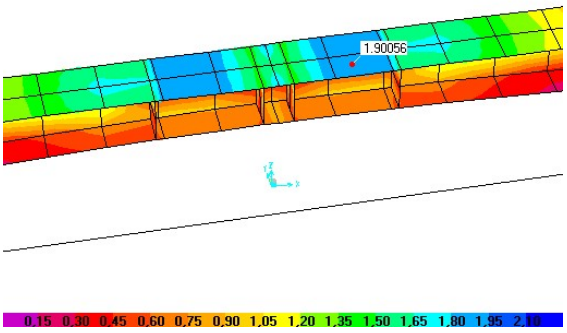
6m. boyundaki kiriş ele alındığında farklı orta yükseklikteki (formdaki) kirişler için h/H oranına göre Sap 2000 de hesaplanan burkulma yükü katsayısının değişim grafiği Şekil 5' de verilmiştir.



Şekil 7. 6 m. kiriş boyu için farklı ön germe kuvvetleri ve farklı kiriş orta yükseklikleri için bulunan burkulma yükü katsayıları grafiği

Şekil 6 de verilen grafik incelendiğinde, kiriş burkulma yükü katsayısı, kiriş orta yüksekliği yaklaşık h/H= 0,6 oranına kadar her öngerme kuvveti için fazla değişiklik göstermeden kalmaktadır. Diğer bir değişle kiriş başlıklarındaki gerilme limit değerleri aşılmıyorsa kiriş taşıma kapasitesi burkulma olmadan halen sağlanıyor demektir. 0,6 oranından sonra öngerme kuvveti arttıkça burkulma katsayısının yükseldiği fakat kiriş orta yüksekliğinin azaldığı kirişlerde düştüğü görülmektedir. Öngermenin düşük olduğu durumda ise düşük orta yüksekliğe sahip kirişlerde burkulma katsayısının belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu koşullar altında kesit yüksekliği azaldığı için kesit ortasında gerilmeler artacaktır ancak, malzeme kalitesi veya kiriş ortasında kiriş başlıklarının et kalınlığı artırılarak, gerilme yönetmeliklerin tanımladığı sınırlara getirilebilir.

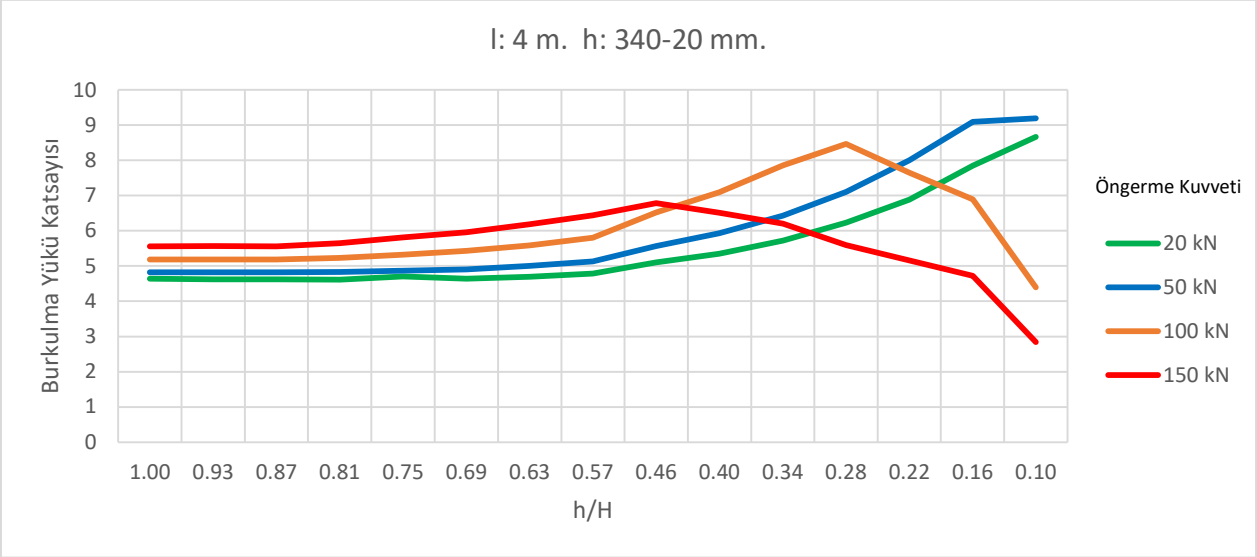
Örneğin kiriş yüksekliği ortada 100 mm olduğunda aynı düşey yük altında ve 2 ton ön germe kuvveti ile kiriş üst başlığında oluşan gerilme 1.9 t/cm^2 ye ulaşmaktadır.



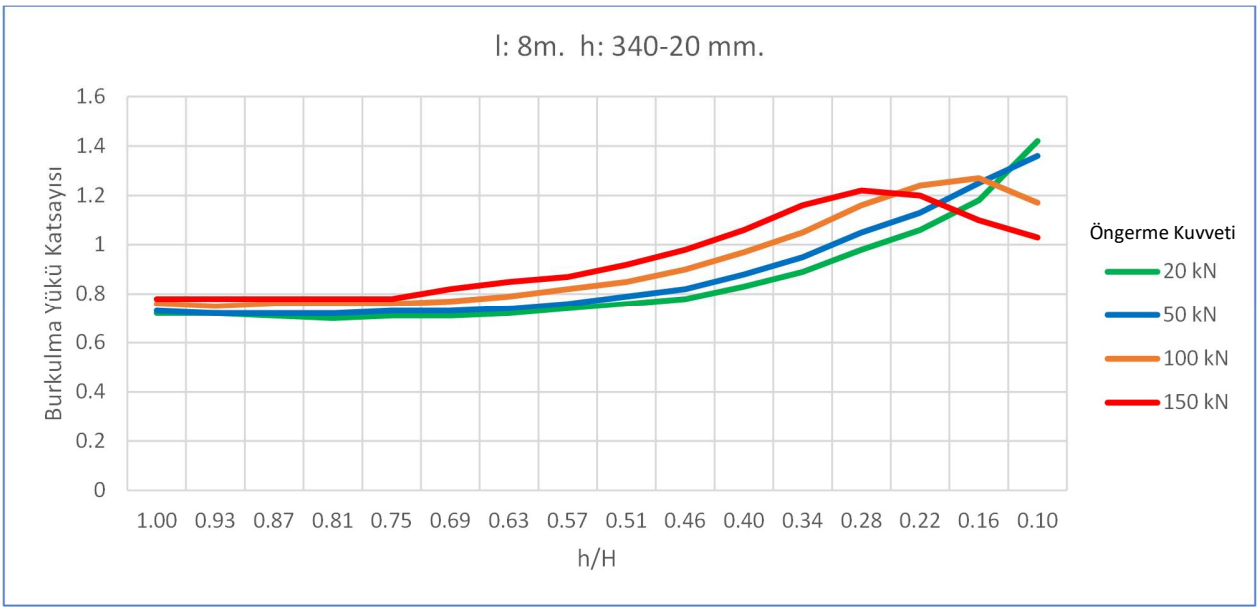
Şekil 8. 100 mm orta yükseklikteki kiriş gerilme grafiği (t/cm^2)

Sadece kiriş üst başlığında orta kısımda ki levha kalınlığı 10 mm den 15 mm ye çıkarılması durumunda gerilme 1,44 t/cm^2 ye gerileyecek ve yönetmeliklerce kabul edilen sınır değere gelecektir, ya da çelik malzemesi malzemesinin st 52 (S355) kalitesi seçilmesi durumunda elde edilen gerilme sınır değerlerin altında kalacaktır. Deplasman kontrol edildiğinde orta noktada görülen 14,9 mm düşey deplasman, kiriş net açıklığına göre L/300 oranı ile kıyaslanırsa 562/300 = 1,87cm sınır değerinin altında yani kullanılabilirlik sınırları içerisinde kalacaktır.

Şekil 6 ve Şekil 7 de verilen grafikler, 4m. ve 8m. boyundaki kirişler için sırasıyla burkulma analizi sonuçlarının grafik halinde değişimini göstermektedir.

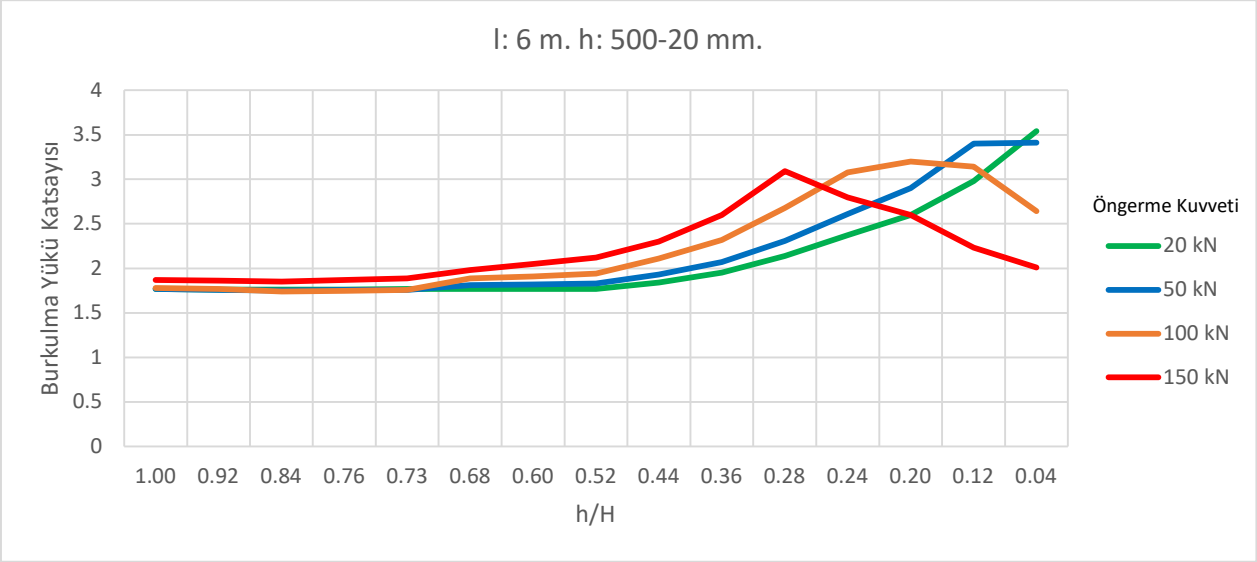


Şekil 9. 4m. kiriş boyu için farklı ön germe kuvvetleri ve farklı kiriş orta yükseklikleri için bulunan burkulma yükü katsayıları grafiği



Şekil 10. 8m. kiriş boyu için farklı ön germe kuvvetleri ve farklı kiriş orta yükseklikleri için bulunan burkulma yükü katsayıları grafiği

Kiriş H yüksekliği 340mm den 500 mm ye çıkarıldığında da benzer davranış sergilenmektedir. Şekil 11 da verilen grafiğin elde edilmesi sırasında da yükleme ve sınır koşulları aynı tutulmuş, kiriş yüksekliği değiştirilmiştir.



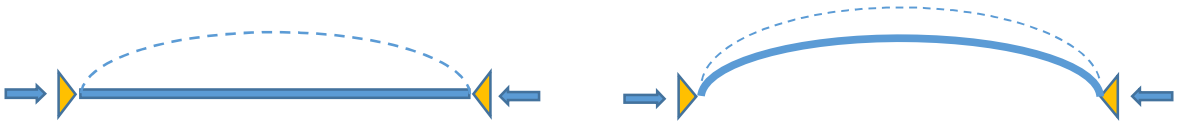
Şekil 11. 6m. kiriş boyu ve H:500 mm yüksekliği için 2-5-10 ve 15 ton ön germe kuvvetine göre burkulma katsayısı grafiği

4. Bulgular ve Tartışma

Grafikler incelendiğinde her 3 faklı açıklıktaki kiriş için h/H = 0,6 oranından sonra kiriş orta yüksekliği azaldıkça burkulma katsayısında belirgin artışlar görülmeye başlanmaktadır. Öngerme kuvvetinin artması ile de kiriş kapasitesindeki artış h/H oranı yine 0,6 oranından sonra daha belirgin bir şekilde artmakla beraber kirişte eksenel basıncın artmasına neden olduğundan bir pik noktaya ulaştıktan sonra burkulma yükü katsayısı tekrar düşmeye başlamaktadır. Bu noktada dengeli bir öngerme kuvvetinin kirişi daha yüksek bir taşıma kapasitesine ulaştıracağı anlaşılmaktadır.

Çalışmalar sonunca bulunan burkulma katsayılarının artmasının nedeni, kiriş alt başlığının kemer şeklini alması ile altta bulunan öngerme kablosu sayesinde açılmaya karşı tutularak burulmaya karşı daha dirençli hale gelmesidir. Bu durum şu şekilde açıklanabilir;

Düz bir levha basınca maruz kaldığında eksenine dik yönde kolayca burkulabilir. Fakat eğrisel bir levha, basınç altında burkulmadan, sadece daha fazla eğilecektir.

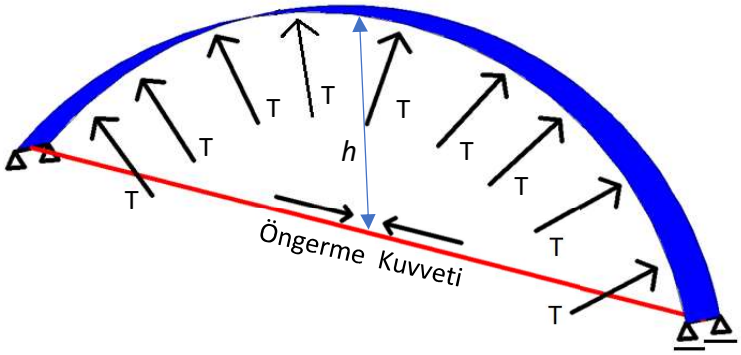


(a) Levha Çubuk (b) Kemer Levha Çubuk

Şekil 12. (a) Normal levha çubuk ve (b) kemer şeklinde levha çubuk 1. burkulma modları

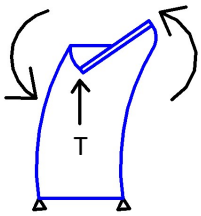
Kemer kirişin burkulması aslında bir burkulma değil eğilme hareketidir

Basit bir levhadan oluşan kemer kirişte, kirişin bir mesneti yatayda kayıcı olduğunda kemer etkisi görülmemektedir. Bunu sağlamak için kirişe altta bir halat ile uçlar birbirine bağlandığında kemer etkisini tekrar elde adilmiş olunur. Kemer kirişe verilen öngerme kuvveti, kemer levhayı bir yaya benzer şekilde gererek, Şekil 13'de gösterildiği gibi levhayı dışa doğru iten bir T itme kuvveti oluşturacaktır.



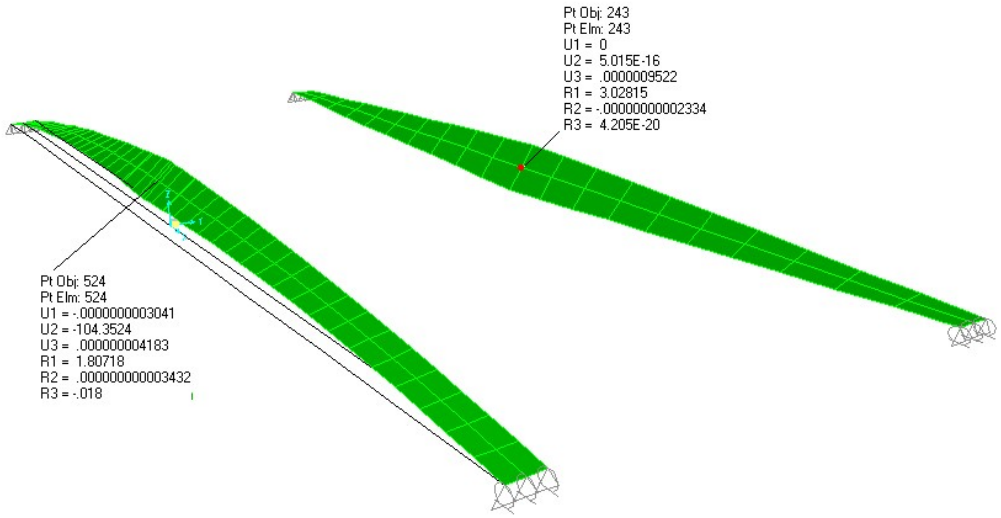
Şekil 13. Kemer levhanın altta bulunan ön germe halatı ile birlikte davranışı.

Eğer kemer levha ortasından bir burulma kuvveti uygulanırsa, yukarda bahsedilen T itme kuvvetinin etkisi ile düz haline göre burulmaya karşı daha yüksek bir direnç gösterecektir. Bu etki kirişin *h* kemer yüksekliği arttıkça daha da artacaktır.



Şekil 14. Kemer levha kesitinin burulmaya karşı tepkisi.

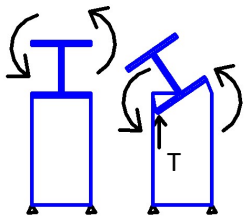
Bu davranışı teorik olarak ıspatlamak için , Sap 2000 de düz ve kemer şeklindeki 10mm. kalınlık ve 150 mm. genişliği olan 6 m. açıklığa sahip iki levhaya 10 kNm. lik burulma momenti uygulandı. Düz levha ortasında R_1=3.02 radyan dönme oluştuğu görüldü. Kemer şeklindeki levha ortasında ise R_1=1.8 radyanlık dönme görülmektedir. (Şekil 15) . Bu değerlere göre kemer şeklindeki levhanın, burulmaya karşı daha dirençli olduğu sonucuna varılmaktadır.



(a) Kemer Levha (b) Düz Levha

Şekil 15. Kemer şeklindeki levha ve düz levhanın burulma analizi sonuçları.

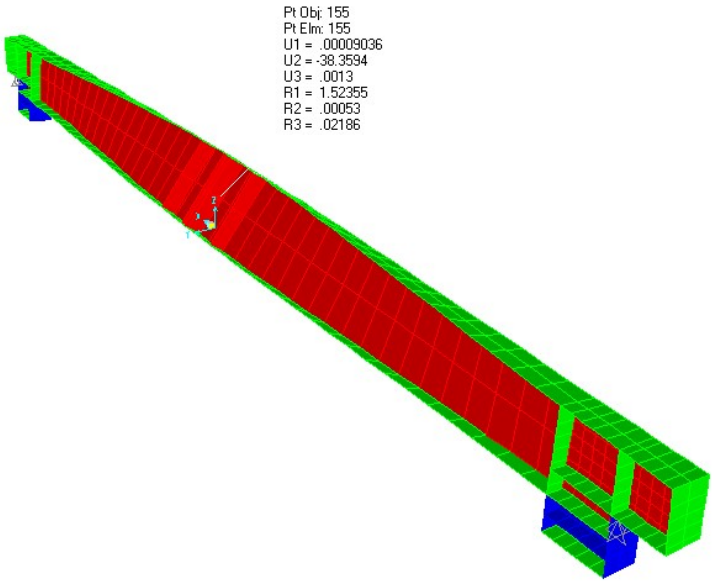
Bu levhanın üzerine I kirişi tamamlayacak, gövde ve üst başlık levhaları eklenirse üst başlığında yerel burkulmasını geciktireceği düşünülebilir.



Şekil 16. Kemer alt başlığın üst başlığa etkisi.

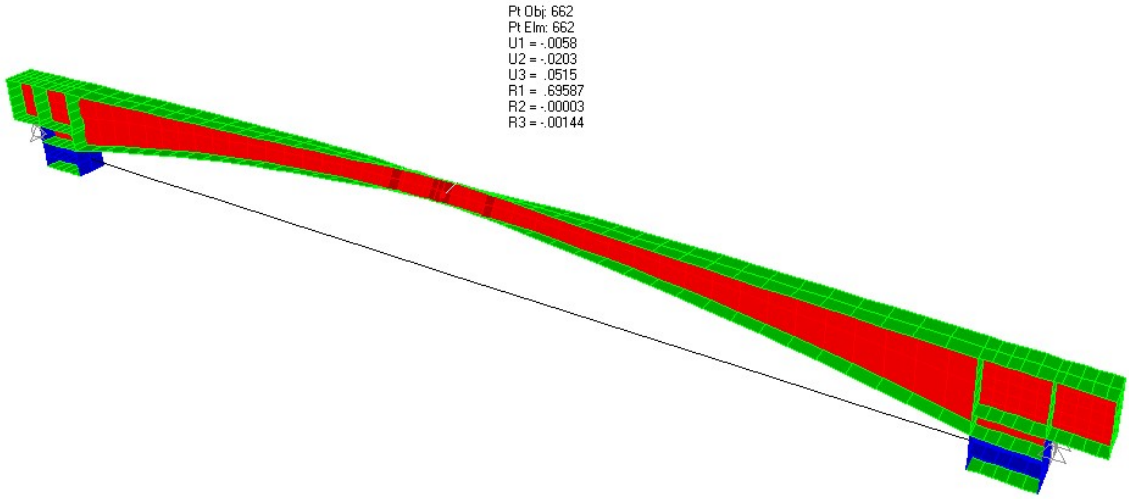
Bu nedenle Sap2000 de yapılan analizlerde kiriş orta yüksekliği azaldıkça veya alt başlık kemer yüksekliği arttıkça burkulma yükü katsayısı artmaktadır ya

ni burkulma karşı dayanımı artmaktadır.. Bu davranış yine Sap2000'de kirişlere burulma momenti verilerek test edilebilir. Kiriş yüksekliği, kiriş boyunca 340 mm olan kirişe gövde orta noktasından 50 kNm. lik burulma moment uyguladığında kiriş ortasındaki dönme R_1=1.52 radyan olarak hesaplanmaktadır (Şekil 17).



Şekil 17. Sabit 340 mm. yükseklikteki kirişe burulma momenti uygulandığındaki dönme miktarı

Orta kiriş yüksekliği 100 mm. olan kirişe ise 100 kN öngerme kuvveti uyguladıktan sonra, 50 kNm. burulma momenti uygulandığında kiriş ortasındaki dönme miktarı R1=0,695 radyan olduğu görülmektedir. Bu sonuca göre yüksekliği kiriş boyunca değişmeyen kirişe göre kiriş ortasında yüksekliği azalan eğrisel alt başlıklı kirişin daha fazla burulma dayanımına sahip olduğu bu analizlerle ispatlanmaktadır.



Şekil 18. 340 – 100 mm. yükseklikteki kirişe burulma momenti uygulandığındaki dönme miktarı

5. Sonuçlar

Yapılan 4 farklı kiriş analizinden elde edilen sonuçlara göre kiriş orta yüksekliğinin kenar yüksekliğine oranında yaklaşık 0,6 oranına denk gelen yüksekliğe kadar kiriş burkulma yük katsayısında önemli bir değişiklik olmamaktadır. 0,6 h/H oranından sonra burkulma yükü katsayısında belirgin bir artış görülmekte ve daha sonra düşmektedir. Fakat kiriş orta yüksekliği ve öngerme kuvvetine bağlı olarak en büyük burkulma katsayısı oranını verebilecek standardize bir yükseklik oranı veya öngerme kuvveti değeri belirlenememektedir. Bu nedenle maksimum taşınabilecek yük için kiriş açıklığı ve yüksekliğe göre analiz yaparak en uygun boyut seçilmelidir. En büyük burkulma yükü katsayısı 0,6 h/H oranından sonra oluşmaya başladığından, gerilme ve deplasman problemi olmayacak ise, h/H oranın 0,6' dan küçük seçilmesi uygun olacaktır. Kirişlerin alt başlığının eğrisel yapılması ve öngerme halatının kullanılması ile kirişlerin burulmaya karşı dayanımının artacağından dolayı yanal tutulmaya gerek kalmadan veya daha az miktarda tutulma ile büyük açıklıklar geçilebilecektir. Konut ve ticari yapılarda ise kiriş altında elde edilen boşluk mekanik, elektrik tesisatı gibi projede özel yer ayrılması gereken elemanlara kullanışlı bir geçiş yolu olacaktır. Asma tavan kullanılmaması durumunda dahi mimari yönden bakıldığında düz bir kirişe göre daha estetik bir görünüş sergileyecektir.

6. Referanslar

AISC-360 (2016). Specification for Structural Steel Buildings, ANSI / AISC 360-16,

Austin W.J. & Ross J. (1976). Elastic buckling of arches under symmetrical loading, J. Struct. Div. 102 , 1085–1095.

Barnett R.L. (1957). Prestressed truss beams, J. Struct. Div. 83, 1191-1-1191–22.

Bharathi C.V., Kumar C.V. (2016). Effect of external prestressing on steel arches, Int. Res. J. Eng. Technol. 1382–1387.

Bradford M.A. (1991). Buckling of prestressed steel girders, Eng. Journal–American Inst. Steel Constr. 28, 98–101.

Circular Arches, J. Struct. Eng. 141, 04015006. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001240.

Coff L.,(1950). Prestressing of structural steel, Civ. Eng. 20, 64–65.

Constr. Steel Res. 66, 125–132. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.07.013.

Des. 28 , 1988–1993. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.04.007.

Dou C., Guo Y.-L., Zhao S.-Y. & Pi Y.-L. (2015). Experimental Investigation into Flexural-Torsional Ultimate Resistance of Steel

Dou C., Guo Y.-F., Jiang Z.-Q., Gao W. & Pi Y.-L. (2018). In-plane buckling and design of steel tubular truss arches, Thin-Walled Struct. 130, 613–621. https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.06.024.

Magnel G. (1950). Prestressed steel structures, Struct. Eng. 28, 285–295.

Magnel G. (1954). Long prestressed steel truss erected for Belgian hangar, Civ. Enginner. 24 . 38–39.

Nazir C. (2003). Prestressed Steel Arch Bridge, J. Inst. Eng.

Ozcatalbas Y. & Ozer A. (2007). Investigation of fabrication and mechanical properties of internally prestressed steel I beam, Mater.

Park S., Kim T., Kim K. & Hong S. (2010). Flexural behavior of steel I-beam prestressed with externally unbonded tendons, J.

Petrov A.M. (1965). On the parameters of prestressed steel beam, IVSIA. 9–14.

Petrov A.M. (1967), On the choice of cross-section of prestressed steel beam, IVSIA. 3–6.

Pi Y.-L. & Trahair N.S. (1999). In-Plane Buckling and Design of Steel Arches, J. Struct. Eng. 125, 1291–1298. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:11(1291).

Polat E. Caglayan B. (2018) Finite element analysis of pre-stressed steel arch beams. https://doi.org/10.20528/cjsmec.2018.03.003

Ren Y., Wang Y., Wang B., Ban H., Song J. & Su G. (2018). Flexural behavior of steel deep beams prestressed with externally unbonded straight multi-tendons, Thin-Walled Struct. 131, 519–530. https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.07.022.

Tochacek M. & Mehta C.L. (1972), No Title, J. Struct. Div. 98, 1273–1289.

Whipple S. (1847). A work on brigge building, Utica, N.Y.: H.H. Curtiss, printer.

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development
UMAGD, (2023) 15(2), 626-635.
10.29137/umagd.1178275
Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023
Araştırma Makalesi / Research Article

Kümeleme Yaklaşımı ile Maske Üretim Faktörlerinin Analiz Edilmesi Üzerine Bir Uygulama

An Application on Analysis of Mask Production Factors with Clustering Approach

Semra Tebrizcik [1*], Süleyman Ersöz [1], Adnan Aktepe [1]

[1]*Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 22/09/2022* ***Kabul / Accepted**: 30/05/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Öz
Teknolojinin gelişmesi ile birlikte büyük veri tabanları daha ulaşılabilir hale gelmiştir. Günümüzde de birçok alanda büyük veri tabanlarının kullanımına imkân verilmektedir. Veri tabanlarında tutulan veriler ile veri madenciliği yaklaşımlarından faydalanarak anlamlı bilgiler ve kurallar keşfedilmektedir. Böylelikle işletmeler için yararlı olacak bilgi keşifleri yapılmaktadır. Bu çalışmada cerrahi (tıbbi) maske üretimi yapmakta olan bir fabrikanın üretim verileri kullanılarak kalite kontrol aşamasında hatalı veya hatasız maskelerin üretilmesinde etkili olan değişkenlerin belirlenmesi doğrultusunda kümeleme analizleri yapılmıştır. Analizler Two-step (İki Aşamalı Kümeleme) yöntemi ile yapılarak ortaya çıkan kümelerin özellikleri karşılaştırılmıştır. Küme bölümlenmesinde en çok etkili olan değişkenlerin; maske gövdesinin oluşturulmasında kullanılan hız miktarı, 3 katmandan oluşan maske gövdesinin orta katmanına ait kumaşın türü ve gövde üzerinde bulunan pilelerin oluşturulması için kullanılan ultrasonik ısı miktarının olduğu gözlemlenmiştir. Üretim faaliyetlerinin performansını artırmak için elde edilen bilgiler süreci iyileştirmek için kullanılacaktır.

Anahtar Kelimeler
"Kümeleme analizi, İki Aşamalı Yöntem, Veri Madenciliği, SPSS clementine"

Abstract
Big databases have become more accessible with the development of technology. Today, it is possible to use large databases in many areas. By using data kept in databases and data mining approaches, meaningful information and rules are discovered. Thus, information discoveries are made that will be useful for businesses. In this study, using the production data of a factory that produces surgical (medical) masks, clustering analyzes were carried out in order to determine the variables that are effective in the production of defective or defective-free masks at the quality control stage. The analyzes were made with the Two-step method and the properties of the resulting clusters were compared. The most effective variables in cluster partitioning are; It has been observed that the amount of speed used in the creation of the mask body, the type of fabric of the middle layer of the mask body consisting of 3 layers, and the amount of ultrasonic heat used to create the pleats on the body. The information obtained to improve the performance of production activities will be used to improve the process.

Key Words
"Cluster analysis, Two-step method, Data mining, SPSS clementine"

***Sorumlu Yazar:** semra.tebrizcik@kku.edu.tr*

1. Giriş

Günümüzde bilgi işlem teknolojisinde yaşanan gelişmeler, işletmelerin yönetilmesinde ve etkin karar vermesinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Bilgi işlem teknolojilerinin geldiği nokta çok miktarda verileri toplamamıza, kaydetmemize ve saklamamıza imkân vermektedir. Mevcut verilerin analizlerinin yapılarak bilgiye dönüştürülmesi ve süreç ile ilgili kararlar verilmesinde veri madenciliği yaklaşımlarından yararlanılmaktadır.

Üretim faktörleri (öznitelikler, değişkenler) farklı aşamalarda sürekli olarak ölçülmekte ve değerleri işletmelerin veri tabanlarında saklanmaktadır. Bu veriler üretim prosesindeki üretim hattında hangi makinenin hangi kurulum parametreleriyle kullanıldığı, operatörlerin özellikleri (tecrübesi, yaşı, vardiya tipi vb.), proseste kullanılan hammaddeler, ortam (nem, sıcaklık vb.), makinelere takılan sensörler (titreşim, kuvvet, basınç vb.), makine arızaları ve bakımları, ürün kalitesi ve diğer önemli özellikleriyle ilgili olabilmektedir. Bu bağlamda veri madenciliği genellikle veri örneklerinin özellikleri arasındaki karmaşık ilişkileri anlayarak yeni bir örnek için bilinmeyen değişken değerlerini öngörebildiğinden üretimdeki diğer geleneksel matematiksel ve istatistiksel modellerden daha verimlidir (Doğan & Birant, 2021).

Üretim proseslerinde verimliliği etkileyen en önemli faktörlerden biri kalitedir. Üretim işletmelerinde rekabet ortamında ayakta kalabilmek için üretimi gerçekleştirilen ürünün istenilen kalite karakteristiklerine uygun olarak üretilmesi, müşteri memnuniyetinin sağlanması ve üretim maliyetlerinin düşürülmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, COVID-19 salgını ile birlikte faaliyete başlayan cerrahi (tıbbi) maske üretimi yapan bir fabrikanın üretim verileri kullanılarak kalite kontrol aşamasında hatalı veya hatasız maskelerin üretilmesinde etkili olan değişkenlerin kümeleme analizleri yapılmıştır. Kümeleme analizleri sonucu ortaya çıkan kümelerin değerlendirilmesi ile işletme için yararlı olacak bilgi keşfi yapılması hedeflenmiştir. Elde edilen bilgiler üretim faaliyetlerinin performansını artırmak ve süreci iyileştirmek için kullanılacaktır.

Makalenin giriş bölümünü takip eden 2. bölümde literatürde kümeleme yöntemlerini kullanan çalışmalar anlatılmaktadır, 3. Bölümde veri madenciliği kavramı ve kümeleme analizi anlatılmaktadır, 4. bölümde ise çalışmanın uygulama kısmı yer alarak, veri hazırlama süreci, kümeleme analizlerine ve bulgulara yer verilmektedir, 5. Bölümde ise kümeleme analizleri sonuçlarına yer verilerek değerlendirmeler yer almaktadır.

2. Literatür Araştırması

Literatürde farklı disiplinlerde kümeleme analizleri ile ilgili pek çok çalışma yapılmıştır.

Helgesen vd. (2009) kümeleme analizi ve regresyonu birleştirerek, uygulayıcıların pazarlama ve işletme performansı algıları arasındaki ilişkileri inceleyerek yöneticilerin pazarlama algılarına göre işletmelerin üç gruba ayrılabileceğini ve bir uygulayıcının ait olduğu kümenin işletme performansında fark yarattığını göstermişlerdir. Çalışmada kümeleme analizleri için En yakın komşu algoritması kullanılmıştır. Savaş & Topaoğlu (2011) GSM şebekelerinin çekim gücü verileri ile iki aşamalı kümeleme (Two-step) tekniği kullanılarak ortaya çıkan 3 kümenin performans analizlerini yapmışlardır. Sonuç olarak A, B ve C şebekelerinin performansları belirlenerek, sinyal gücü temel alındığında A şebekesinin yüksek perfomans gösterdiği ortaya koyulmuştur. Özdemir & Orçanlı (2011) işletmeler için yararlı olacak pazar bölümlendirmesi üzerinde çalışarak hedef pazarlara dikkat çekmek için kümeleme analizlerinden faydalanmışlardır. Çalışmada Two-step kümele yöntemi kullanılarak demografik ve sosyo-kültürel değişkenler ile ortaya 5 adet pazar bölümlemesi elde edilip her bir kümenin özellikleri açıklanarak yorumlanmıştır. Çetin Irmak (2014) akademisyenlerin elektronik alışverişte güvenlik ve risk algılarını belirlenmeye odaklanıp anket çalışmasıyla verileri elde etmiştir. Risk algıları bakımından veriler incelenmek üzere iki aşamalı kümeleme yöntemi kullanılarak kümeleme analizleri yapılmış ve katılımcıların risk algılarına göre 4 farklı kümede toplandığı görülmüştür. Çalışmada kümeler arasında oluşan risk algılarındaki farklılıklar yorumlanmıştır. Ödev ve Peker (2022) internet ortamında firmaların aldığı müşteri şikayetlerini ve bunların yönetim performanslarını değerlendirmek üzere Ward tekniği ve k-ortalamalar algoritmasını bir arada kullanan, iki aşamalı kümeleme yöntemi analizlerini kullanmışlardır. Analizlerde k küme sayısını belirlemek için ilk olarak Ward'ın hiyerarşik yöntemi kullanılmış ve ardından verileri k gruba ayırmak için k-ortalamalar kümeleme yöntemi kullanılmıştır. Analizler sonucu ortaya çıkan farklı firma küme özellikleri ile firmaların, kendi performanslarını değerlendirmelerine, kendilerine iyileştirici yeni hedefler belirlemelerine olanak sağlamaktadır.

Zidek vd. (2016) yüksek hacimli imalat ürünlerinde otomatik tanımlama ve sistematik hataların teşhisinde benzer hataların toplanması için kümeleme ve önerilen sınıfa herhangi bir yeni hatanın gelmesi tahmini için sınıflandırma yöntemleri kullanmıştır. Çalışma üç ayrı işleme seviyesinden oluşur: ürünlerdeki hataların belirlenmesi için görüntü elde etme, hataları ayrı sınıflara kategorize etmek için veri kümeleme yöntemlerini kullanma ve önerilen bir sınıf modeliyle yeni tahmin modeli kurmak. Kümeleme analizlerinde En yakın komşu algoritması, k-ortalamalar ve DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) yöntemleri kullanılmıştır. Çalış & Baynal (2016) bankacılık sektöründe yapmış oldukları çalışmalarında kümeleme yöntemlerinden k-ortalamalar tekniğini kullanarak bir banka şubesine müşterilerin, belirlenen on iki değişken ile kümelenmesi ve bu kümelerde bulunan müşteri profillerine göre satış stratejileri geliştirilmesi amaçlanmıştır. Analiz sonuçlarında çıkan kümelerin özellikleri yorumlanarak, satış stratejisi önerileri verilmiştir. Alsaedi (2017) tez çalışmasında twitter mesajlarını özetlemeye odaklanan teknikler olarak kümeleme analizlerine de yer

vererek On-line Clustering kümeleme yöntemini kullanmıştır. Sınıflandırma yöntemleriyle entegre bir şekilde kurulan çerçevede kümeleme analizleri ile Twitter gönderileri, dikkat edilmesi gereken gönderiler şeklinde ayırt edilmeye çalışılmıştır. Uygulama sonuçları değerlendirildiğinde birçok dilde yazılmış milyonlarca sosyal medya mesajından oluşan büyük veri kümelerini kullanan bazı uygulamalarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar yapılan çalışmanın daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Analiz sonuçları gerçek dünya olaylarını çevreleyen kamu güvenliğinin güvence altına alınmasında kullanılmıştır. Ceylan vd. (2017) bir emeklilik şirketinin müşterileri hakkındaki bilgilere belirledikleri sekiz değişken ile kümeleme yaklaşımlarından biri olan iki aşamalı kümeleme (Two-step) yöntemi kullanarak ulaşmışlardır. Kümeleme analizlerinden elde edilen bulgular şirketlerin yeni satış stratejileri geliştirirken hangi değişkenleri göz önüne alarak yapılması gerektiğini göstermiştir.

Köse (2022) 36 OECD ülkesinin 2019 yılı sağlık araştırma raporunun verilerini kullanarak ülkelerin kümeleme analizleri ile değerlendirmelerini yapmıştır. Analizlerde seçilen sağlık insan gücü, sağlık statüsü, sağlık sektörü kaynakları ile ilgili göstergeler açısından k-ortalamalar kümeleme yöntemine göre nasıl gruplandığı belirlenmiştir. Hernández vd. (2018) alerjik astım rahatsızlığı olan belli bir grup hasta için 19 değişken belirleyerek hastaların benzerliklerine göre analizini Ward kümeleme yöntemini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Analizler sonucu ortaya çıkan üç kümedeki değişkenler ile alerjik astımı olan hastaların özellikleri değerlendirilmiştir. Özkan vd. (2019) nüfus yoğunluğu oldukça fazla olan bir büyükşehir belediyesinin beş büyük ilçesine ait çağrı merkezi verilerini kullanarak, k-ortalamalar yöntemi ile belirlemiş oldukları yedi farklı değişkene göre kümeleme analizleri yapmışlardır. Analizler SPSS Clementine ve WEKA veri madenciliği paket programları kullanılarak yapılmış ve çıkan kümelerin özellikleri karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Choi vd. (2021) yaptıkları çalışmanın kümeleme analizlerinin yapıldığı bölümünde bir işletmenin servis hizmeti verirken servis yetkililerinin özellikleri yetenekleri doğrultusunda gruplandırılmıştırlar. Kümeleme analizleri için k-ortalamalar yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlar parçaların ömrünü uzatarak ve maliyeti düşürerek bir kalite iyileştirmesi elde etmek için önerilebileceğini göstermiştir.

Bu çalışmada da günümüzde önemi artan cerrahi maske sektörüne ait veriler kullanılmıştır. Kalite kontrol aşamasında ortaya çıkan hatalı veya hatasız maskelerin üretilmesinde etkili olan 14 değişken belirlenmiştir. Kümeleme analizlerinde hem sürekli hem de kategorik verilerin kullanılabilmesine imkân verebilen Two-step kümeleme yöntemi kullanılmıştır. Kümeleme analizlerinin yapılması sonucunda kümelerin özellikleri karşılaştırılmıştır.

3. Veri Madenciliği

Veri madenciliği veya veri tabanlarında bilgi keşfi verilerden faydalı ve anlaşılır örüntülerin ortaya çıkartılabilmesi için gerçekleştirilen bir süreçtir (Fayyad vd., 1996). 1990'ların ortalarında ortaya çıkan veri madenciliği kavramı günümüzde, Fayyad ve arkadaşları tarafından önerildiği gibi belirli analiz yöntemlerinin kullanılmasından ziyade veri analizi sürecini vurgulayan "Veritabanlarında Bilgi Keşfi" ile eşanlamlı hale gelmektedir (Çakır vd., 2019).

3.1 Kümeleme Analizi

Kümeleme, veri madenciliği analizlerinin temel yöntemlerinden biridir (Ching & Ng, 2002). Kümeleme analizlerinde (Cluster Analysis) tahmin edilecek bir bağımlı değişken (sınıf, etiket) değeri bulunmaz, gözlemlerin ya da değişkenlerin sahip oldukları özellikler çerçevesinde kümelemek (homojen alt gruplara ayırmak) amacıyla geliştirilmiş denetimsiz öğrenme yaklaşımı analiz yöntemlerinden biridir. Sınıflandırma algoritmalarından farklı olup benzerliklerine (ilişkilerine) bağlı olarak doğal sınıflandırmalar oluşturulur. Kümeleme analizi sonucunda elde edilecek kümelerin kendi içinde benzer (homojen), kendi aralarında olabildiğince farklı (heterojen) bir yapıda olması beklenir (Packianather vd., 2017). Literatürde yaygın kullanılan kümeleme yaklaşımları, hiyerarşik (aşamalı) ve hiyerarşik olmayan kümeleme yöntemi olmak üzere iki gruba ayrılmıştır (Atbaş, 2008).

3.2 Two-step Yöntemi (İki Aşamalı Kümeleme)

Two-step kümeleme yöntemi, çok büyük boyuttaki veri kümelerini çıkarmak üzere oluşturulmuş ölçeklenebilir bir kümeleme analizi algoritmasıdır (Rundle Thiele vd. 2015). Algoritma ile büyük boyutlu veri setlerinde çalışılabilir, kategorik ve sürekli değişkenlerin bulunduğu veri setleri kullanılabilir. Yöntem optimum küme sayısını belirleyebilir ve elde edilen kümelerle aykırı gözlem değerlerinin istendiğinde veriden ayıklanabilmesine olanak sağlamaktadır (Norusis, 2007).

Two-step kümeleme analizi, ön kümeleme ve kümeleme olmak üzere iki temel aşamadan oluşur (Okazaki, 2007).

- Ön kümeleme aşamasında gözlemler küçük alt kümelere bölünerek ön kümeleme yapılır daha sonra bu alt kümeler ayrı gözlemler olarak ele alınır. Gözlemin daha önceden oluşturulmuş bir kümelenme içerisinde mi yer aldığı yoksa yeni bir kümelenmeye mi katılacağı kararı uzaklık kriterlerine bağlı olarak hiyerarşik küme yöntemi ile yapılmaktadır.

- Kümeleme aşamasında ise, bir önceki aşamada elde edilen alt kümeler, gerekli küme sayısına göre gruplanır. Two-step kümeleme yöntemi kümelerin sayısını otomatik belirleyen aglomeratif hiyerarşik bir yöntem kullanır. Hiyerarşik kümeleme yöntemi, model kurulumun sonunda tüm gözlemleri içeren bir küme kalana kadar kümelerin ardışık olarak birleştirildiği bir uygulama yöntemidir (Norusis, 2007).

i. Uzaklık ölçüsü:

Veri seti bir veya daha fazla değişken kategorik bulunduruyorsa, olasılığa dayalı mesafeyi temel alan log-olabilirlik uzaklık ölçüsü kullanılmaktadır. Log-olabilirlik uzaklık hesaplamasında, sürekli değişkenler için normal dağılım ve kategorik değişkenler için ise multinomial dağılım varsayımı yapılmaktadır. SPSS Clementine programının, kategorik ve sürekli değişkenlerle uyumlu olmasından dolayı kümeleri birleştirmek için mesafe ölçüsü olarak log-olabilirlik uzaklık ölçüsü kullanılmaktadır (Okazaki, 2007).

- log-olabilirlik uzaklık ölçümü:

$$d(i,j) = \xi i + \xi j - \xi(<j,j>) \quad (1)$$

burada, i ve j kümeleri, ξi i kümesi içinde bir çeşit varyans olmak üzere, d (i, j) i ve j kümeleri arasındaki log-olabilirlik uzaklığını, <i,j> ise i ve j kümelerini birleştirerek ortaya çıkan kümeyi ifade eder.

$$\xi_i = -N_j \left(\sum_{k=1}^{K^A} \frac{1}{2} \log(\sigma_k^2 + \sigma_{jk}^2) + \sum_{k=1}^{K^B} E_{jk} \right) \quad (2)$$

burada j küme ve k değişken (kategorik veya sürekli) olmak üzere N_j j kümesindeki gözlem sayısını, K^A toplam sürekli K^B toplam kategorik değişken sayısını, σ^2_k sürekli değişkeninin varyansını ve σ^2_{jk} sürekli değişkeninin j kümesindeki varyansını ifade etmektedir.

$$E_{jk} = -\sum_{l=1}^{L^K} \frac{N_{jkl}}{N_j} \log \frac{N_{jkl}}{N_j} \quad (3)$$

Burada ise L^K k. kategorik değişkenin sınıf sayısını, N_j j. kümenin gözlem sayısını N_{jkl} 1 kategorili k değişkeninin bulunduğu j kümesindeki gözlem sayısını ifade etmektedir.

ii. Küme Sayısını Belirleme:

Optimum küme sayısı yöntem tarafından otomatik belirlenmektedir. Küme sayısını belirlemede Bayesian Information Criterion-BIC ve Akaike Information Criterion-AIC kullanılmaktadır.

$$BIC(j) = -2 \sum \xi_j + m_j \log(N) \quad (4)$$

$$AIC(j) = -2 \sum_{j=1}^{J} \xi_j + 2mj \quad (5)$$

$$m_j = j \left\{ 2K^A + \sum_{k=1}^{K^B} L^K - 1 \right\} \quad (6)$$

4. Uygulama

Veri seti içerisinde tespit edilen eksik kayıtlar model çözümlerinin hatalı sonuçlar üretmemesi için bulunduğu özniteliğin istatistiksel özellikleri dikkate alınarak doldurulmuştur. Eksik kayıt bulunan nümerik veri tipine sahip bir özniteliğe ait verilerin normal dağılıma sahip olması göz önünde bulundurularak ortalama değeri ile doldurulmuştur. Örneğin veri seti içerisinde, gövde_boyu (veri tipi nümerik) özniteliği için eksik veriler ortalama değeri olan 16,93 değeri ile doldurulmuştur.

Operatör cinsiyet değişkeninde tek tip değer (kadın) olduğu için tahmin modelinde etkisi olmaması sebebiyle veri setinden çıkarılmıştır. Tutulan veriler içerisinde bazı gözlemlerin sık sık hatalı ürün sınıfına sahip olduğu fark edilerek bu tekrarlara sebep olan durumun arızalı bir makine olduğu tespit edilmiştir. Tutulan kayıtlar içerisinden ilgili makine numarası tespit edilip model eğitiminde yanlılık oluşturmaması amacıyla bu makineye ait gözlemler veri setinden çıkarılmıştır.

Kategorik değişkenlerde bulunan eksik verilerde ise en sık tekrar eden (mod) değer eksik kayıtların yerine girilmiştir. Veri seti içerisinde örneğin burun_teli_yapisi kategorik değişkenine (1-2) ait eksik kayıtlar mod değeri olan 2 değeri ile doldurulmuştur. Veri dönüştürme işlemlerinde ise bazı nümerik ve string değerler kategorize edilmiştir. Örneğin operatör_egitim değişkeni; ilkokul=1, lise=2 olacak şekilde 2 sınıfa, oprtr_yas değişkeni; 18-24, 25-34, 35-44, 45-54 ve 55_üzeri olacak şekilde 5 sınıfa ve gövde üst/orta/alt katmanları için kullanılan kumaş türleri ise A, B, G, M ve T olacak şekilde 5 sınıfa dönüştürülmüştür.

Veri önişleme ve başlangıçta yapılan veri indirgeme aşamalarından sonra oluşturulan veri seti 14 değişken ve 959 adet gözlemden (satır elemanından) oluşmaktadır. SPSS Clementine ortamında veri setinin ilk 37 gözlem değeri Şekil 4.1'de gösterilmektedir.

File Edit Generate

	vardiya	govde_makine_no	govde_makine_hiz_ayari	Oprtr	Oprtr-Yas	Oprtr_1_Egitim	Oprtr_Tecrube	govde_ust_...	govde_orta_...	govde_alt_k...	govde_boyu	govde_eni	burun_teli_yapisi	govde_ultrasonik_isisi
1	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.500	2.000	91.000
2	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.500	2.000	91.000
3	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.500	2.000	91.000
4	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	16.900	9.400	2.000	91.000
5	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.500	2.000	91.000
6	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.500	2.000	91.000
7	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.100	9.500	2.000	91.000
8	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.500	2.000	91.000
9	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.500	2.000	91.000
10	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.400	2.000	91.000
11	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.400	2.000	91.000
12	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.100	9.500	2.000	91.000
13	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.500	2.000	91.000
14	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.500	2.000	91.000
15	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.400	2.000	91.000
16	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.100	9.400	2.000	91.000
17	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.100	9.500	2.000	91.000
18	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.200	2.000	91.000
19	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.100	9.500	2.000	91.000
20	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.100	9.500	2.000	91.000
21	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.100	9.500	2.000	91.000
22	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.100	9.400	2.000	91.000
23	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.100	9.500	2.000	91.000
24	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.500	2.000	91.000
25	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.500	2.000	91.000
26	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.600	2.000	91.000
27	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.100	9.500	2.000	91.000
28	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.500	2.000	91.000
29	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.100	9.400	2.000	91.000
30	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.400	2.000	91.000
31	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.100	9.500	2.000	91.000
32	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.400	2.000	91.000
33	2.000	1.000	30.000	J	45-54	1.000	9.000	M	M	B	17.000	9.500	2.000	91.000
34	2.000	3.000	30.000	C	18-24	2.000	9.000	B	M	G	16.700	9.500	1.000	70.000
35	2.000	3.000	30.000	C	18-24	2.000	9.000	B	M	G	16.900	9.500	1.000	70.000
36	1.000	2.000	50.000	F	45-54	1.000	5.000	B	B	G	16.800	9.500	2.000	70.000
37	1.000	2.000	50.000	F	45-54	1.000	5.000	B	B	G	16.900	9.400	2.000	70.000

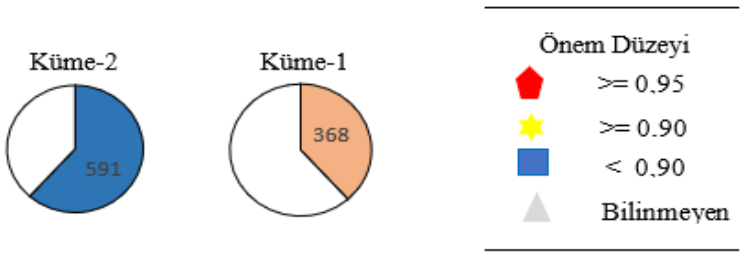
Table Annotations

Şekil 4.1 SPSS Clementine Ortamında Veri Setinin Görünümü

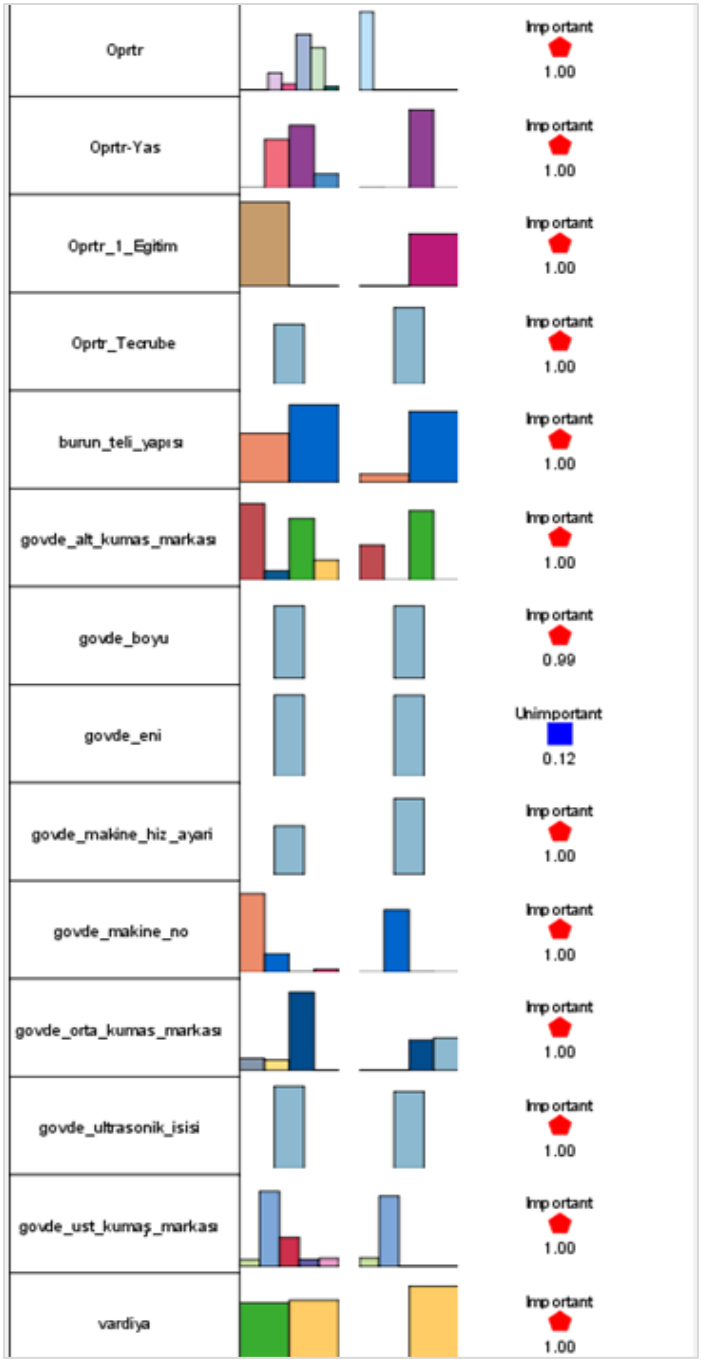
Bu çalışmada, Two-step kümeleme analizi yönteminin kullanılmasının temel amacı ele alınan, hatalı veya hatasız maskelerin üretilmesinde etkili olan değişkenlere ait üretim verilerini, değişkenlere göre aynı kümede toplayarak ortaya çıkan farklı grupları belirlemek ve bu gruplar üzerindeki değişkenlerin önemini gözlemleyebilmektir.

SPSS Clementine 12.0 versiyonu 3 ile 15 küme arasında bir değer aralığı sunarak küme sayısını otomatik vermektedir. Ayrıca specify number of cluster seçeneği ile de kullanıcının istediği küme sayısını belirtmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada küme sayısına ilişkin daha önceden bilgi sahibi olunduğundan specify number of cluster seçeneği kullanılarak küme sayısı 2 olarak belirtilmiştir. Ortaya çıkan kümelerde küme-1 368, küme-2 591 kayıttan oluşmaktadır.

Şekil 4.2'de kategorik ve nümerik değişkenlerin 2 farklı kümedeki frekans değerleri gösterilmektedir ayrıca veri setindeki her değişkenin önem (important) düzeyleri incelenmiştir. Veri setinde bulunan gövde eni değişkeni %90'dan düşük önem düzeyine sahiptir bunun dışında diğer tüm değişkenlerin önem düzeylerinin % 95 ve üzeri bir değerde olduğu görülmüştür bu da seçilen değişkenlerin kümeleme analizi için önemli değişkenler olduğunu göstermektedir.



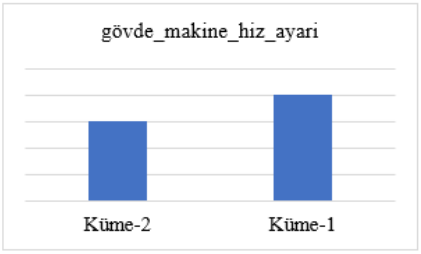
Şekil 4.2 Two-step Kümeleme Yöntemi ile Elde Edilen Kümeler ve Değişkenlerin Önem (important) Düzeyleri



Şekil 4.2 (devam) Two-step Kümeleme Yöntemi ile Elde Edilen Kümeler ve Değişkenlerin Önem (important) Düzeyleri

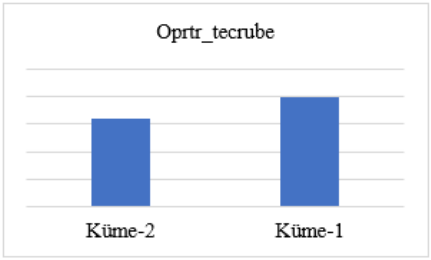
Şekil 4.3'de makine hız ayarı değişkeni ele alınarak oluşturulan 2 küme değerlendirildiğinde küme-1'de hız değeri ortalaması (mean) 88,40 ve standart sapma değeri (standart deviation) 15,12'dir. Küme-2'de hız değeri ortalaması ise 56,62 ve standart sapma değeri 18,82'dir. Gövde makinesinde işlem gören ürünlerden Küme-1'de bulunan ürünlerin maruz kaldığı hız ortalama 88,40 ve Küme-2'deki ürünlerin ortalama 56,62 değerinde bir hız miktarı ile işlem gördüğünü göstermektedir. Bu değişken kümelerin farklılaşmasında etkili bir değişkendir.

Operatör tecrübesi değişkeni ele alınarak oluşturulan (Şekil 4.4) 2 küme değerlendirildiğinde Küme-1'de tecrübe ortalaması 9 (std:0)'dur. Küme-2'de tecrübe ortalaması 7 (std:2,10)'dir. Operatör tecrübesi değişkeninin yüksek olması dolayısıyla Küme-1 çoğunlukla hatasız ürünlerin gruplandığı küme olarak değerlendirilebilinir. Bu değişken kümelerin farklılaşmasında etkili bir değişkendir.



Önem Düzeyi	Küme-2 (0)	Küme-1 (1)
Ortalama	56,62	88,40
Standart sapma	18,82	15,12

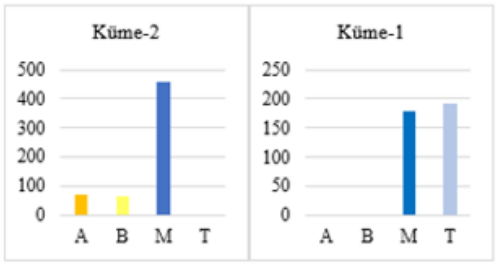
Şekil 4.3. Gövde Makine Hızı Değişkenine Göre Küme-1 ve Küme-2



Önem Düzeyi	Küme-2 (0)	Küme-1 (1)
Ortalama	7	9
Standart sapma	2,10	0

Şekil 4.4 Operatör Tecrübesi Değişkenine Göre Küme-1 ve Küme-2

Şekil 4.5'deki sonuçlar incelendiğinde ise kullanılan kumaş türlerinden M türü Küme-2'de daha fazla sayıya (458 adet) sahiptir. Küme-1'de ise M (177 adet) ve T (191 adet) türüne ait kumaş türlerinin daha fazla sayıda olduğu görülmüştür. Ayrıca T türü kumaşın Küme-2'de yer almaması ve Küme-1'de ise diğer kumaş türlerine göre en fazla sayıda yer alması T kumaş türünün 2 kümenin farklılaşmasında etkili olduğunu gösterir. Çıktı olarak elde edilen sonuçlar Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de veri tiplerine göre gösterilmiştir.



Önem Düzeyi	Küme-2 (1)	Küme-1 (1)
A	71	0
B	62	0
M	458	177
T	0	191

Şekil 4.5 Gövde Orta Kumaş Türü (markası) Değişkenine Göre Küme-1 ve Küme-2

Tablo 4.1 Nümerik Değişkenlerin Küme-1 ve Küme-2'deki Ortalama Değerleri

	Govde_makine_hızı	Oprt_tecrube	Govde_ultrasonik_isisi	Govde_boyu	Govde_eni
Küme-1	88,40	9	72,20	16,92	9,49
Küme-2	56,62	7	77,08	16,94	9,52

Tablo 4.2 Kategorik değişkenlerin Küme-1 ve Küme-2'deki Frekans Değerleri

	Üretim Faktörleri (Kategorik Değişkenler)								
	Govde_orta_kumaş_turu	**Govde_ust_kumaş_turu**	**Govde_alt_kumaş_turu**	**Oprt_egitim**	**Oprtr_yas**	**Burun_teli_yapisi**	**vardiya**	**Govde_makine_no**	**oprt**
Küme-1	M (177) T (191)	A (39) B (329	A (269) B (33) G (218) T (71)	2 (368)	18-24 (1) 45-54 (367)	1 (38) 2 (330)	2 (368)	2 (367)	B (367) C (1)
Küme-2	A (71) B (62) M (458)	A (31) B (352) G (137) M (33) T (38)	A (124) G (244)	1 (590) 2 (1)	35-44 (229) 45-54 (294) 55_uzeri (67)	1 (229) 2 (362)	1 (290) 2 (301)	1 (462) 2 (109) 3 (1) 6 (19)	C (1) F (80) G (29) J (262) L (200) M (19)

Numerik değişkenlerin Küme-1 ve Küme-2'deki ortalama değerlerine dikkat edildiğinde gövde_makine_hızı Küme-1'de 88,40 Küme-2'de 56,62'dir. Bu durum 2 kümenin ayrışmasında kullanılan değişkenin önemli olduğunu göstermektedir. Gövde boyu ve gövde_eni değişkenlerinin her iki kümedede yaklaşık aynı ortalamaya sahip oldukları ve kümeleri ayırıcı bir değişken olmadığı söylenebilir. Kategorik değişkenlerin Küme-1 ve Küme-2'deki sınıflarına ait frekans değerlerine dikkat edildiğinde operator eğitim değişkeninin 1 sınıfının Küme-2'de, 2 sınıfının ise Küme-2'de gruplandığı gözlemlenmektedir. Bu farklılık 2 kümenin ayrışmasında kullanılan değişkenin önemli olduğunu göstermektedir. Gövde orta kumaş türü değişkenine bakıldığında ise M sınıfına ait kumaşların ağırlıklı olarak Küme-2'de gruplandığı gözlemlenmektedir.

5. Sonuç

Çalışmada COVID-19 salgını ile birlikte tüm dünyada kullanımı yaygınlaşan koruyucu ekipman olarak kullandığımız cerrahi (tıbbi) maskenin gövde üretim prosesindeki üretim faktörleri kullanılarak kümeleme analizi yapılmıştır. Veri önişleme aşamasından sonra elde edilen değişkenlere ait üretim verileri kullanılarak hatalı veya hatasız 2 sınıftan oluşan veri setine veri madenciliği yaklaşımlarından kümeleme analizi (denetimsiz öğrenme) uygulanmıştır.

Kümeleme uygulaması için kategorik ve sürekli değişkenlerin bulunduğu veri setlerine uygun olan Two-step algoritması kullanılmıştır. Elde edilen veriler ışığında küme bölümlenmesinde en çok etkili olan değişkenlerin maske gövdesinin oluşturulmasında kullanılan hız miktarı, 3 katmandan oluşan maske gövdesinin orta katmanına ait kumaş türü ve gövde üzerinde bulunan pilelerin oluşturulması için kullanılan ultrasonik ısı miktarı olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bilgiler üretim faaliyetlerinin performansını artırmak ve süreci iyileştirmek için kullanılacaktır. Bu çalışmanın sınırları, uygulamanın sadece gövde üretim prosesinde yapılmış olmasıdır. Uygulamanın yapıldığı işletmede prosesler farklı atölyelerde yürütüldüğünden bir ürüne ait değişkenlerin tamamının takibi mümkün olmadığı için proses baştan sona uygulamaya alınmamıştır.

Gelecek çalışmalarda hatalı maskelerin ortaya çıkmasında etkili olan değişkenlere ait veriler kullanılarak bunlarla birlikte hata türleri belirlenip analizler yapılabilir. Bu yolla hata türleri için gerekli olan proaktif yaklaşımlar ve iyileştirmeler uygulanabilir.

Referanslar

Alsaedi, N., (2017). Event identification in social media using classification-clustering framework, Doktora Tezi, Cardiff University, 2017.

Aslı, K. Ö. S. E. (2022). OECD ülkelerinin sağlık göstergeleri açısından kümeleme analizi yöntemine göre değerlendirilmesi. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi SBE Dergisi, 12(4), 2010-2021.

Atbaş, A., (2008). Kümeleme analizinde küme sayısının belirlenmesi üzerine bir çalışma, Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi, Ankara.

Ceylan, Z., Gürsev, S. & Bulkan S., (2017). İki Aşamalı Kümeleme Analizi ile Bireysel Emeklilik Sektöründe Müşteri Profilinin Değerlendirilmesi, Bilişim Teknolojileri Dergisi, 10(4), 475-485.

Ching W.K., & Ng, K. M., (2002). Advances in Data Mining and Modeling, World Scientific, 1st ed., Hong Kong, China.

Choi, Y., Lee, H., Yang, J., (2021). Development of a service parts recommendation system using clustering and classification of machine learning, Expert Systems With Applications, 188, 1-12.

Çakır, A., Çalıs H. & Küçüksille, Ecir U. (2019). Data mining approach for supply unbalance detection in induction motor, Expert Systems with Application, 36, 11808–11813.

Çalış A. & Baynal K., (2016). Kümeleme Analizi İle Bankacilik Sektöründe Satiş Stratejilerinin Belirlenmesi, Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(1), 13 – 41.

Çetin H., & Irmak, S., (2014). Elektronik Alışverişte Akademisyenlerin Güvenlik ve Risk Algılarının Belirlenmesi, Yönetim Bilimleri Dergisi, 12(24), 275-294.

Dogan, A. & Birant D., (2021). Machine learning and data mining in manufacturing, Expert Systems With Applications, 166, 114060.

Fayyad, U., Piatetsky Shapiro G. & Smyth, P., (1996). From data mining to knowledge discovery in database, AI Magazine, 17, 37-54.

Gamze, Ö. D. E. V., & Peker, S. Müşteri şikâyet yönetiminde firmaların performanslarının değerlendirilmesi: Kümeleme analizi incelemesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 13(3), 447-456.

Helgesen, O., Nesset, E. & T. Voldsund, (2009). Marketing perceptions and business performance: Implications for marketing education?, Marketing Intelligence Planning, 27, 25-47.

Norusis, M. J. (2007). SPSS 15.0 advanced statistical procedures companion, Chicago, IL: Prentice Hall.

Okazaki, S., (2007). Lessons learned from i-mode: What makes consumers click wireless banner ads?, Computers in Human Behavior, 23, 1692–1719.

Özdemir, A. & Orçanlı, K., (2012). İki Aşamalı Kümeleme Algoritması ile Pazar Bölümlemesi, Müşteri Profillerinin Belirlenmesi ve Niş Pazarların Tespiti, Uşak Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 5(3), 1-27.

Özkan, E., Avcı, S. & Aladağ, Z., (2019). Büyükşehir Belediyesi Çağrı Merkezi Verilerinin Kümeleme Analizi ile İncelenmesi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 35(3), 78-91.

Packianather, S., Michael Alan, D., Harraden, S., Soman, S. & White, J. , (2017). Data Mining Techniques Applied to a Manufacturing, SME. Procedia CIRP, 62, 123–128.

Rundle-Thiele, S., Kubacki, K., Tkaczynski A. & Parkinson, J. (2015). Using two-step cluster analysis to identify homogeneous physical activity groups, Marketing Intelligence and Planning, 33, 522-537.

Savaş, S. Nesset, E. & Topaoğlu N., (2011). Veri Madenciliği Yöntemi İle GSM Şebekelerinin Performans Analizi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 26(4), 741-751.

Sendín-Hernández, M. P., Ávila-Zarza, C., Sanz, C., MarcosVadillo, A., Muñoz-Bellido, E. & Dávila, F. J., (2018). Cluster analysis identifies 3 phenotypes within allergic asthma, The Journal of Allergy and Clinical Immunology: In Practice, (6) 955–961.

Zidek, K., Maxim, V., Pitel, J. & Hosovsky, A., (2016). Embedded vision equipment of industrial robot for inline detection of product errors by clustering-classification algorithms, Int. J. Adv. Robot. Syst., 13, 1-10.

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

UMAGD, (2023) 15(2), 636-646.

10.29137/umagd.1266187

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Kitlesel Çevrimiçi Ders Platformlarında Yapılan Yorumların Metin Madenciliği Kullanılarak Duygu Analizinin Yapılması

Sentiment Analysis of Comments Made on Massive Online Course Platforms using Text Mining

Ramazan Daşgın [1*], Kemal Adem [2]

[1]*Aksaray Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yönetim Bilişim Sistemleri Anabilim Dalı, 68100, Aksaray, TÜRKİYE*
[2]*Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği, 58000, Sivas, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 16/03/2023* ***Kabul / Accepted**: 01/06/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Öz

Çağımızda kolay ulaşılabilen, az maliyetli, zaman mekan kısıtı olmayan şeyler daha çok ilgi görmektedir. Son zamanlarda insanların sahip olduğu olanaklar ve teknolojinin gelişimi de düşünüldüğünde insanların ilgisinde yaşanan bu değişiklik eğitime de yansımıştır. İnsanlar artık istedikleri zaman, istedikleri yerden, kendi seçebilecekleri içeriklere ulaşmak istemektedirler. Bu istekler sonunda Kitlesel Açık Çevrimiçi Ders (KAÇD) platformları ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu platformlar üzerinde ücretli veya ücretsiz birçok konuda kurslar yer almaktadır. Birçok kişi bu kurslara kayıt olmadan önce, kurslara yapılan yorumlara ve kursa verilen puana göre değerlendirme yapılarak kayıt olmaktadırlar. Ancak tüm yorumları okuyarak bir kurs hakkında karar vermek kolay olmamaktadır. Bu çalışmada kullanıcıların yorumları okumasına gerek kalmadan kursları olumlu olumsuz olarak değerlendirmesi amacıyla KAÇD platformlarından birisi olan Udemy sitesinde bulunan kurslara yapılan yorumlar kullanılmıştır. Bu yorumlar üzerinden klasik makine öğrenmesi ve derin öğrenme kullanarak kurslar hakkında olumlu olumsuz değerlendirmeleri yapılmıştır. Klasik makine öğrenmelerinden BayesNet, J48, OneR ve DVM algoritmaları ile en başarılı sonuç %91.576 doğruluk sağlayan BayesNet algoritmasından elde edilmiştir. Veri setine Random, GloVe ve Word2Vec kelime gömmeleri uygulandıktan sonra, derin öğrenme modellerinden GRU ve CNN-LSTM hibrit mimarileri uygulanmış ve en başarılı sonuç GloVe Kelime gömmesi kullanıldıktan sonra %95.67 doğruluk oranıyla GRU mimarisinden elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

"KAÇD, Udemy, Metin Madenciliği, Duygu Analizi, Word2Vec, Glove, GRU"

Abstract

In our age, things that are easily accessible, less costly, and have no time and space restrictions attract more attention. Considering the possibilities that people have recently and the development of technology, this change in people's interest has also been reflected in education. People now want to access content that they can choose from wherever they want, whenever they want. As a result of these requests, Massive Open Online Course (MOOC) platforms began to emerge. There are many paid or free courses on these platforms. Before enrolling in these courses, many people register based on the comments made and the score given to the course. However, it is not easy to decide about a course by reading all the reviews. In this study, comments made on Turkish courses on Udemy, one of the MOOC platforms, were used to evaluate the courses positively and negatively without the need for users to read the comments. On these comments, positive and negative evaluations were made about the courses using classical machine learning and deep learning. With BayesNet, J48, OneR, and SVM algorithms from classical machine learning, the most successful result was obtained from the BayesNet algorithm with an accuracy of 91.576%. After applying Random, GloVe, and Word2Vec word embeddings to the dataset, hybrid architectures of GRU and CNN-LSTM from deep learning models were applied and the most successful result was obtained from GRU architecture with an accuracy of 95.67% after using GloVe word embedding.

Key Words

"MOOC, Udemy, Text Mining, Sentiment Analysis, Word2Vec, Glove, GRU"

1. Giriş

Son yıllarda yazılım teknolojilerindeki gelişmeler ve bu gelişmelere bağlı olarak internete olan erişimin kolaylaşması gibi sebeplerle eğitimin verilme şeklinin de değiştiği görülmektedir. Teknolojideki gelişmelerle beraber bilgisayar ve internete erişim konusunda yaşanan sıkıntıların günden güne azalmasıyla öğretimin mekanı ve zamanlaması konusunda teknolojin esneklik katması kaliteli bir eğitime erişebileceğimizin göstergesidir (Chan, Rajamohan, Gan ve Samsudin, 2021).
2008 yılında popüler olmaya başlayan ve dünya çapında yayılmaya devam eden Kitlesel Açık Çevrimiçi Dersler (KAÇD'ler), farklı alanlarda öğrenmeyi destekleyen, bilgilerin farklı yollarla ölçeklenebildiği, ücretsiz çevrimiçi kurslar olarak tanımlanmak ile birlikte birçok farklı tanımları da mevcuttur (İşgör Şimşek, 2015). Her ne kadar başlangıç olarak MIT, Harward, Stanford gibi dünyaca ünlü üniversitelerin derslerini herkese açık ve ücretsiz sunduğu çevrimiçi bir ortam olarak ortaya çıksa da son zamanlarda farklılaşmaya başlamıştır (Demirci, 2014).
Kayıtlı kişi sayısının gün geçtikçe arttığı, dünyaca ünlü kurumların ücretsiz açık kurslarının yer aldığı Coursera, Edx, MiriadaX, FutureLearn ile beraber birde herkesin kurs yayınlayabildiği ve birçok alanda kurslar barındıran Udemy, Udacity, KhanAcademy gibi daha pek çok KAÇD platformu bulunmaktadır (Onan, 2020). Tüm bu sistemlerde ihtiyacı olan kişiler istedikleri alanda ve ulaşmak istedikleri amaçları doğrultusunda kurslara erişim sağlayarak ücretli-ücretsiz kayıtlarını olarak derslere erişim sağlamaktadırlar.
Çeşitli kurslar veren siteler üzerinden herhangi bir kurs almadan önce hangi kursun istenildiği gibi bir içeriğe sahip olduğu, hangisinin anlatımının, kapsamının kişinin hedefine uygun olduğunu kursu alan kişinin araştırması gerekir. Çünkü uygun olmayan kursu seçmek, zaman ve güven kaybına sebep olabilir, potansiyel ve yeteneklere zarar verebilir. Genellikle kurs hakkında yapılan derecelendirmeler, yorumlar kurs hakkında en iyi fikir aracıdır. Ancak tüm yorumları okuyarak kurs hakkında bir karara varmak zaman alıcı iş olmasına karşın son zamanlarda yaygınlaşan metin madenciliği ve derin öğrenme gibi yeni teknolojilerin sonucunda bu işlem kolaylaşmıştır. Önceki çalışmalar incelendiğinde, bu konuda çok fazla çalışma yapılmadığı özellikle Udemy platformuyla ilgili bu alanda hiç çalışmanın olmadığı görülmüştür. Bu sebeple bir kurs hakkında tüm öğrenci yorumlarını derecelendirmeler de dahil, gözden geçirip o kurs hakkında olumlu- olumsuz gibi bir yargıya hızlı bir şekilde ulaşmamızı sağlayacak bir sistem önermesi ve bu sistemin daha önceden Udemy üzerinden bir örneğinin bulunmaması açılarından çalışmamız önemlidir. Çalışmada klasik makine öğrenmelerinden BayesNet, J48 ve OneR algoritmaları, derin öğrenme modellerinden, Random, GloVe ve Word2Vec kelime gömmeleri kullanıldıktan sonra, GRU ve CNN-LSTM Hibrit Modelleri kullanılarak Udemy üzerindeki kurs yorumlarının olumlu-olumsuz sınıflandırması gerçekleştirilmiştir.

1.1 İlgili Çalışmalar

KAÇD platformlarındaki yorumların olumlu-olumsuz sınıflandırılmasıyla ilgili yeterli çalışma yer almamaktadır. Fakülte öğretim performansının değerlendirilmesinde öğrencilerin geri bildirimlerini kullanarak bakış açısına göre duygu analizinde derin öğrenme yaklaşımı kullanan ilk girişim olan çalışmalarında Sindhu vd. (2019), var olan metinden otomatik yön çıkarmak ve bunların karşılığı olan yönlendirmeyi bulan bir sistem önermişlerdir. Bu sistemde çift katmanlı LSTM modeliyle, denetimli bakış açısı temelli fikir madenciliği kullanılmıştır. Sukkur IBA Üniversitesi'nin son beş yıldaki öğrenci yorumlarını elle etiketleyip veri seti olarak kullandıkları çalışmada olumlu, olumsuz, nötr gibi yönelimler belirlenmiştir. Sistemde gömme katmanının sayesinde görünüm çıkarmada %91, duygu polaritesini algılamada %93 gibi yüksek doğruluk değeri elde etmişlerdir (Sindhu vd., 2019). Chakravartky, Kameswari, Mydeen ve Seenivasan (2020), Coursera'daki makine öğrenmesi dersinden alınan yorumları veri seti olarak kullandıkları ve bu verilere fikir madenciliği uyguladıkları çalışmalarında, doğal dil işleme yöntemiyle görüş çıkarma, yapılandırılmamış metni işleme, kutup sınıflandırması adımlarını kullanmışlardır. Fikir madenciliği sonucunda elde edilen performansı, KNN, Lojistik Regresyon gibi makine öğrenimi algoritmalarını kullanarak değerlendirmişlerdir. KNN algoritması ile özgüllük ve duyarlılık konularında daha iyi sonuçlar elde edilirken, Lojistik Regresyon ile %94 gibi KNN'den daha fazla bir doğruluk değeri elde edildiği görülmektedir (Chakravartky vd., 2020). Chan vd. (2021), Coursera platformunu kullanarak yaptıkları çalışmalarında, kurs arayan kişilerin, istedikleri kurslarla ilgili fikir edinmeleri konusunda yardımcı olmak amacıyla yaptıkları çalışmalarında, metin temizleme, lemmatizasyon, metin madenciliği, duygu analizi ve görselleştirmeyi kapsayan bir metin analizini boru hattı önermişlerdir. Diğer önemli amacın birçok kursu bir şekilde karşılaştırarak kursa giriş yapılmasının kolaylaştırılmasını sağlamak olan çalışmada, N-gram analizi ve kelime bulutu çalışmalarının kurslar hakkında olumlu olumsuz fikirler edinilmesi ve kurslar arası karşılaştırma yapılabilmesi açısından başarılı olduğu, ancak olumsuz yorumların tespitinde eksik kaldığı görülmüştür. N-gram analizi sonucu doğrulukta 52/60, kullanılabilirlikte 55/60 puan aldıkları gözlemlenirken, model olumlu duyguları ayırt etmede %97'lik, olumsuz duyguları ayırt etmeden %46'lık bir ayırt etme oranı yakalamıştır (Chan vd., 2021). Coursera platformundan öğrencilerden gelen geri bildirimlerin analizi öğretmen ve öğrenme çıktılarının incelenmesi nedenleriyle fikir madenciliği kullanarak makine öğrenmesi modellerinin değerlendirilmesi amacıyla Edalati, İmran, Kastrati ve Deudpota (2021), derin öğrenme yöntemleri ile birlikte makine öğrenmesi algoritmalarından Rastgele Orman, Destek Vektör Makinesi ve Karar Ağacı algoritmalarını kullanmışlardır. Sonuçta Rastgele Orman algoritması ile en boy oranı tanımlamada %98.01, duyarlılık sınıflandırma görevlerinde %99.43 F1 skoru elde ederek başarılı sonuçlar elde etmişlerdir (Edalati vd., 2021). Dina, Yunardi, Firdaus ve Airlangga (2021), çevrimiçi platformda kullanıcıların yaptıkları incelemeler ve KAÇD içeriğiyle ilgili gelecekte olabilecek tasarım eğilimlerini belirlemek amaçlı yaptıkları çalışmalarında verileri Coursera'dan elde etmişlerdir. Araştırmada amaçlarına ulaşmak için metin madenciliği kullandıktan sonra kullanıcı tercihlerinin belirlenmesi için özellik-duygu çiftleri (anahtarı kelime çiftleri) çıkarılmıştır. Duygu analizi konusunda Destek Vektör Makinesinin kullanıldığı ve doğruluk, kesinlik, hatırlama ve F1 skoru değerlerinin %80'in üzerinde elde edildiği bu çalışmada, olumlu ve olumsuz özellik-duygu çiftlerinde kullanıcı tercihlerinin Coursera'da başarılı bir şekilde tanımlandığı anlaşılmaktadır (Dina

ve ark., 2021). Kullanıcı deneyimlerinin değerlendirilmesi konusunda geleneksel yöntemlere ek olarak, Beyin Bilgisayar Arayüzü teknolojisi olan elektroansefalografi (EEG) yöntemi kullanmayı amaçladığı çalışmasında Şahin (2022), Udemy platformunun kullanıcı deneyimi (KD) değerlendirmesi için 13 katılımcılı bir kullanıcı çalışması değerlendirmesi yapmıştır. Katılımcılar platformla etkileşime girmeden önce ve girdikten sonra KD değerlendirmesinde kullanılmak üzere veriler Etki Grid Anketi, KD anketinin kısa versiyonu (UEQ-S), Pozitif Etki ve Negatif Etki ölçeği (PANAS), Web Sitesi Analizi ve ölçüm envanteri (WAMMI) ile elde edilmiştir. Daha sonrasında EEG kullanımı için gerekli veriler ise Emotiv Epoc cihazı ile toplanmış ve Udemy platformunun kullanıcı deneyiminin olumlu olduğunu gösteren sonuçlar alınmıştır. Elde edilen tüm veriler sonuçta Geleneksel ve EEG yöntemlerindekiler olarak karşılaştırıldığında birbirini destekler nitelikte olduğu görülmüştür (Şahin, 2022).

Bu çalışmada, kurslara yapılan yorumları olumlu olumsuz sınıflandırması yapmak için daha önce literatürde üzerinde çalışma yapılmamış olan Udemy sitesinde bulunan kurs yorumlarının klasik makine öğrenmesi alanında BayesNet, J48, OneR ve DVM algoritmalarıyla, Random, GloVe ve Word2Vec kelime gömmelerinden sonra, derin öğrenme modellerinden, CNN, GRU ve LSTM mimarilerini kullanarak olumlu- olumsuz şeklinde sınıflandırması gerçekleştirilmiştir. Çalışılan algoritma ve modellerin sonuçları karşılaştırıldığında performansların kabul edilebilir düzeyde iyi olduğu gözlemlenmiştir. Makalenin geri kalanında, İkinci bölümde çalışmada kullanılan Udemy kurs yorumları veri kümesi ve kullanılan yöntemler verilmiştir. Üçüncü bölümde, deneysel değerlendirme sonuçları ve tartışma verilmiştir. Son bölümde, sonuçlar ve gelecekte yapılacak çalışma sunulmuştur.

2. Meteryal ve Metod

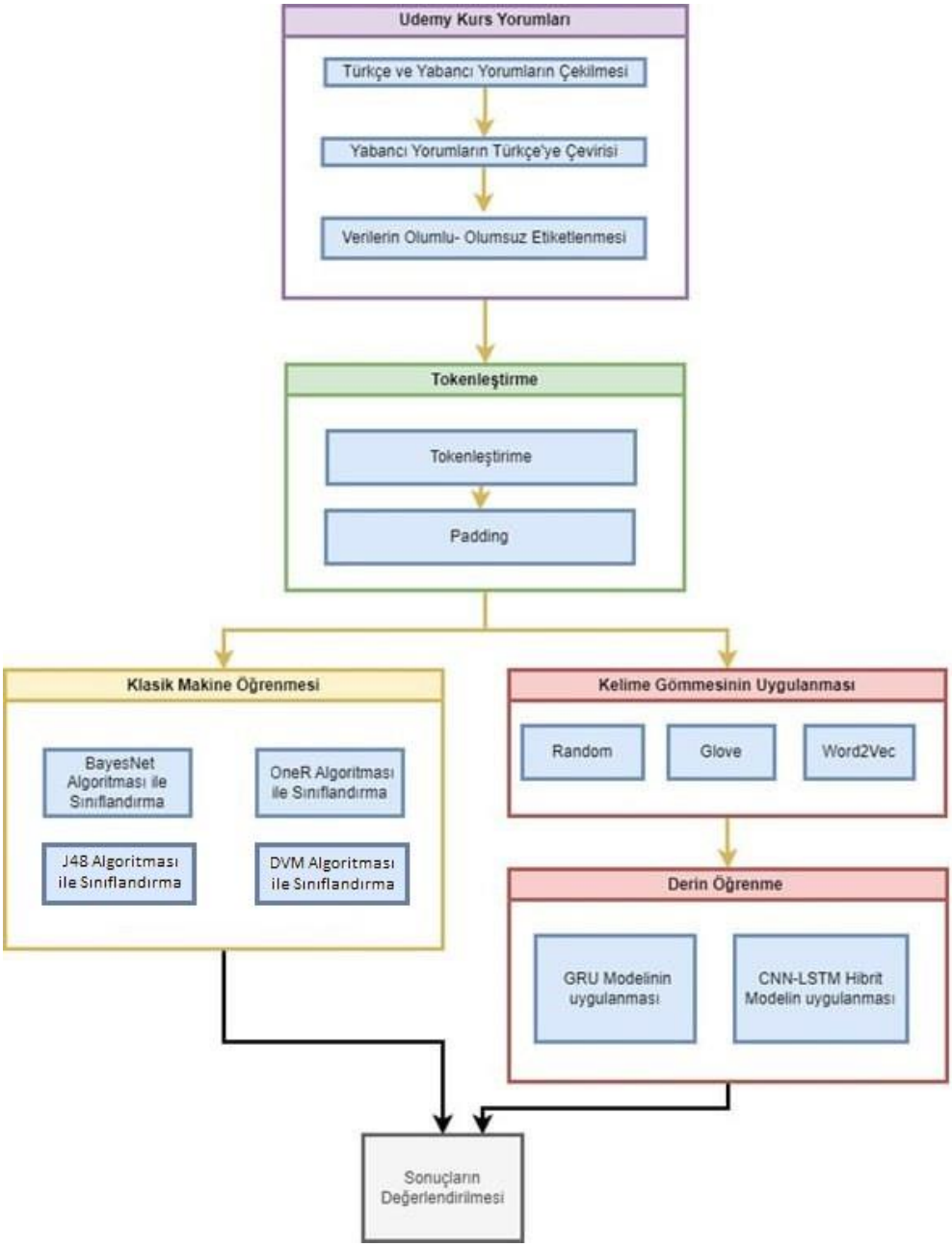
2.1. Udemy kurs yorumları veri kümesi ve Veri Ön İşleme Aşaması

Bu çalışmada Udemy sitesinde yer alan kurslara yapılan yorumlar kullanılmıştır. Verilerin Udemy üzerinden alınması Udemy API kullanılarak yapılmıştır. Udemy'de yer alan kurslara verilen puanlara göre yorumlar olumlu olumsuz şeklinde sınıflandırılmıştır.
Çalışmamızda kurslara yapılan yorumlardan elde edilen verilerde, 1 ve 3 puan arası olumsuz, 4 ile 5 puan arası yorumlar ise olumlu kabul edilmiştir. Verilerden anlamsız olabilecek 1 ile 3 harf arası olan kelimeler çıkarılmıştır. Anlamsız kelimelerin çıkarılması, yabancı dilde yazılmış yorumların ayıklanması gibi düzeltmelerden sonra 100000 olumlu ve 100000 olumsuz olmak üzere 200000 yorumdan oluşan veri seti elde edilmiştir. Veri setimizde yer alan olumlu ve olumsuz örnekler Tablo gösterilmiştir.

Tablo 1. Olumlu-Olumsuz Veri Örneği

Olumlu (1)	**Olumsuz (0)**
şuanlık konular sıkmadan izleyebiliyorum güzel bi anlatım var	şöyle böyle.Şimdiye kadar öğretilen şey çok basit.çok temel
şuana kadar satın aldığım en iyi eğitim oldu bu. tavsiye ederim	Eğitmenin talimatları bu modülde güncel veya uygulanabilir değildir

Düzenlenen verilerin kelime gömmelerinin işleyebileceği hale getirilmesi için tokenleştirme işlemi uygulanmıştır. Tokenleştime işleminden sonra elde edilen verilerle klasik makine öğrenmeleri uygulanmıştır. Yine aynı tokenleştirme sonucuyla öncelikle kelime gömmelerinden Random, GloVe ve Word2Vec yöntemleri uygulanıp, her birinden sonra ayrı ayrı GRU ve CNN-LSTM hibrit derin öğrenme modelleri uygulanmıştır. Kullanılan çalışma aşamaları Şekil 1'de görülen adımlardan oluşmaktadır.



Şekil 1. Çalışma Akış Diyagramı

Bu çalışmada, klasik makine öğrenmesi yöntemlerinden BayesNet, J48, OneR ve DVM ile, derin öğrenme modellerinden GRU ve CNN-LSTM Hibrit modelleriyle Udemy kurs yorumlarının olumlu-olumsuz sınıflandırması gerçekleştirilerek performansları karşılaştırılmıştır.

2.2. BayesNet

Tahmin değişkenleri veya özelikleri aracılığıyla tanımlanmış olan örnek verilere etiket veya bir kategori atamayı amaçlayan BayesNet, denetimli sınıflandırma algoritmaları arasında yer almaktadır (Gürtürk, 2022). Çok terimi olan verilerin analizi sırasında istatistiksel sınıflandırma tekniğini kullanarak, buna göre olasılıkları hesaplar (Altınsoy, 2019). BayesNet algoritması ağın yapısını öğrendikten sonra olasılık tablolarını öğrenme mantığıyla çalışmaktadır. Ağ yapısının iyi olduğunu belirlediğinde koşula bağlı olan bu olasılık tablosunu her değişkene özel tahmin etmektedir (Belen, 2018). Birbirinden bağımsız olan durumların aynı zamanda oluşması ve iki durumun da ayrı ayrı oluşması durumlarına göre sonucun hesaplandığı bu algoritmanın formülü Eşitlik 1'de yer almaktadır (Eraldemir, 2014).

$$\mathrm{P(A|B)} = \frac{(P(A)P(B|A))}{\mathrm{P(B)}} \tag{1}$$

Eşitlik 1'de yer alan formülde yer alan ifadeler (Altınsoy, 2019):
P(A|B): B durumu gerçekleştiğinde A durumunun gerçekleşme olasılığını, *P(A):* A durumunun gerçekleşme olasılığını, *P(B|A):* A durumu gerçekleştiğinde B durumunun gerçekleşme olasılığını, *P(B):* B durumunun gerçekleşme olasılığını temsil etmektedir.

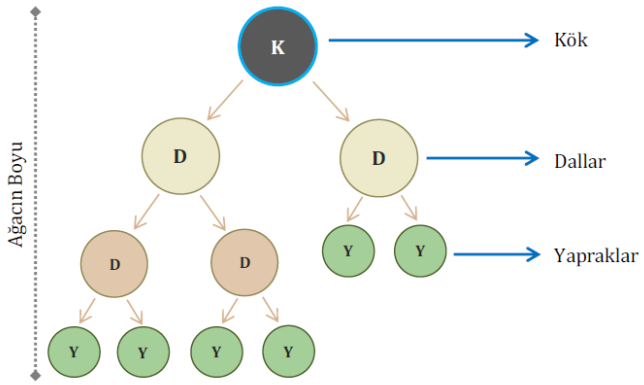
2.3. OneR

Hata temelli kural çıkarımına dayalı bu algoritma Holte (1993) tarafından önerilmiştir (Başer vd., 2020). Veride bulunan yordayıcı değişkenlerin her birine ait kurallar ürettikten sonra hatanın en az olduğu kuralı "bir kural" seçen basit bir yapıya sahip algoritmadır (Özden, 2018). Basit yapısına rağmen bu yöntem ile, birçok veri seti üzerinde başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Kaynar vd., 2018).
Her değişkenin tek olarak kullanıldığında oluşabilecek hata değerini hesaplayıp değişkenleri sıralama amacıyla, veri setinde bulunan her değer için bir model oluşturmaktadır. Bu modeller sonunda elde edilen toplam hatalar küçükten büyüğe doğru sıralanarak, eşik değeri altında kalan modeli oluşturan değişken belirlenir ve veri setinden çıkarılır (Kaynar vd. 2018). Tahminlerin ayrı ayrı sınıflandırma üzerindeki etkisi sonunda ortaya çıkmış olan toplam hatanın küçük çıkması, tahminin ne kuvvetli olduğunu göstermektedir (Tavacı, 2011).

2.4. J48

Weka veri madenciliği programında bulunan J48, C4.5 karar ağacı algoritması ve entropi değerlerini daha verimli hale getirmek amacıyla Ross Quinlan (1993) tarafından geliştirilmiş istatistiksel bir sınıflandırma algoritmasıdır (Gürtürk, 2022). J48'de anlaşılmasının kolaylığı ve karmaşık olmaması açısından karar verici olarak karar ağaçları tercih edilir. Ağaç karmaşıklığı işlemlerin doğruluğunda etkili olduğundan önemlidir (Akgül, 2019).

Karar ağaçları, kök, düğüm, dal ve yapraktan oluşan bir yapıya sahiptir (Özdemir, 2020). Bu yapıda bulunan düğüm sayısı, yaprak sayısı, ağacın derinliği, ağacın oluşturulmasındaki özellikler ağacın karmaşıklığını belirler. J48 algoritmasındaki amaç da bu karar ağacının boyutunun küçük tutulabilmesidir (Akgül, 2019). J48 algoritmasının ağaç yapısı Şekil 2'de yer almaktadır.



Şekil 2. J48 Algoritması Ağaç Modeli (Çoban, 2011)

2.5. Destek Vektör Makinesi (DVM)

Vapnik (1995), örüntü tanıma ve sınıflandırma problemlerini çözmek için DVM yöntemini geliştirmiştir (Cortes ve Vapnik, 1995). DVM, istatistiksel öğrenme teorisine dayalıdır ve temel olarak iki veri sınıfını mümkün olan en iyi şekilde ayırt etmek için kullanılır. Bu amaçla karar sınırları veya hiperdüzlemler belirlenir. Doğrusal olmayan bir veri kümesinde, DVM'ler doğrusal bir hiper düzlem çizemez. Bu nedenle, polinomsal, Gauss gibi çekirdek fonksiyonları kullanılır. Çekirdek fonksiyonları, doğrusal olmayan veriler üzerinde doğruluk değerlerini büyük ölçüde artırır.

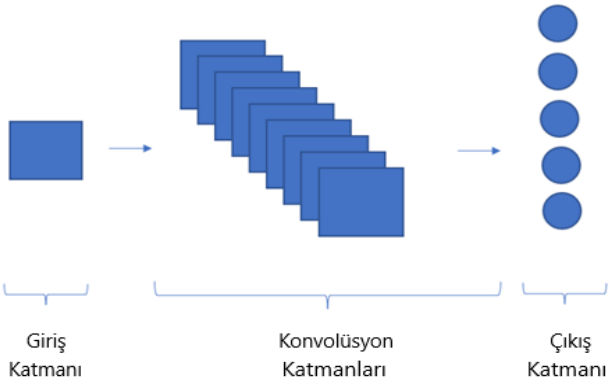
2.6. CNN (Convolution Neural Network- Evrişimsel Sinir Ağları)

Derin öğrenme yöntemlerinin en yaygın olarak kullanılanlarından birisi olan CNN, 1989 yılında LeCun tarafından tanımlanmıştır (Seyidbayli, 2022). Ancak evrişimsel sinir ağlarının donanımsal ihtiyaçlarının yüksek olmasından dolayı başlarda gelişimi yavaşlamıştır. Donanımsal kapasitelerin gelişmesiyle 2010'lu yıllarda, CNN'lerin yeterli süre içinde çalışabilecek seviyelere gelinmiş ve kullanımı hızla yayılmaya başlamıştır (Yaşar, 2022).

Tek boyutlu olan zaman serilerinin ve iki boyutlu olan görsel verilerin işlenmesinde kullanılan bu yapay sinir ağı, son zamanlardaki donanımsal değişimlerin gerçekleşmesiyle üç boyutlu mimariler de gelişmeye başlamıştır (Tekinarslan, 2022). Dil içerikli olan

sinyal ve diziler bir boyutlu, görüntü, ses gibi içerikler iki boyutlu, videolar, hacimli görüntüler üç boyutlu yapılarda kullanılır (LeCun ve ark., 2015).

Evrişim adındaki matematiksel işlemi kullanan CNN, birden fazla katman ve parametreden oluşmaktadır. Girdi verisinin içerisindeki ağırlıkları işlemektense öğrenebilir parametreler içeren filtreyi girdi üzerinde dolaştırma mantığıyla çalışır. Bu işlem sonunda modeldeki parametre sayısı azaldığından, girdi üzerinde yer alan komşu verilerin ilişkisi daha iyi yakalanmış olmaktadır (Özbilen, 2022). Bu ağlarda alınan giriş verileri katmanlar halinde işlenerek eğitim süreci gerçekleştirilir (Fındık, 2022). Yapısında yer katmanlar genel hatlarıyla Şekil 3'te görüldüğü gibi giriş katmanı, konvolüsyon (evrişimsel) katmanları ve çıkış katmanıdır.

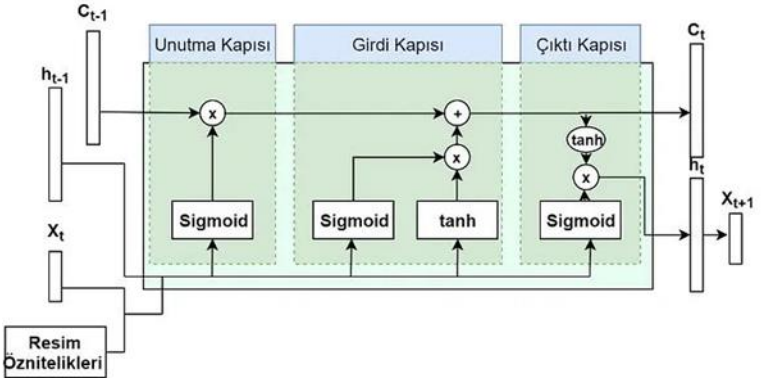


Şekil 3. CNN Katman Yapısı (Keskin, 2022)

2.7. LSTM (Long Short-Term Memory- Uzun Kısa Süreli Bellek)

İnsan beyni, bir metin okuduğunda aradığı bilgiyi bulduktan sonra genelde metnin geri kalan kısmını unutması şeklinde çalışarak verileri işlemektedir. İnsan beyninin bu işleyişini taklit eden ve RNN'in gelişmiş versiyonu olan LSTM, Hochreiter ve Schmindhuber (1997) tarafından tasarlanmıştır (Eren, 2022). Bilgileri varsayılan olarak uzun süre saklayabilen LSTM, RNN'deki kaybolan gradyanlar problemini çözmek için kapı olarak adlandırılan, neyin hatırlanacağı neyin unutulacağına karar verilmesi için 3 yapı geliştirmiştir (Şekil 4). LSTM, bu kapılar aracılığıyla hazırlanan hücre yapılarına bilgilerin eklenmesi ya da kaldırılması işlevlerine sahiptir (Fındık, 2022).

Hücrelerin durumunu kontrol edip koruyan bu kapılar şu şekildedir (Keskin, 2022):
Unutma Kapısı: Bellekte var olan bilgilerin hangilerinin tutulup hangilerinin tutulmayacağını aktivasyon fonksiyonları kullanarak karar verir.
Girdi Kapısı: Verilerin ne olduğunu öğrenip, girdilerin hafıza hücrelerine akışını kontrol eder.
Çıktı Kapısı: Çıktıların ağa akışını belirleyerek tahmin yapar.

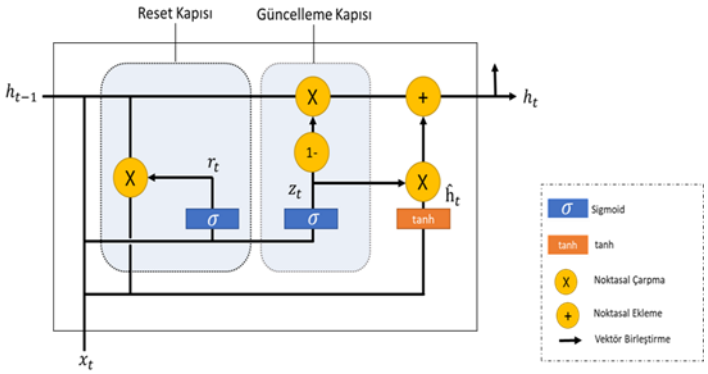


Şekil 4. LSTM Modeli Kapı Yapısı (Yıldız, 2020)

2.8. GRU (Gated Recurrent Unit- Kapılı Tekrarlayan Birim)

Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN) mimarisinin bir çeşidi olan ve LSTM mimarisinin de birden fazla varyasyonundan en çok tercih edilen Kapılı Tekrarlayan Birim (GRU), Cho ve arkadaşları tarafından 2014 yılında ortaya konulmuştur. LSTM yapısı üzerindeki giriş ve unutma kapısını güncelleme kapısı olarak birleştirerek değişiklik yapmışlardır (Eren, 2022). GRU ve LSTM mimarileri birbirine benzediğinden başarılı sonuçlar üretebilmektedirler (Fındık, 2022).

GRU yapısının temelinde sıfırlama kapısı ve güncelleme kapısı yer almaktadır (Şekil 5). Model üzerinde var olan geçmiş bilgilerden ne kadarının unutulacağına karar vermede sıfırlama kapısı, modeldeki önceki zamanda var olan adımların hangilerinin ileriye dönük aktarılmasının belirlenmesinde güncelleme kapısı kullanılmaktadır (Balli, 2022). GRU bu yapısıyla LSTM'ye göre daha basit, hızlı eğitilebilen, daha verimli yürütülebilen bir model olmaktadır (Gencer, 2022).



Şekil 5. GRU Mimarisi (Canlı, 2022)

Bu çalışmada, kurs yorumlarının sınıflandırılmasının gerçekleştirilmesi için klasik makine öğrenmesi yöntemlerinden BayesNet, OneR, J48 ve DVM, derin öğrenme yöntemlerinden metin madenciliğinde sıklıkla kullanılan GRU ve CNN-LSTM hibrit modelleri kullanılmıştır. Kullanılan modeller için Tablo 4'te görülen değerler seçilerek deneysel değerlendirmeler yapılmıştır. Deneysel değerlendirmeler, klasik makine öğrenmesi için Weka programı, derin öğrenme modelleri için, Python dili ve Jupyter Lab, Spyder kod editörleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Modellerin Eğitiminde Kullanılan Parametreler

Modeller	**Parametreler**	**Değerler**
Klasik Makine Öğrenmesi	Fold	10
GRU	Embedding size	300
	Learning rate	0.001
	Aktivasyon fonksiyonu	Sigmoid
CNN	Filtre boyutu	3, 4
	Drop out	0.1, 0.2
	Pool size	1, 2, 4

2.9. Değerlendirme Kriterleri

Çalışmada kullanılan veri kümesindeki veriler yapılan yorumların puan durumlarına göre olumlu ve olumsuz şeklinde iki farklı sınıf ile ifade edilmektedir. Çalışmada klasik makine öğrenmesi modellerinin eğitimi için fold değeri 10 alınarak deneysel değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Derin öğrenme modellerinden GRU için embedding size 300, learning rate 0.001 ve aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid, CNN-LSTM hibrit modelinde CNN parametrelerinden filtre boyutu 3, 4, drop out değeri 0.1, 0.2 ve pool size 1, 2, 4 alınarak deneysel değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada klasik makine öğrenmelerinin performansları doğruluk ve f1-skor değeri kriterlerine, derin öğrenme modellerinin performansları doğruluk, kesinlik, duyarlılık, f1-skor kriterlerine göre karşılaştırılmıştır (Sırasıyla Eşitlik 2, 3, 4, 5) (Degadwala vd., 2021).

$$\text{Doğruluk} = \frac{\text{TN} + \text{TP}}{\text{TN} + \text{TP} + \text{FP} + \text{FN}} \tag{2}$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \tag{3}$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \tag{4}$$

$$\text{F1} - \text{skor} = 2 * \frac{\text{kesinlik} * \text{duyarlılık}}{\text{kesinlik} + \text{duyarlılık}} \tag{5}$$

Eşitliklerde yer alan *TP* gerçek pozitifi, *TN* gerçek negatifi, *FP* yanlış pozitifi ve *FN* ise yanlış negatif değerlerini göstermektedir. Doğruluk değeri modelde doğru tahmin edilen örneklerin toplam veri kümesine oranı ile hesaplanmaktadır. Kesinlik değeri, Pozitif olarak tahminlenen değerlerin gerçekten kaç adedinin Pozitif olduğunu göstermektedir. Duyarlılık değeri, Pozitif olarak tahmin edilmesi gereken örneklerin ne kadarının Pozitif olarak tahmin edildiğini gösterir. F1 skor değeri de kesinlik ve duyarlılık değerlerinin harmonik ortalamasını göstermektedir.

3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

Çalışmada klasik makine öğrenmesi algoritmaları ve derin öğrenme modelleri ile deneysel analizler gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, Udemy kurs yorumları veri kümesi üzerinden yorum sınıflandırılması işlemini gerçekleştirebilmek için BayesNet, OneR, J48, DVM, GRU ve CNN-LSTM modelleri kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar sunulmuştur. Çalışmada kullanılan klasik makine öğrenmesinin deneysel sonuçları Tablo 3'te, derin öğrenme modellerinin deneysel sonuçları Tablo 4'te, Random, GloVe ve Word2Vec kelime gömmelerinden sonra uygulanan her bir derin öğrenme modeli sonunda ortaya çıkan sonuçlar ise Tablo 5, Tablo 6, Tablo 7'de yer almaktadır.

Tablo 3. Klasik Makine Öğrenmelerinin Karşılaştırılması

	Doğruluk	**F Skoru**
BayesNet	91.5960	0.916
OneR	85.1305	0.851
J48	82.9085	0.829
DVM	82.2850	0.822

Çalışmada, Tablo 3'te yer alan doğruluk oranlarına göre klasik makine öğrenmesi algoritmalarının değerlendirilmesi sonucu, en yüksek doğruluğun %91.596 oranla BayesNet ile, en düşük doğruluğun %82.2850 oranla DVM'e ait olduğu gözlemlenmiştir. Kullanılan OneR algoritması ile de %85.1305 oranla ortalama bir başarı elde edilmiştir. F- skorları açısından değerlendirildiğinde BayesNet için %91.6, OneR için %85.1, J48 için %82.9 ve DVM için ise %82.2 oranı elde edildiği görülmüştür.

Tablo 4. Derin Öğrenme Modellerinin Sonuçları

	Doğruluk	**Duyarlılık**	**Kesinlik**
GRU (GloVe)	0.9567	0.9582	0.9493
CNN-LSTM (Random)	0.9458	0.9580	0.9280
CNN-LSTM (GloVe)	0.9493	0.9464	0.9449
CNN-LSTM (Word2Vec)	0.9484	0.9454	0.9439

Tablo 4'te yer alan doğruluk oranlarına göre kullanılan modellerin değerlendirilmesi sonucu, en yüksek doğruluğun %95.67 oranla GloVe kelime gömmesi uygulandıktan sonra GRU modeliyle elde edilmişken, en düşük doğruluğun ise %94.58 oranla Random kelime gömmesi kullanıldıktan sonra CNN-LSTM hibrit modeline ait olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca diğer modellerinin doğruluk oranlarının ise birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. GloVe kelime gömmesi yapıldıktan sonra GRU derin öğrenme modeliyle %95.82 duyarlılık, %94.93 kesinlik, Random kelime gömmesi yapıldıktan sonra CNN-LSTM derin öğrenme modeliyle %95.80 duyarlılık, %92.80 kesinlik, GloVe kelime gömmesi yapıldıktan sonra CNN-LSTM derin öğrenme modeliyle %94.64 duyarlılık, %94.49 kesinlik, Word2Vec kelime gömmesi yapıldıktan sonra CNN-LSTM derin öğrenme modeliyle %94.54 duyarlılık, %94.39 kesinlik oranları elde edildiği görülmüştür.

Tablo 5. GRU Modeli Sonuçları

Kelime Gömmesi	**Doğruluk**	**Duyarlılık**	**Kesinlik**
Random	0.9499	0.9468	0.9458
GloVe	0.9567	0.9582	0.9493
Word2Vec	0.9441	0.9406	0.9396

Tablo 5'teki doğruluk, duyarlılık ve kesinlik oranlarına göre kullanılan modelin değerlendirme sonuçlarına bakıldığında, en yüksek performansın %95.67 doğruluk, %95.82 duyarlılık ve %94.93 kesinlik oranlarıyla GloVe kelime gömmesinden sonra GRU modeli kullanılarak elde edildiği görülmektedir.

Tablo 6. Random Kelime Gömmesi Uygulaması Sonrası CNN-LSTM Hibrit Model Sonucu

CNN Parametreleri			Doğruluk	Duyarlılık	Kesinlik
Filtre Boyutu	**Drop out**	**Havuz boyutu**			
3	0.2	1	0.9458	0.9580	0.9280
3	0.2	4	0.9456	0.9408	0.9423
4	0.1	2	0.9238	0.9099	0.9254

Tablo 6'daki doğruluk, duyarlılık ve kesinlik oranlarına göre Random kelime gömmesi sonucunda uygulanan CNN-LSTM hibrit modelin değerlendirme sonuçlarına bakıldığında, en yüksek performansın CNN filtre boyutu 3, dropout değeri 0.2 ve pool size değeri 1 olarak ayarlandığı durumda elde edildiği görülmektedir. Bu durumda %94.58 doğruluk, %95.80 duyarlılık ve %92.80 kesinlik oranlarına ulaşılmıştır. En düşük performans ise filtre boyutu 4, dropout değeri 0.1 ve pool size değeri 2 olarak ayarlandığında elde edilmiştir, bu durumda %92.38 doğruluk, %90.99 duyarlılık ve %92.54 kesinlik oranlarına ulaşılmıştır.

Tablo 7. Glove Kelime Gömmesi Uygulaması Sonrası CNN-LSTM Hibrit Model Sonucu

CNN Parametreleri			Doğruluk	Duyarlılık	Kesinlik
Filtre Boyutu	**Drop out**	**Havuz boyutu**			
3	0.2	1	0.9493	0.9464	0.9449
3	0.2	4	0.9464	0.9289	0.9548
4	0.1	2	0.9216	0.9001	0.9296

Tablo 7'deki doğruluk, duyarlılık ve kesinlik oranlarına göre GloVe kelime gömmesi sonucunda uygulanan CNN-LSTM hibrit modelin değerlendirme sonuçlarına bakıldığında, en yüksek performansın CNN filtre boyutu 3, dropout değeri 0.2 ve pool size değeri 1 olarak ayarlandığı durumda elde edildiği görülmektedir. Bu durumda %94.93 doğruluk, %94.64 duyarlılık ve %94.49 kesinlik oranlarına ulaşılmıştır. En düşük performans ise filtre boyutu 4, dropout değeri 0.1 ve pool size değeri 2 olarak ayarlandığında elde edilmiştir, bu durumda %92.16 doğruluk, %90.01 duyarlılık ve %92.96 kesinlik oranlarına ulaşılmıştır. Ayrıca, CNN filtre boyutu 3, dropout değeri 0.2 ve pool size değeri 4 olarak ayarlandığında %94.64 doğruluk, %92.89 duyarlılık ve %95.48 kesinlik oranlarına ulaşılmıştır.

Tablo 8. Word2Vec Kelime Gömmesi Uygulaması Sonrası CNN-LSTM Hibrit Model Sonucu

CNN Parametreleri			Doğruluk	Duyarlılık	Kesinlik
Filtre Boyutu	**Drop out**	**Havuz boyutu**			
3	0.2	1	0.9484	0.9454	0.9439
3	0.2	4	0.8774	0.8264	0.9023
4	0.1	2	0.9416	0.9466	0.9293

Tablo 8'de yer alan Word2Vec kelime gömmesi sonunda uygulanan CNN-LSTM hibrit modelinde filtre boyutu 3, drop out değeri 0.2 ve havuz boyutu 1 olan CNN parametrelerinde %94.84 ile en yüksek doğruluk değerine ulaşılmıştır. Yapılan tüm deneylerde en iyi başarı oranın klasik makine öğrenmesi algoritmalarından BayesNet, derin öğrenme modellerinden GloVe kelime gömmesi sonunda GRU ile edildiği görülmektedir. Kullanılan modeller arasında ikinci en iyi başarı oranı klasik makine öğrenmesi algoritmalarından OneR ile %85.1305 doğruluk, %85.1 f skor oranları, derin öğrenme modellerinden GloVe kelime gömmesi sonunda CNN-LSTM hibrit modeli ile %94.93 doğruluk, %94.64 duyarlılık ve %94.49 kesinlik oranları elde edilmiştir.

4. Sonuç ve Tartışma

Coursera, FutureLearn, Khan Academy, Udemy gibi zamanla gelişmesine devam eden KAÇD'ler mevcuttur. Bu sistemlerde kurslar, bazıları az bir ücretle, bazıları ücretsiz bir şekilde yer almaktadır. Kullanıcılar kurslara kaydolurken, birçok çevrimiçi işlerimizde olduğu gibi, kursla ilgili yorumlara bakmaktadırlar. Kurslarla ilgili yorumlara bakarak değerlendirmenin gerçekleştirilmesi bazen çok zor olmaktadır. Klasik makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleri kullanılarak bu değerlendirmeler kolaylıkla gerçekleştirilmektedir. Ancak bu konuda az çalışma bulunup, Udemy ile yapılan bir çalışmanın olmadığı görülmektedir. Çalışmada kullanıcıların Udemy sitesindeki kurs yorumlarını okumasına gerek kalmadan kursla ilgili olumlu-olumsuz olmak üzere bir yargıya varmaları amacıyla makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleri kullanılarak yorumlar sınıflandırılmıştır. Deneysel değerlendirmeler sonucu en başarılı sonucun klasik makine öğrenmesi algoritmalarından BayesNet ile %91.596 doğruluk oranı, derin öğrenme modellerinden GloVe kullanıldıktan sonra GRU ile %95.67 doğruluk oranıyla gerçekleştiği görülmüştür. Gelecekte

yapılacak çalışmalarda, farklı kelime gömme yöntemleri, makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları kullanılarak sınıflandırma doğruluğunun artırılması hedeflenmektedir.

Kaynaklar

Altınsoy, F. (2019). Uzaktan Eğitim Öğrencilerinin Başarılarının Yapay Zeka Teknikleri İle Tahmini. (Yüksek Lisans Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta.

Başer, S. H., Hökelekli, O. & Adem, K. (2020). Ortaöğretimde Öğrenim Gören Öğrenci Performanslarının Veri Madenciliği Yöntemleri ile Tahmin Edilmesi. Bilgisayar Bilimleri ve Teknolojileri Dergisi, 1 (1), 22-27.

Belen, N. (2018). Acil Tıp Kliniğine Göğüs Ağrısı Şikayeti ile Başvuran Hastalarda Otuz Günlük Kardiyak İlişkili Olayların Tanımlanmasında Klinik Karar Destek Sistemi (Clınıcal Decısıon Support System) Geliştirilmesi. (Uzmanlık Tezi), Sağlık Bilimleri Üniversitesi İzmir Bozyaka Eğitim ve Araştırma Hastanesi Acil Tıp Kliniği, İzmir

Canlı, H. (2022). IoT Tabanlı Akıllı Şehirlerde Derin Öğrenme ve Mobil Tabanlı Akıllı Park Sistemi Yaklaşımı. (Doktora Tezi), Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Düzce.

Chakravarthy, V.J. Kameswari, M. Devan Mydeen, H. & Seenivasan, M. (2021). Opinion mining from student text review for choosing better online courses. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1070, 1-13

Chan, H. Y., Rajamohan, R., Gan, K.H. & Samsudin, N. (2021, Eylül)Text Analytics on Course Reviews from Coursera Platform. 2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAIET), Kota Kinabalu, Malaysia.

Cortes C, Vapnik V. 1995. Support-vector networks. Machine Learning 20: 273-297. https://doi.org/10.1007/BF00994018

Çoban, T. (2011). Makine Öğrenme Algoritmaları ile Web Sitelerinin Tıklamalarının Analizi. (Yüksek Lisans Tezi), Beykent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul

Degadwala, S., Vyas, D., Chakraborty, U., Dider, A. R., & Biswas, H. (2021). Yolo-v4 Deep Learning Model for Medical Face Mask Detection. 2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS), 209-213.

Demirci, N. (2014). What is Massive Open Online Courses (MOOCs) and What is promising us for learning?: A Review-evaluative Article about MOOCs. Necatibey Eğitim Fakültesi Elektronik Fen ve Matematik Eğitimi Dergisi, 8(1), 231-256.

Dina, N., Yunardi, R., & Firdaus, A. (2021). Utilizing text mining and feature-sentiment-pairs to support data-driven design automation massive open online course. International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET), 16(1), 134-151.

Edalati, M., Imran, A.S., Kastrati, Z., Daudpota, S.M. (2022). The Potential of Machine Learning Algorithms for Sentiment Classification of Students' Feedback on MOOC. In: Arai, K. (eds) Intelligent Systems and Applications. IntelliSys 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 296. Springer, Cham.

Eraldemir, S. G. (2014). EEG verileri kullanılarak metinsel okuma ve matematiksel işlemlerin analizi. (Yüksek Lisans Tezi), Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hatay.

Eren, M. Ç. (2022). Yinelemeli Sinir Ağları İle Sermaye Piyasası Yön Tahmini Üzerine Bir Çalışma. (Yüksek Lisans), İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Fındık, M. M. (2022). Derin Öğrenme Tabanlı Hibrit Tahminleme Modeli Kullanarak Rüzgar Hızı Tahminlemesi. (Yüksek Lisans Tezi), Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Tokat.

Gencer, M. (2022). Yapısal Olmayan Metinler İçin Adlandırılmış Varlık Tanıma Algoritmaları ve Uygulamaları. (Yüksek Lisans Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı, İzmir.

Gürtürk, U. (2022). Türkiye'nin Siber Güvenlik Politikalarının Yazılım Mühendisliği Açısından Değerlendirilmesi ve Kritik Altyapıların Siber Saldırılardan Korunmasına Yönelik Olay Yönetim Sistemi Tasarım. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Hochreiter, S. & Schmidhuber, J. (1997). Long Short-Term Memory. Neural Computation, vol. 9, no. 8, pp. 1735-1780, 15 Nov. 1997, doi: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.

Holte, R.C. (1993) Very simple classification rules perform well on most commonly used data sets. Machine Learning, 11(1), 63-90.

İşgör Şimşek, E. 2015, Mobil Ortamlarda Kitlesel Açık Çevrimiçi Derslerin (Kaçd) Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kaynar, O. Arslan, H. Görmez, Y. & Işık, Y. E. (2018). Makine Öğrenmesi ve Öznitelik Seçim Yöntemleriyle Saldırı Tespiti. Bilişim Teknolojileri Dergisi, 11 (2), 175-185. DOI: 10.17671/gazibtd.368583

Keskin, C. (2022). Graf Tabanlı Yaklaşım ile Uzun Vadeli Trafik Akış Hızı Tahmini. (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Lecun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. (2015). Deep learning. Nature, 521(7553): 436–444.

Onan, A. (2020). Sentiment analysis on massive open online course evaluations: A text mining and deep learning approach. Specıal Issue Artıcle 29(3), 572-589.

Özbilen, M. L. (2022). Hisse Senedi Fiyat Tahmininde Otokodlayıcı ve Graf Evrişimli Ağının Uygulanması. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Özdemir, E. (2020). Basketbol Maç Sonuçlarının Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Tahmin Edilmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilişim Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Muğla.

Özden, C. (2018). The Effects Of Preprocessıng Methods On Predıctıon Of Traffıc Accıdent Severıty. (Yüksek Lisans Tezi), Çukurova Unıversıty Instıtute Of Natural And Applıed Scıences Department Of Computer Engıneerıng, Adana.

Quinlan, J. R. (2014). C4. 5: programs for machine learning. Elsevier.

Seyidbayli, C. (2022). Transfer Öğrenmesi Tabanlı Hibrit Evrişimsel Sinir Ağı Modelleri Kullanılarak Meme Kanseri Teşhisi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Sindhu, I., Daudpota, S. M., Badar, K., Bakhtyar, M., Baber, J., & Nurunnabi, M. (2019). Aspect-based opinion mining on student's feedback for faculty teaching performance evaluation. IEEE Access, 7, 108729-108741.

Şahin, E. B., & Durdu, P. O. (2021). Bilişsel gezinti ile kitlesel açık çevrimiçi ders (kaçd) web sitelerinin kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi. Bilişim teknolojileri dergisi, 14(4), 377-389.

Tavacı, H. (2011). GSM şebekelerinde sahtekarlık yönetimi için veri madenciliği yöntemlerinin uygulanması. (Yüksek Lisans Tezi), Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgi Teknolojileri Ana Bilim Dalı, İstanbul.

Tekinarslan, R. (2022). Çevrimiçi Öğrenme Ortamlarında Öğrenme Analitiği Verileri ve Makine Öğrenmesi Kullanarak Akademik Başarının Değerlendirilmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.

Yaşar, H. (2022). Covıd-19 Hastalığının Derin Öğrenme Yöntemleri Kullanılarak Tespiti. (Doktora Tezi), Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.

Yıldız, E. (2020). LSTM ve Metin Sınıflandırması. 14.01.2023 tarihinde https://medium.com/@iamemreyildiz/lstm-ve-metin-sınıflandırması-c1a48eb53e01 adresinden erişilmiştir.

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

UMAGD, (2023) 15(2), 647-653.

10.29137/umagd.1120064

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Seramik atık ilaveli hafifletilmiş beton

Click Here, Type the Title of Your Paper, Capitalize First Letter

Nazım Kunduracı[1]

[1]*Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, 67980 Zonguldak, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 25/05/2022* ***Kabul / Accepted**: 02/06/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Öz

Konutlarda ve yapılarda dayanım, ısıl iletkenlik, enerjiden tasarruf için beton kullanılır. Beton kullanım alanına göre belirli özelliklere sahiptir. Yapılarda kullanılan betonun yoğunluklarının hafif olması buna bağlı olarak dayanımlarının belirli standartlarda olması ve ısıl ve ses iletkenliklerinin düşük olması istenir. Köpük beton: içerisinde su, çimento ve ayrıcalıklı dolgu yapıların (uçucu kül, ponza, perlit, bims, bazalt vb.) bulunduğu karışımlardan oluşan ve bünyesinde hacimce yüksek oranlarda birbirinden ayrı hava koridorlarının olduğu gözenekli betona köpük beton denir. Gözenekli bir yapıda bulunmasından dolayı hem hafif hem de ısıl iletim katsayısı düşük malzemelerdir. Köpük beton kullanım alanları; blok tuğla, duvar panel üretimi, şap üretimi, tünel ve kuyularda dolgu amaçlı hafif beton, ısı yalıtımlı hafif kiremit ve seramik üretimi vb. alanlarda kullanılır. Köpük beton literatürde portland çimento ve su karışımına köpükleştirici ilave edilerek üretimi sağlanır. Üretilen köpük beton uygulama alanına göre kalıplara dökülerek şekillendirilir ve prizlenme süresi tamamlanınca üretim tamamlanır. Bu çalışmada köpük beton reçetesine geri dönüştürülmüş seramik atık malzemeleri girilerek üretim sağlanmıştır. Seramik atıklar geri dönüşümü zor malzemelerdir. Çeşitli kırma-öğütme işlemlerine tabi tutulan atıklar 200mikron elenmiştir. Reçeteye belirli oranlarda portland çimentosu yerine seramik atık katılarak üretim sağlanmıştır. Üretilen seramik atıklı köpük beton ile çevre dostu, %10 daha ekonomik, dayanımı yüksek, ses ve ısıl iletkenliği yüksek, % 10 daha hafif köpük beton geliştirilmiştir. Ürettiğimiz köpük beton; blok tuğla, duvar-panel üretiminde, şap üretiminde vb. alanlarda kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler

Seramik atık, köpük beton, çevre dostu, yapı, geri dönüşüm.

Abstract

Concrete is used in buildings for strength, thermal conductivity and energy saving. It is desired that the density of the concrete used in the buildings be lightweight, have high strength and have good thermal and sound conductivity. Foam concrete is consisting of mixtures containing water, cement and special aggregates and having air gaps that independent each other at 75-80% of its volume. They are both low weight and have low thermal conductivity due to their porous structure. Foam concrete is using a lot of area such as production of block bricks, wall panels, production of screeds, lightweight concrete for wadding in tunnels and wells, production of thermally insulated lightweight tiles and ceramics. Foam concrete is produced by adding foaming agent to portland cement and water mixture. The foam produced is poured into molds according to the application area so the production is completed when the freezing time is completed. In this project, ceramic waste materials were adding into the foam concrete and trials were conducted. Ceramic wastes are difficult to recycle. Wastes are subjected to various grinding processes and they were reduced to below 300 microns. Experiments were made by adding ceramic waste in certain ratios to foam concrete resin instead of portland cement. As a result of this process the produced foam is environmentally friendly, 10% more economical, high strength and 10% lightweighter. Our produce is appropriate for using such areas; block brick, wall-panel production, screed etc.

Key Words

Ceramic waste, foam concrete, environment friendly.

***Sorumlu Yazar: nkunduraci@beun.edu.tr**

1. GİRİŞ

Yaşam ve gelişen teknoloji için en önemli gereksinimlerden biri şüphesiz enerjidir. Enerji; kömür, petrol, hidrolik, doğalgaz, nükleer, jeotermal, rüzgar, güneş vb. kaynaklardan edinilmektedir. Dünya üzerinde birincil enerji kaynaklarının hızla tükenmeye başlamasıyla, tüm ülkeler enerji ihtiyaçlarını denetleme ve enerjiyi daha etkin kullanmaya yönelik yeni yöntemler geliştirmektedirler. Bu yöntemler fosil tabanlı enerji kaynaklarına bağımlılığı azaltmaya, enerji ihtiyacını alternatif kaynaklarla sağlamaya ve enerjinin korunumuna yöneliktir. Çok büyük harcamalarla elde edilebilen enerjinin bilinçli bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Ülkemizin enerji açığı da her geçen gün artmakta ve bu açığın büyümesinde alternatif enerji kaynaklarının çok verimli kullanılmaması, mevcut kaynakların tasarruflu kullanılmaması ve yapıların yalıtımına gerekli özenin gösterilmemesi de etken olmaktadır (GÜNDÜZ, 2007:1-5).Son yıllarda sanayileşme adımları, nufüs yükselmeleri ve kırsal kesimden şehirlere olan göçün neden olduğu aşırı yapılaşma, beraberinde kentlerde ısınma ihtiyacına olan talebi artırmıştır. Ülkemizde tüketilen yıllık enerjinin yaklaşık %41'i konut ve yapıların ısıtılmasında, %33'ü sanayi, %20'si ulaşım, %5'i tarım, ve %1'i diğer alanlarda kullanılmaktadır. Ülkemizde üretilen enerjinin yaklaşık olarak %47 'sinin dış alımlarla karşılandığını göz önüne bulundurursak ve dünyada enerji fiyatlarının hızla arttığını düşünürsek enerjinin verimli bir şekilde kullanılması daha iyi anlaşılabilecektir. En pahalı enerjilerden biriside ısınma enerjisidir. Bu nedenle, binaların yaşama hacimlerinde insan sağlığına uygun ısıl konforu sağlayacak uygun yapım teknikleri ile enerjiden tasarruf yöntemlerinin geliştirilmesi son derece önemlidir. Konutlarda ve yapılarda ısıl iletkenlik, enerjiden tasarruf için beton kullanılıyor. Beton, günümüzde birçok yapıda kullanılan en yaygın yapı malzemesidir. Betonun en yaygın yapı malzemesi olmasının nedeni diğer yapı malzemelerine göre üstünlüğünden kaynaklanmaktadır (GÜNDÜZ, 2007:1-5)**.** Beton türevi malzemelerin binalara verdiği yükler ve binalardaki yalıtım eksikliği önemli sorunlara neden olabilmektedir. Betonun ısı iletimi, içindeki çimentonun artmasıyla yükseltilebilmekte ve düşük ısı iletkenliğine sahip agrega kullanılması ile azaltılabilmektedir. Aynı amaç için kullanılan birçok malzemeye göre gaz ve köpük betonun düşük birim yoğunluğa sahip olması yapının toplam ağırlığının düşürülmesine katkı sağlar ve böylece yapının toplam kütlesini düşürerek deprem sırasındaki riskleri azaltmaktadır. Deprem tasarım kuvvetinin global olarak azalması donatıda da azalmayı sağlar, böylece gaz ve köpük betonlar daha ekonomik çözüm elde edilir. Endüstriyel yapılarda gaz beton panellerin kullanılmasıyla sismik yükler altında yapının düğüm noktaları daha az zorlanır ve depreme karşı uygun çözüm sağlanır(TAŞDEMİR, 2002).

Bu çalışmada köpük beton bünyesine seramik atık malzemeleri katılarak dayanım arttırma, yoğunluğu düşürme, ısıl yalıtımını arttırma ve ekonomik bir ürün üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla üretilen seramik atıklı hafif betonun fiziksel ve mekanik performanslarını ölçmek amacı ile basınç dayanımı, birim ağırlık tayini, su emme miktarı, ısıl iletkenlik katsayısı elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

3.MATERYAL ve YÖNTEM

Bu araştırmada çimento, seramik kırığı, şebeke suyu, süper köpük ajanı ile 300-1400 kg/m3 yoğunluk aralığında köpük betonların üretimi, bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Laboratuvar ortamında üretilen köpük beton numunelerinin kuru yoğunluk, basınç dayanımı, su emme testi, porozite miktarları, ve ısıl iletkenlik özellikleri deneysel olarak araştırılmış, elde edilen bulgulardan kuru yoğunluğa bağlı basınç dayanımı, çekme dayanımı ve ısıl iletkenlik katsayılarının tahminine yönelik bağıntılar önerilmiştir. Köpük beton numunelerinin yoğunluğu, sürfaktan+su+hava karışımından elde edilen köpük miktarı ve yoğunluğu ile kontrol edilmiştir.

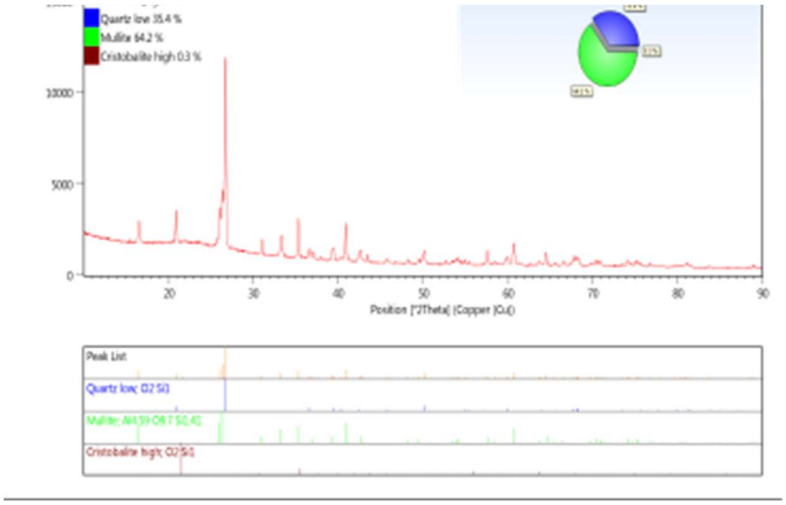
3.1 MATERYAL

Yapılan çalışmalarda, Bartın Çimento Fabrikasında üretilen TS EN 1971:2012 standartlarına uygun çimento kullanılmıştır. (TS 197-1, 2012) Karışım suyu olarak, Zonguldak ili şebeke suyu kullanılmıştır. Analiz verileri yapılmış suyun köpük beton bünyesinde kullanılabilirliği incelenmiştir. Köpük solüsyonu elde etmek için hazırlanan deneme karışımlarında köpük ajanı ile suyun kütlece %0,5 oranında karıştırılıp köpürtülmesi ile elde edilir. Köpük ajan, organik yapıda olup, siyah renkte ve 1,05kg/lt yoğunluktadır, Agrega yerine Seramik Sağlık Gereçleri atıkları kullanılmıştır. Kullanılan atık seramiklerin kimyasal analiz sonuçları Tablo 1'de yer verilmiştir. Grafik 1'de ise, seramik sağlık gereçleri ürünlerine yapılan XRD analizi ve Faz miktarları sonuçları verilmektedir. XRD analiz sonuçlarına göre tespit edilen fazların, müllit, camsı ve kuvars fazları olduğu görülmektedir. Yine Tablo 2'de de seramik kırıklarının elek analiz sonuçları gösterilmektedir. Elek analizi sonuçlarına göre 75 mikron altı tane boyutunda % 33 yığılma ile birlikte genel dağılımın 100-180 mikron aralığında olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Seramik atıkların kimyasal analizi

Bileşik	SiO_2	$Al2O_3$	Na_2O	MgO	K2O	CaO	TiO2	ZnO	ZrO2	BaO	P2O5	A.Z.
%	69,107	22,202	3,398	0,342	1,057	1,031	0,631	0,110	0,317	0,191	0,009	0,234

Grafik 1. Seramik sağlık gereçleri kırıklarının XRD grafiği ve faz analizi sonuçları.



Tablo 2. Tane boyutu küçültme işlemine tabii tutulan atık ürünlerin % dağılımı.

Elek Açıklığı (mikron)	Ağırlıkça Miktar (%)
300	29,7
180	9,73
106	23,37
75	4,09
75>	33,11

3.2.2 Köpük Betonun Üretimi

Yapılan çalışmada denemelerin yoğunlukları 500 - 800 kg/m3 aralığında olacak şekilde 5 farklı karışım tasarımı hazırlanmıştır. Her bir karışım tasarımı için hedeflenen teorik yoğunluklara göre, karışıma girecek bileşen miktarları hacim yöntemi esas alınarak hesaplanmıştır. Hazırlanan karışımlarda çimento miktarı ve su/katı (s/k) oranı (0,30) sabit tutulmuş, kum/çimento (K/ç) oranı ise 0-0,55 arasında değişmiştir. Üretilen köpük betonlar TS EN 206-1 standardına göre hazırlanmıştır.(TS EN 206-1, 2002). Hazırlanan reçetelerin atık miktarları reçete kodları ile birlikte Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3. Hazırlanan köpük beton reçetelerinin kodları ve atık yüzdeleri.

Reçete Kodları	1A	2A	3A	4A	5A
Atık Miktarı (%)	7	14	21	28	35

Numuneler 100*100*100mm'lik plastik kalıplarda kalıba alınmıştır. Numuneler 36-72 saat arasında kalıpta bekletildi.Kalıptan çıkarılan numuneler oda sıcaklığında doğal seleksiyon ile reaksiyonların tamamlanması için 28 gün boyunca kuruma işlemine tabii tutularak hazır hale getirilmiştir.

3.2.3.Deneysel Uygulamalar

3.2.3.1.Birim Ağırlık Tayini

Küp numuneler kuru halde hassas terazide tartıldıktan sonra bulunan her bir ağırlık değeri numunenin hacmine oranlanarak 1 nolu denklem üzerinden numunelerin birim ağırlık değerlerine ulaşılmıştır. Ardından her bir serinin ortalama birim ağırlık değerleri hesaplanmıştır.

Birim ağırlık (g/cm^3) = W / V (3)

(W: Ağırlık, V: Hacim = 10×10×10 cm = 1000 cm^3)'tür.

3.2.3.2.Basınç Dayanımının Tayini

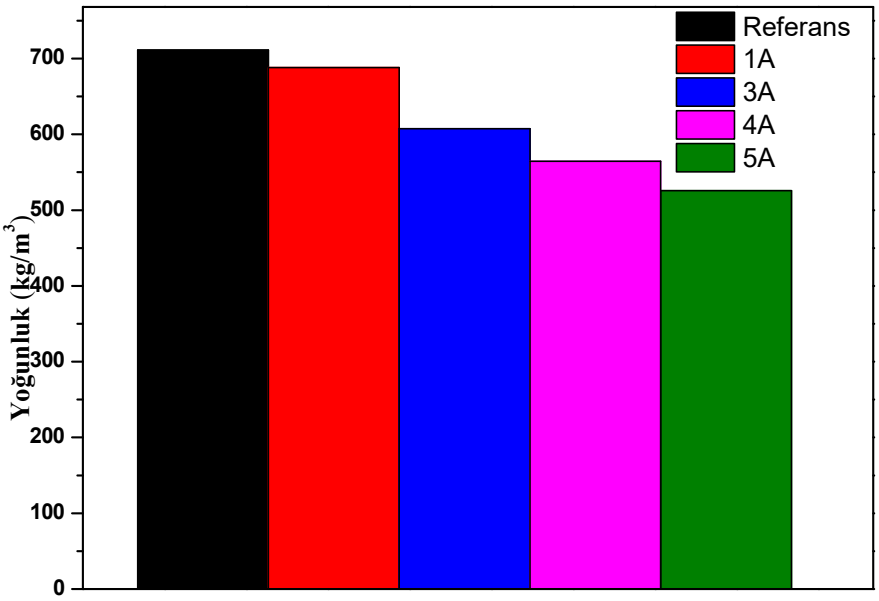
Küp numuneler basınç presine beton döküm yönüne dik olacak şekilde ve düzgün yüzeyler yüke maruz kalacak şekilde yerleştirildiler. Yükleme yüzeyinin düzgün olması önemlidir. Düzgün olmayan yüzeyler aşındırılmalı ya da başlık yapılmalıdır. Numune yüzeylerimiz düzgün olduğu için başlık yapılmaya gerek duyulmamıştır. Numuneler prese yerleştirilirken presi tam ortalayacak şekilde konumlandırılmasına dikkat edildi. Deney presine yerleştirilen numuneler darbe etkisi yapmayacak düzeyde 0,6 MPa/s ($N/mm^2.s$) yükleme hızıyla yüklenerek deneyler yapılmıştır. Basınç dayanımı deneyi TS 3114'e uygun şekilde tamamlanmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

4.1 Yoğunluk Sonuçları

Grafik 2'de referans ve hazırlanan reçetelerin yoğunluk değerleri verilmiştir. Yoğunluk değerleri açısından artan seramik atığı miktarına bağlı olarak yoğunlukların azaldığı görülmüştür.

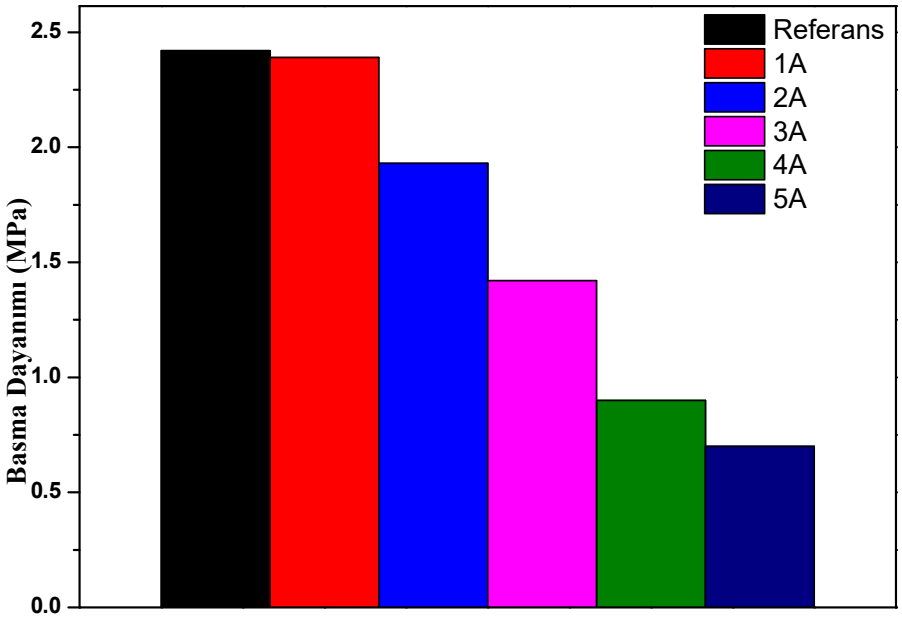
Grafik 2. Referans ve deneme köpük betonlara ait yoğunluk değerlerinin grafik gösterimi.



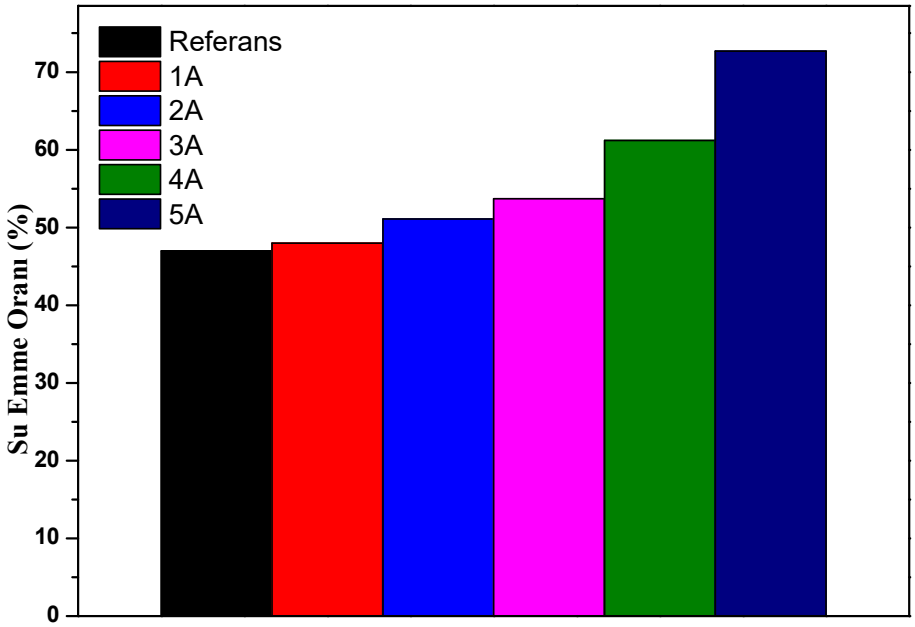
4.2 Basınç Dayanımı ve Su Emme Sonuçları

Üretimi yapılan numunelere 28 gün bekletildikten sonra basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Küp numune üzerinde TS EN 12390-3 standardına uygun olarak basınç dayanım testleri yapılmıştır. Grafik 3'de verilen basma sonuçlarına göre artan atık miktarı ile basınç değerlerinin azaldığı ancak 1A reçetesinin referansa çok yakın olduğu görülmektedir. Yine Grafik 4 incelendiğinde artan atık miktarı ile birlikte su emme değerlerinin arttığı görülmüştür. Hem basınç dayanımı hem de su emme sonuçlarına göre, çimento yerine girilen atık seramik kırığı ile birlikte boşlukların artış gösterdiği düşünülmüştür.

Grafik 3. Basma dayanımı sonuçlarının grafiksel gösterimi.



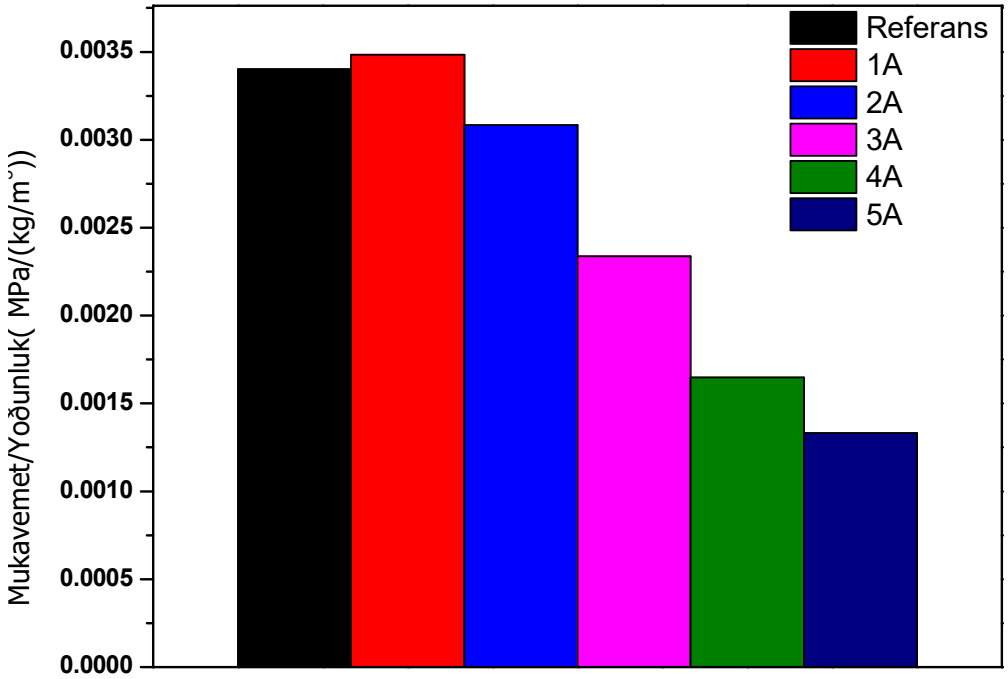
Grafik 4. Su emme değerlerinin grafiksel gösterimi.



4.3 Mukavemet /Yoğunluk Oranları

Üretilen köpük betonların yoğunluklarının hafif olması ve mukavemetlerinin yüksek olması istenir. Mukavemet/Yoğunluk köpük betonda önemli bir parametredir. Grafik 5 incelendiğinde, 1A kodlu denemenin sonuçlarının referans ve diğer denemelerden yüksek olduğu görülmüştür. Başlangıç da çimento yerine girilen seramik atık hem yoğunluğu azaltmakta hem de içerdiği müllit fazı ile dayanımı arttırmıştır. Ancak artan seramik atığı ile birlikte boşlukların artmasına bağlı olarak mukavemetin azalmaya başladığı öngörülmüştür.

Grafik 5. Mukavemet/Yoğunluk sonuçlarının grafiksel gösterimi.

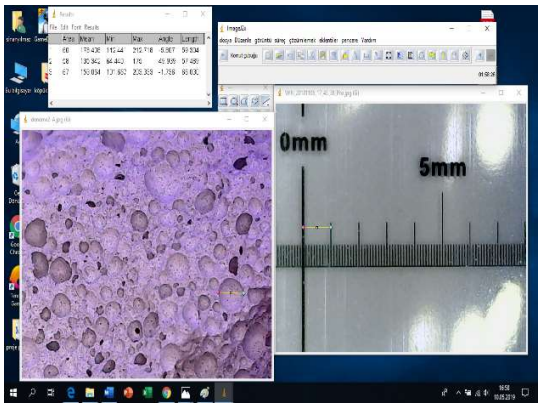


4.4 Tane Morfolojisi ve Tane Boyutu Analizi

Üretilen köpük betonların optik mikroskop ile tane boyutu dağılımları incelenmiştir. Artan seramik atık içeriği ile birlikte yapı içerisindeki gözeneklerin de arttığı görülmüştür. Şekil 1'de verilen mikroskop sonuçlarına göre, başlangıçda çimento yerine ilave olunan seramik atığının boşlukları fazla arttırmadığı ancak artan seramik atık miktarı ile gözenekliliğinde arttığı görülmüştür. Bu durum 1A kodlu denemenin yoğunluklarının refernsa yakın olmasına karşılık daha mukavemetli olmasını ve diğer seramik atık artışı yapılan denemelerde mukavemetin neden düştüğünü de açıklamıştır. Bu çalışmada 500- 800 kg/m3 kuru yoğunluk aralığında 5 farklı döküm yapılmıştır. Üretilen köpük betonların içerisine artan miktarlarda atık ilaveleri ile fiziksel özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Köpük betonda çimento yerine girilen atık ürün miktarı %7 'e kadar referans numunesi ile aynı basınç standartları içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Daha fazla atık girilmesi durumunda dayanımda düşüşler meydana gelmiştir. Puzolonik malzemelerin betonun basınç dayanımına etkisinin incelendiği araştırmada beton içerisinde çimento miktarının azaltılması için, puzolonik malzemelerle mümkün olacağını ifade etmiştir. Puzolonik malzeme; kendi başına bağlayıcılık değeri çok az olan veya hiç olmayan, ancak ince öğütülmüş formda ve nemin mevcudiyetinde normal sıcaklıklarda kalsiyum hidroksit ile kimyasal olarak reaksiyona girerek bağlayıcı özelliklere sahip bileşikler oluşturan silisli veya silisli ve alüminli bir malzemedir. Çalışmada çimento yerine %10, %15, %20 ve % 25 oranlarında puzolonik malzeme ilaveleri ile betonların basınç testleri yapılmış ve basınç dayanım değerlerinde önemli bir düşüş olmadığı kaydedilmiştir. (ŞİMŞEK,2010). Bu çalışmada da köpük beton bünyesine atık seramik girilmesi ile bünye hafifleşmiştir ve % 7 oranında çimento yerine seramik atığı kullanıldığında referans ile benzer basınç dayanımlarını verdiği görülmüştür. Seramik atık malzemelerin de puzolanlar gibi ısıl işlem sonucunda sertleştirilmiş ürünler olması sebebiyle ve sinterlenmiş seramik ürünlerde yüksek sıcaklıklarda kararlı faz olan müllit fazının varlığını basınç dayanımına katkı sağladığı düşünülmüştür. Yine ŞİMŞEK'in aynı çalışmasında artan puzolonik malzeme içeriği ile de hava miktarının ters orantılı olarak değiştiği ifade edilmiştir. Bu çalışmada da artan seramik atığı içeriğine bağlı olarak yoğunlukların azaldığı ve köpük betonda hava kabarcıklarında artış olduğu görülmüştür. Atık ürün kullanılmasından dolayı üretilen köpük beton hem çevre dostu hem de ekonomik bir ürün haline gelmiştir.



Şekil 1. Hazırlanan köpük beton numunelerin optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 1. Image j2x tane boyut analizi sonuçları.

Şekil 2'de köpük betonların optik mikroskoptan alınan görüntüleri ımage j2x programı kullanılarak tane boyutu analizi yapılmıştır. Yapılan tane boyutu analizi sonucunda üretilen köpük betonların tane boyutu 50-150µm aralığında olduğu saptanmıştır. Referans numunesi üzerinde yapılan incelemeler sonucu tane boyutunun 100-150µm olduğu saptanmıştır.

5. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada 500- 800 kg/m3 kuru yoğunluk aralığında 5 farklı döküm yapılmıştır. Üretilen köpük betonların içerisine artan miktarlarda atık ilaveleri ile fiziksel özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Köpük betonda çimento yerine girilen atık ürün miktarı %7 'e kadar referans numunesi ile aynı basınç standartları içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Daha fazla atık girilmesi durumunda dayanımda düşüşler meydana gelmiştir. Artan seramik atığı içeriğine bağlı olarak yoğunlukların azaldığı ve köpük betonda hava kabarcıklarında artış olduğu görülmüştür. Böylelikle %7'nin üzerinde atık ürün kullanılmasının mukavemeti olumsuz olarak etkilediği görülmüştür. Seramik atık ile üretilen köpük betonların hem çevre dostu hem de ekonomik bir ürün haline getirilebileceği ispat edilmiştir.

Referanslar

Alkaya, Ş. (2010). Hafif beton üretiminde organik atıkların kullanılabilme olanakları (1-3). Tekirdağ

Gündüz, Ş. (2007 Şubat). Polistren agregalı hafif beton üzerine deneysel bir çalışma, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Ankara.

Gökçe,H.S., Şimşek,O.(2013).Ingimbrite powder and some other puzzolanas additions to avoid concrete expansion caused by the alkali-silica reaction,Cement Wapno Beton, cilt 18, sayı 2, sayfa 100-105.

İhtiyaroğlu, E. (1976). Tabii hafif agregalar ile imal edilen hafif beton blokların duvar elemanı olarak özelliklerinin tayini üzerine araştırma, İmar ve İskan Bakanlığı Yayınları,5.

Konuk, H. (2003, Ocak). Hafif agregalı betonların mekanik özellikleri ve ısı yalıtımı (1). İstanbul.

Koru, M. (2017). Köpük betonun yoğunluk ve sıcaklığa bağlı ısıl iletkenlik katsayısının ısı akış ölçer yöntemiyle belirlenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21(2),614-622.

Newman, J.,Owens, P. (2003).Properties of lightweight concrete, Advanced Concrete Technology,(s.2/7). Great Britain:Butterworth-Heinemann Elsevier.

Taşdemir, C. (2002) Gaz betonun fiziksel ve mekaniksel özellikleri üzerine bir değerlendirme. TMMOB Mimarlar Odası 1.Ulusal Yapı Malzemeleri Kongresi ve Sergisi,2,s.425-437. İstanbul.

Ramamurthy,K., Nambiar, E.K., Ranjani, G.S. (2009). Cement and Concrete Composites. Elsevier Ltd.

MÜHENDİSLİK MİMARLIK FAKÜLTESİ

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

UMAGD, (2023) 15(2), 654-664.

10.29137/umagd.1244697

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Farklı Akseleratör Grupları için EPDM Karışımlarının Reolojik, Mekanik ve Isıl Yaşlandırma Değerlerinin İncelenmesi

Investigating Rheological, Mechanical and Heat Aging Effects of Different Accelerator Systems at EPDM Compounds

Ezgi Erbek Cömez [1*], Selda Öztürk [2]

[1]*Haksan Otomotiv Mamülleri San. Ve Tic. A.Ş., 16140 ve Bursa, TÜRKİYE*
[2]*Haksan Otomotiv Mamülleri San. Ve Tic. A.Ş., 16140 ve Bursa, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 31/01/2023* ***Kabul / Accepted**: 02/06/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Öz

Kauçuk yapısal olarak yapışkanlık içeren bir maddedir ancak vulkanizasyon prosesi ile yapışkanlık azaltılıp, kuvvetli mekanik değerlere sahip olmaktadır. Vulkanizasyon prosesi için kükürt vulkanizasyonu en çok tercih edilen metottur. Kükürt vulkanizasyonunda kükürt yalnız kullanılmayıp hızlandırıcıların yardımıyla vulkanizasyon sağlanmaktadır. Hızlandırıcılar kendi içlerinde kimyasal yapılarına göre thiazole, sülfenamide, dithiocarbamate ve thiuram gibi gruplara ayrılmaktadırlar. Çalışmada MBTS, TBBS, ZBEC, TMTM içeren bir EPDM karışımı oluşturulmuş, karışım içerisindeki her gruba ait farklı kimyasal yapılara sahip thiazole grubu için MBT, sülfenamide grubu için CBS, dithiocarbamate grubu için ZDBC ve thiuram grubu için TMTD ve TBZTD içeren 5 ayrı karışım daha yapılmıştır. Karışımların reolojik, mekanik ve ısıl yaşlandırma sonuçları incelenmiştir. Reolojik verilerde CBS kullanılan karışımların daha erken vulkanize olup, akış değerlerinin viskozite değerleri ile paralel çıktığı görülmüştür. Hızlandırıcı değişimleriyle sertliğin arttıkça kopma mukavemetinin de arttığı ancak uzama değerinin düştüğü görülmüştür. Thiuram değişimleri ile en yüksek sertlik ve kopma değeri, en düşük uzama değeri görülmüştür. Çaprazbağ yoğunluğu yüksek olan grupların düşük kalıcı deformasyon sergilediği görülmüştür. Yaşlandırmalar 100°C ve 150°C'de yapılmış her grup içinde sıcaklık yükseldikçe değişimler de artmıştır. En düşük yüksek sıcaklık dayanımı TBZTD'de bulunmuştur. Hızlandırıcı gruplarındaki değişiklik yırtılma sonuçlarında önemli etki yaratmamıştır.

Anahtar Kelimeler

"Hızlandırıcı, EPDM, Vulkanizasyon, Kauçuk"

Abstract

Rubber is a structurally stickiness material but with the vulcanization process, the stickiness is reduced and it become has strong mechanical values. Sulfur vulcanization is the most preferred method for the vulcanization process. In sulfur vulcanization, sulfur is not used alone, the vulcanization is provided with accelerators. Accelerators are divided into groups such as thiazole, sulfenamide, dithiocarbamate and thiuram according to their chemical structures. In the study, EPDM compound containing MBTS, TBBS, ZBEC, TMTM was formed, and 5 different compounds containing MBT for thiazole group, CBS for sulfenamide group, ZDBC for dithiocarbamate group and TMTD and TBZTD for thiuram group with different chemical structures belonging to each group in the compound were made. The rheological, mechanical and thermal aging results of the mixtures were investigated. In the rheological data, it was observed that the mixtures using CBS cured earlier and the flow values were parallel to the viscosity values. It was observed that as the hardness and tensile strength increased with the accelerator changes,, but the elongation value decreased. With Thiuram changes, the highest hardness and breaking value and the lowest elongation value were observed. It was observed that the groups with high crosslink density exhibited low compression deformation. Ages were made at 100°C and 150°C, and the changes increased as the temperature increased in each group. The lowest high temperature resistance was found in TBZTD. The change in the accelerator groups did not have a significant effect on the tearing results.

Key Words

"Accelerator, EPDM, Vulcanisation, Rubber"

***Sorumlu Yazar: ezgi.erbek@haksanotomotiv.com**

1. Giriş

Kauçuk, bazı tropik bitkilerin sütümsü özsuyundan (lateks) doğal halde ya da petrol ve alkolün bileşimlerinden suni olarak elde edilen bir malzemedir. Kauçuk terimi normalde Hevea Brasiliensis ağacından elde edilen malzemeye karşılık gelmekte olup, günümüzde bu terim uygulanan kuvvetin serbest bırakılmasıyla tekrar eski konumuna geri dönebilen malzemeler olarak adlandırılmaktadır (Vahapoğlu, 2007). Kauçuğun yapısındaki yapışkanlık ve dış etmenlere karşı dayanıksızlık sebebiyle 1839 yılında Charles Goodyear geniş bir sıcaklık aralığında özelliklerini koruyabilen ve kauçuğu elastik bir malzeme haline getiren vulkanizasyonu keşfetmiştir (Kalle vd, (2007). Vulkanizasyon prosesi; kauçuk parçaların kuvvetli mekanik özelliklere ve yüksek performansa sahip olması için önemli bir proses adımıdır (Kordayıoğlu, 2018). Vulkanizasyon sonrası değişen mekanik özellikler yapıda oluşan çapraz bağların yoğunluğu ve çapraz bağların uzunluğu ile ilgilidir. Kükürt ile çapraz bağlanma en eski fakat hala en fazla kullanılan vulkanizasyon çeşididir. Ancak kauçuk vulkanizasyonunda kükürt yalnız kullanılmaz. Aktivatörler ve kükürt-hızlandırıcı kombinasyonu ile çapraz bağlanma gerçekleştirilir. Aktivatörler ve hızlandırıcılar kükürt vulkanizasyonunda kürlenme kinetik parametrelerini, optimum çapraz bağlanma için gerekli kükürt miktarını ve proses güvenliğini etkiler (Başdemir, 2022).
Vulkanizasyonda hızlandırıcıların temel görevi karışım içerisindeki serbest kükürdü polimer zincirine taşımak ve polimer zinciri ile kükürdün reaksiyonunu tetiklemektedir. Böylece vulkanizasyon hızı artarak, vulkanizasyon süresi önemli ölçüde azalmaktadır (Kılıç, 2018). Hızlandırıcı sistemleri ve etkileri kauçuğun türüne göre belirlenmektedir. Kükürt ile vulkanize olup, hızlandırıcı sistemlerin kullanıldığı bir kauçuk türü de EPDM (Etilen Propilen Dien Monomer) dir. EPDM, etilen ve propilenin yanı sıra bir dienin reaksiyona katılması ile meydana gelmektedir. Dienin reaksiyona katılması ile zincirde çift bağ yani doymamışlık oluşmaktadır (Öztürk, 2008). EPDM kauçuk türünde birçok hızlandırıcı grubu vulkanizasyonun optimum şekilde yapılması için kullanılmaktadır. Thiazole hızlandırıcılar, sülfenamide hızlandırıcılar, dithiocarbamate hızlandırıcılar ve thiuram hızlandırıcılar başlıca hızlandırıcılardır. Thiazole hızlandırıcılara MBT (2-mercaptobenzothiazole) ve MBTS (2,2-Dithiobis(benzothiazole)), sülfenamide hızlandırıcılara TBBS (N-tert-Butylbenzothiazole-2-sulphenamide) ve CBS (N-Cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide), dithiocarbamate hızlandırıcılara ZBEC (Zinc bis(dibenzyldithiocarbamate)) ve ZDBC (Zinc bis(dibutyldithiocarbamate)), thiuram hızlandırıcılara TMTM (Tetramethylthiuram monosulfide), TMTD (tetramethyl thiuram disulfide) ve TBZTD (tetrabenzyl thiuram disulfide) verilebilir. Kimyasal tanımlamaları için hızlandırıcılar sınıflandırılmıştır. Birincil hızlandırıcı grubunda yer alan sülfenamid ve thiazoleler, İkincil hızlandırıcılar ise thiuram ve dithiocarbamatlardır (Koç ve Yüken, 2019). Vulkanizasyon hızlarına göre de hızlandırıcılar gruplanmıştır. Birincil hızlandırıcılar genellikle kayda değer bir scorch gecikmesi, hızlı vulkanizasyon ve iyi modül geliştirme etkisi verirler. İkincil hızlandırıcılar ise genellikle çok hızlı ya da çok yavaş vulkanizayona neden olurlar (Yıldırım, 2019).
Literatürde farklı tür kauçukların vulkanizasyonuna hızlandırıcıların etkisi araştırmalarına rastlanmaktadır. Ghosh ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada PE ve EPDM karışımları iki farklı kükürt hızlandırıcı sistemi kullanılarak vulkanize edilmiştir. A reçetesinde TMTD, MBTS ve kükürt kullanılırken (geleneksel), B reçetesinde TMTD, Si69 (silan iyileştirme sistemi) ve kükürt kullanılmıştır. Her iki sistem için reometrik ve morfolojik çalışmalar dinamik kürleme koşulları altında eş ve sürekli faz morfolojisinin geliştirdiğini göstermiştir. Geleneksel sistem ile vulkanizasyonda biraz daha yüksek stabilite kazanıldığı ve dinamik kürlenme altında termal olarak daha kararlı olduğu görülmüştür. Her iki sistem için de ömür testleri yapılarak malzemenin 70°C altında ömrünün 10-15 sene olduğu bulunmuştur (Ghosh vd, 1996).
Bir başka çalışmada Sae-oui ve arkadaşları EPDM/NR karışımlarında 3 farklı tür hızlandırıcı grubunun (TBBS, TMTD, MBT ve MBTS) karışımlar üzerinde karışımın işlene bilirliği ve mekanik etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmada sadece kür özelliklerinin etkilenmediği aynı zamanda mekanik değerlerin de etkilendiği görülmüştür. TBBS NR/EPDM karışımlarında yüksek kürlenme durumuyla en güvenilir aralıkta hızlandırıcı olarak bulunmuştur. Ayrıca TBBS yüksek mekanik özelliklere yol açmıştır. TMTD yüksek bir kürlenme durumu verebilmesine rağmen, ciddi kür uyumsuzluğuna neden olarak zayıf gerilme mukavemetine yol açmıştır. İki merkapto hızlandırıcı sisteminden edilen vulkanizatlar düşük modül ve sertliğin yanı sıra elastikiyet derecesine de sahip çıkmıştır (Sae-Oui vd, 2007).
Diğer bir çalışmada Zhao ve arkadaşları farklı oranlardaki EPDM/SBR karışımlarının vulkanizasyon ve mekanik özelliklerine hızlandırıcıların etkisini araştırmışlardır. Hızlandırıcı sistemleri ile peroksit vulkanizasyonu karşılaştırılmış gerek yüksek sıcaklıkta yaşlandırma gerekse kalıcı deformasyon davranışlarının sülfenamid bazlı hızlandırıcılarının peroksit kürlenme sistemiyle karşılaştırılabilir olduğu görülmüştür (Zhao vd, 2001).
Mayasari ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 60/40 EPDM /NR karışımları MBTS, TMTD ve TBBS hızlandırıcılarıyla kürlenmiş, reolojik, mekanik ve morfolojik özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışma sonrası tek veya ikili hızlandırıcı sisteminde kullanılan MBTS, iyi mekanik özellikler sağlamıştır. TBBS en uzun kavrulma süresini, en düşük çapraz bağ yoğunluğunu ve zayıf mekanik özellikler (yırtılma mukavemeti dışında) vermiştir. İkili hızlandırıcı, MBTS/TMTD, en düşük işlem süresini ve en yüksek mekanik değerleri sağlamıştır. Belirlenen bu sonuçlar SEM ile örtüşmektedir. Çalışmadan, EPDM/NR harmanı için ikili hızlandırıcı sistemin uygun hızlandırıcı olduğu sonucu çıkarılmıştır (Mayasari, 2019).
Literatür incelendiğinde sadece hızlandırıcı türlerinin birbirleriyle veya kombinasyonuyla karşılaştırılması çalışmaları görülmektedir. Aynı grup hızlandırıcıların hem birbirleriyle hem de diğer gruplarla karşılaştırıldığı bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu çalışmada tüm hızlandırıcı gruplarını barındıran ana karışım ile, bu karışım içerisindeki farklı tür hızlandırıcıların aynı grupta olup kimyasal yapısı farklı olan hızlandırıcılar ile karşılaştırması yapılmıştır. Bulunan bu sonuçlar ile hem aynı grup içindeki hızlandırıcılar ile karşılaştırılmış hem de diğer gruplarla karşılaştırma yapılmıştır. Bu şekilde farklı koşullarda en optimum kombinasyonun bulunması hedeflenmiştir.

2. Materyal ve Metod

2.1 Hammaddeler

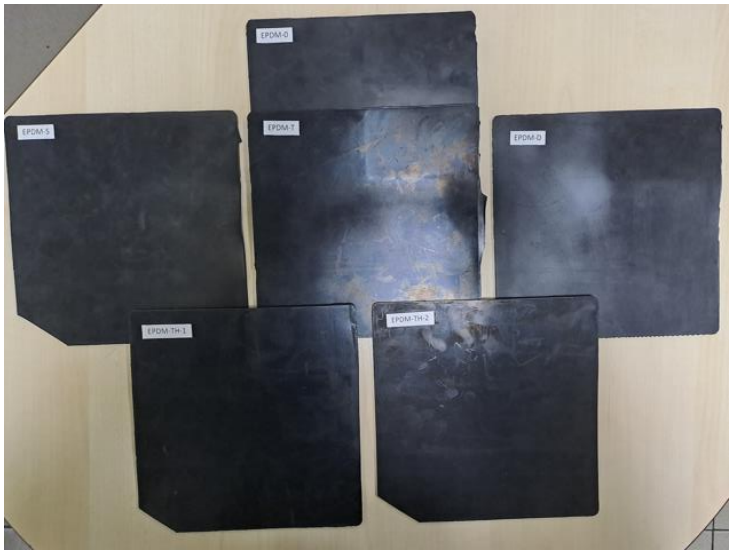
Bu çalışmada polimer olarak Arlanxeo firmasından tedarik edilen 15 phr (Per Hundred Rubber) yağlı grubundan Keltan 6471 kodlu kauçuk kullanıldı. Dolgu malzemesi olarak Fef N-550 karbon siyahı kullanıldı. Karbon siyahı Orion firmasından tedarik edildi. Aktivatör grubundan aktif çinko Melos firmasından, stearin Werba Chemical firmasından, Peg 4000 Polivin firmasından alındı. Karışımın akış özelliklerini iyileştirebilmek için kaydırıcı grubundan Werbalub ZP Werba Chemical ve olefin grubundan Finawax-O üçgen pigmentler firmasından alındı. Yağlayıcı olarak Petrol Ofisi firmasından tedarik edilen 46 viskoziteli parafinik yağ kullanıldı. Tüm karışım reçeteleri kükürt vulkanizasyon sistemine göre vulkanize edildi. Reçetelerde kullanılan kükürt (S-80) Univar firmasından tedarik edildi. Vulkanizasyona etkilerini incelemek için kullanılan hızlandırıcılardan thiazole gruplarından MBT, MBTS, sülfenamide gruplarından TBBS, CBS, Dithiocarbamate gruplarından ZBEC, ZDBC, thiuram gruplarından TMTM, TMTD ve TBZTD hammaddeleri Univar firmasından tedarik edildi. Reçete içerisindeki tüm bileşenler phr cinsinden hesaplanarak karışımlar oluşturuldu. Deneme reçetelerinde karşılaştırma için baz alınan reçeteye EPDM-O, thiazole değişim reçetesine EPDM-T, sülfenamide değişim reçetesinde EPDM-S, dithiocarbamate değişim reçetesine EPDM-D ve thiuram değişimleri için yapılan iki reçeteye EPDM-TH1 ve EPDM-TH2 olarak isim verildi.

2.2 Karışımın Hazırlanması

Bu çalışmada tüm karışımlar aynı proses parametrelerinde yapıldı. Karışımlar 3L laboratuvar tipi banbury ve mil (Werner Pfeidener-Almanya) makinelerinde yapıldı. Banbury'e ilk önce EPDM kauçuğu atıldı. Kauçuğun parçalanması için 15 sn karışıma devam edildi. Ardından karbon siyahı, aktif çinko, stearin, peg 4000, werbalub ZP ve finawax-O eklendi ve en üst kısma parafinik yağ ilavesi yapılarak banbury karışıma bırakıldı. 6 dk boyunca 50 rpm hızda tüm bileşenler karıştırıldı. Karışımın sıcaklığı 125°C olduğunda banburyden karışım alınarak ikili millerde hem ilk sıcağının atılması sağlandı hem de deneme reçetelerinin hızlandırıcı grupları ve S-80 ilavesi yapıldı. Bu şekilde 5 dk boyunca tüm kimyasalların oluşan karışıma homojen bir şekilde dağılımı sağlandı. Tüm karışımlar ISO 2393 normuna göre hazırlandı. Nihai hamur karışımlarından testlerin yapılabilmesi için kompresyon üretim metodu ile 2 ve 6 mm kalınlığında test plakaları 170°C 15 dk vulkanizasyon parametrelerinde Şekil 1'de belirtilen kompresyon preste üretildi. Şekil 2'de ise üretilen karışımlara ait test plakalarının görselleri yer almaktadır.



Şekil 1. Kompresyon Kauçuk Pres



Şekil 2. Karışım Test Plakaları

Karışım reçetelerinden kullanımı aynı olan baz hammaddeler Tablo 1'de, karşılaştırması yapılan hızlandırıcı grupları Tablo 2'de belirtilmiştir.

Tablo 1. Baz Karışım Reçeteleri

İçindekiler	EPDM-0 (phr)	EPDM-T (phr)	EPDM-S (phr)	EPDM-D (phr)	EPDM-TH-1 (phr)	EPDM-TH-2 (phr)
Keltan 6471	115	115	115	115	115	115
Fef N-550	200	200	200	200	200	200
Aktif Çinko	3	3	3	3	3	3
Stearin	1	1	1	1	1	1
Peg 4000	5	5	5	5	5	5
Werbalub ZP	2	2	2	2	2	2
Finawax-O	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Parafinik Yağ	120	120	120	120	120	120
S-80	1	1	1	1	1	1

Tablo 2. Karışımların Hızlandırıcı Grupları

İçindekiler	EPDM-0 (phr)	EPDM-T (phr)	EPDM-S (phr)	EPDM-D (phr)	EPDM-TH-1 (phr)	EPDM-TH-2 (phr)
MBTS	1,5	0	1,5	1,5	1,5	1,5
MBT	0	1,5	0	0	0	0
TBBS	1,5	1,5	0	1,5	1,5	1,5
CBS	0	0	1,5	0	0	0
ZBEC	1,5	1,5	1,5	0	1,5	1,5
ZDBC	0	0	0	1,5	0	0
TMTM	1,5	1,5	1,5	1,5	0	0
TMTD	0	0	0	0	1,5	0
TBZTD	0	0	0	0	0	1,5

2.3 Reolojik ve Mekanik Özellikler

Tüm karışımlar için reolojik özellikler Alpha MDR 2000 (USA) test cihazında 190°C 3dk parametrelerinde yapılarak vulkanizasyon yapıları incelendi. Viskozite değerleri Ektron (Malezya) Mooney Viskozimetre cihazında 100°C de (1+4) kriterlerinde yapıldı.

Mekanik ölçümler için karışım numuneleri DIN ISO 23529'a göre hazırlandı. Mekanik testlerden sertlik testi ISO 48-4'e göre yapıldı. Sertlik testi için Zwick Roell (Almanya) Shoremetre cihazı kullanıldı. Kopma mukavemeti, kopma anındaki uzama testleri DIN 53504 standardına göre S2 dambıl numunesinden, yırtılma testi ASTM D624 standardına göre Tip-C numunesinden Zwick Roell Z010 cihazında yapıldı. Kalıcı deformasyon testleri 100°C ve 70h boyunca ISO 815-1 şartnamesine göre Tip-B numune boyutlarında metot-A'ya göre yapıldı. Havada yaşlandırma testleri için Memmert (Almanya) havalandırmalı etüvler kullanılarak test DIN 53508 standardına göre yapıldı. Havada yaşlandırma testleri 100°C ve 150°C olarak iki ayrı sıcaklıkta ve 70h olarak yapıldı. Çapraz bağ yoğunluğu (CLD) için EPDM ile en uyumlu çözücü olan toluen kullanılarak ASTM D6814 standardına göre testler yapıldı.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Reolojik ve Akış Özellikleri

Karışımların vulkanizasyon verileri reometre test cihazından elde edilmiştir. Tablo 3'de karşılaştırma için baz alınan EPDM-O karışımının, Tablo 4'de EPDM-T, EPDM-S, EPDM-D, EPDM-TH-1 ve EPDM-TH-2 karışımlarının reolojik verileri yer almaktadır.

Tablo 3. EPDM-O Karışımının Reolojik Verileri

Reometre Kriterleri	EPDM-O
ML(Ib-Iın)	0,90
MH (Ib-ın)	7,07
Ts2 (mm:ss)	00:42
T90 (mm:ss)	01:25

Tablo 4. EPDM-T, EPDM-S, EPDM-D, EPDM-TH-1 ve EPDM-TH-2 Karışımlarının Reolojik Verileri

Reometre Kriterleri	EPDM-T	EPDM-S	EPDM-D	EPDM-TH-1	EPDM-TH-2
ML (Ib-ın)	0,91	1,02	0,95	1,03	1,06
MH (Ib-ın)	8,05	6,91	6,73	8,17	8,26
Ts2 (mm:ss)	00:41	00:38	00:42	00:41	00:37
T90 (mm:ss)	01:20	01:10	01:20	01:21	01:20

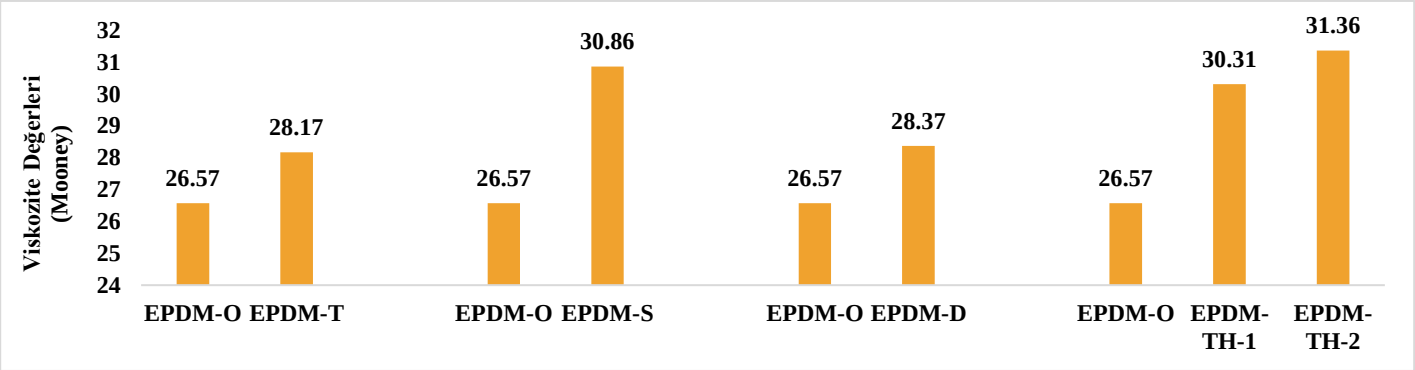
Her hızlandırıcı grubu EPDM-O reçete ile karşılaştırılmıştır. EPDM-T ile EPDM-O reolojik verileri karşılaştırıldığında ML (minimum tork) değerleri arasında farklılık görülmemektedir. MH (maksimum tork) değerlerimde EPDM-T karışımında biraz yükselme yaşanmıştır. Vulkanizasyon zamanlarında Ts2 (vulkanizasyona başlama süresi) ve T90 (vulkanizasyonun %90'ının gerçekleştiği süre) sürelerinde gerileme görülmektedir. Bu da MBTS'ye nazaran MBT kullanılan karışımlarda daha erken vulkanizasyonun başlaması anlamına gelmektedir.

EPDM-S ile EPDM-O karşılaştırıldığında EPDM-S karışımının ML değeri daha yüksek çıkmıştır. Bununla beraber MH değerinde ise ufak bir azalma görülmektedir. Vulkanizasyon sürelerine bakıldığında ise hem Ts2 hem de T90 değerlerinde geriye çekilme yani erken vulkanizasyon fark edilmektedir. Bu verilerden de CBS kullanılan karışımların TBBS kullanılan karışımlardan daha erken vulkanize olması çıkarılabilmektedir. Kzysztof ve arkadaşları yaptığı çalışmada CBS ve TBBS'i ayrı ayrı kükürt ile 2:1 oranında karışıma katmış ve reolojik sonuçlarını incelemiştir. Yaptıkları çalışma sonrasında CBS hızlandırıcısının TBBS karşısında daha erken vulkanizasyona başladığını bulmuşlardır (Formela vd., 2015).

EPDM-D ile EPDM-O karşılaştırıldığında EPDM-D karışımında MH değerinde radikal bir farklılık görülmezken MH değerinde EPDM-S karışımındaki gibi bir azalma yaşanmıştır. Vulkanizasyon süreleri ise Ts2 değeri değişmezken T90 değerinde ufak bir gerileme vardır. Bu verilerden ZBEC ve ZDBC hızlandırıcılarının vulkanizasyona başlama süresinde farklılıklar yaratmadığı ancak tamamlanma süresinde ZDBC hızlandırıcısının daha etkin olduğu sonucu çıkarılabilmektedir.

EPDM-TH-1 ve EPDM-TH-2 karışımları ML, MH ve T90 kriterleri için benzer değerler vermiştir. EPDM-TH-2 karışımının EPDM-TH-1 karışımına kıyasla TS2 süresi gerilemiştir. Bu da daha erken vulkanizasyona başlandığını gösterebilir. EPDM-O ile karşılaştırıldığında ise ML ve MH değerlerinde artış T90 değerinde gerileme görülmektedir. Elde edilen verilerden üç hızlandırıcı grubu karşılaştırıldığında vulkanizasyona etkileri TBZTD, TMTD ve TMTM olarak sıralanabilmektedir.

Karışımların viskozite değerleri de incelenmiştir. Şekil 3'de tüm karışımlara ait viskozite değerleri bulunmaktadır.



Şekil 3. Karışımların Viskozite Değerleri

Viskozite değerleri incelendiğinde reometre verilerine paralel sonuçlar ile karşılaşılmıştır. ML değeri testin yapıldığı sıcaklıktaki minimum viskozitedir. Çapraz bağlanmanın başladığı noktadır (Saraç, 2013). Bu sebeple reometre sonucunda elde edilen ML değerleri ile viskozite sonuçlarının orantılı ve birbirini destekleyici şekilde çıkması beklenen bir durumdur.

3.2. Mekanik Özellikler

3.2.1. Sertlik, kopma mukavemeti ve uzama değerleri

Kauçuk malzemelerde sertlik malzemeye belirli bir yükle basılması sonucu oluşan girintinin derinliğinin ifadesidir. Karışımların sertlikleri incelendiğinde EPDM-O karışımında en düşük sertlik değerine rastlanmıştır. En yüksek sertlik değerleri thiuram değişimleri sonucunda elde edilmiştir. En yüksek sertlik değeri EPDM-TH-2 karışımda bulunmuştur. Samarasinghe ve arkadaşlarının yaptığı DIXP, TBZTD, ZBEC ve TBBS karşılaştırmasında TBZTD karışımının yüksek sertlik değeri verdiği görüşmüştür (Samarasinghe vd, 2021).

Kopma mukavemeti belirli bir güç altında birim alandaki maksimum kuvveti; uzama, kopma noktasındaki malzemenin yüzde uzama değerini vermektedir. Kopma mukavemeti değeri en yüksek karışım yine EPDM-TH-2 ardından EPDM-TH-1 olarak bulunmuştur. Markoviç ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada NR/CSM karışımlarında MBT, TMTD ve CBS mekanik karşılaştırmasında TMTD ile yapılan karışımların daha yüksek kopma mukavemeti değerine sahip olduğu bulunmuştur (Markovic vd, 2009). Bu sonuç EPDM-TH-1 karışımının EPDM-T ve EPDM-S karışımlarından yüksek kopma mukavemetine ve aynı zamanda thiuram çeşidi değişimi yapılan EPDM-O karışımından da yüksek kopma mukavemeti değerine sahip olmasını desteklemektedir.

Buna karşın en düşük uzama değeri yine bu karışıma aittir. Uzama, kopana kadar esneme üzerine numunenin esnekliği ile ilgilidir. Kopmadaki uzama, vulkanizatların esnekliğini ve sünekliğini gösterir. Çekme mukavemeti arttıkça uzama azalır (Mayasari vd, 2019). Sertlik, kopma mukavemeti ve uzama değerleri baz karışım EPDM-O için Tablo 5'de, hızlandırıcı değişimleri ile oluşan deneme karışımların ise Tablo 6'da belirtilmiştir.

Tablo 5. EPDM-O Karışımın Sertlik, Kopma Mukavemeti ve Uzama Değerleri

Yapılan Test	EPDM-O
Sertlik (Sh-A)	61
Kopma Mukavemeti (Mpa)	8,1
Kopma Anındaki Uzama (%)	460

Tablo 6. Deneme Karışımların Sertlik, Kopma Mukavemeti ve Uzama Değerleri

Yapılan Test	EPDM-T	EPDM-S	EPDM-D	EPDM-TH-1	EPDM-TH-2
Sertlik (Sh-A)	64	63	63	65	66
Kopma Mukavemeti (Mpa)	8,5	8,3	8,3	8,6	8,8
Kopma Anındaki Uzama (%)	428	449	433	422	392

Tüm karışımlar birbirleri ile karşılaştırıldığında sertliğin arttıkça kopma mukavemetinin arttığı buna karşın uzamanın azaldığı görülmektedir. Yüksek sertlik bu grupların yüksek çaprazbağ yoğunluğu sağlama özelliklerinin bir sonucu olarak değerlendirilebilir.

Çaprazbağ sayısı arttıkça üç boyutlu yapıya uygulanan kuvvete karşı direnç artmaktadır. Buna bağlı olarak aynı sebeple yine aynı gruplar yüksek kopma dayanımı değerleri göstermektedir (Öztürk, 2008). Uzama, kauçuk malzemenin elastikiyetini gösteren değerlerden biridir. Oksman ve arkadaşlarının polipropilen malzeme üzerinde yaptığı çalışmada kopma dayanımı artmasıyla uzama değerinin düştüğü görülmesi bu veriyi desteklemektedir (Akçakale, 2008). Thiuram değişimleri ile en yüksek sertlik ve kopma mukavemeti değerleri, en düşük uzama değerleri görülmektedir. Bu da TMTD ve TBZTD hızlandırıcılarının TMTM'ye nazaran karışıma dirilik katıp, elastikliğini azalttığını, MBT, CBS ve ZDBC hızlandırıcılarının TMTD ve TBZTD hızlandırıcıları kadar olmasa da MBTS, TBBS ve ZBEC hızlandırıcılarına nazaran benzer etkiler yarattığını göstermektedir.

3.2.2. Yırtılma dayanımı değerleri

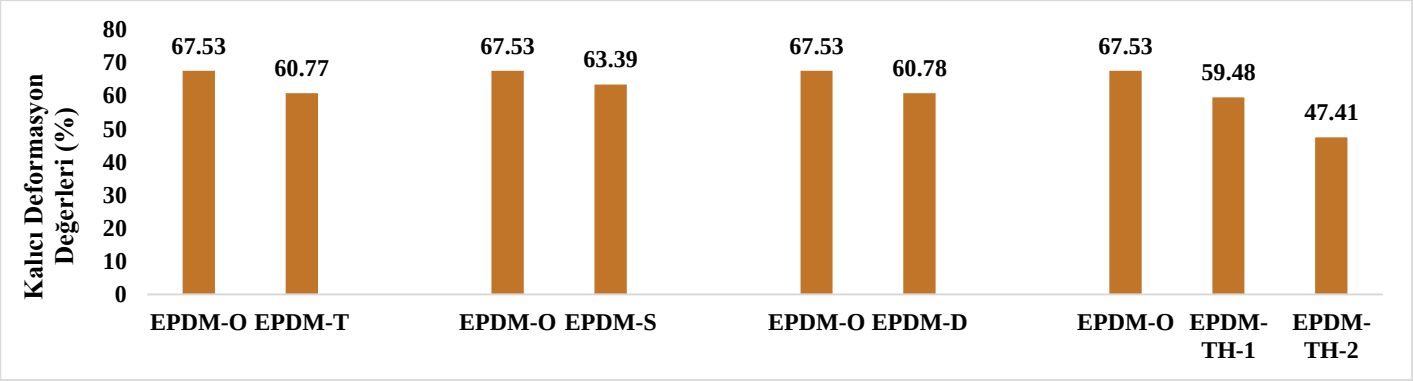
Yırtılma dayanımı ham kauçuğun cinsi ve reçete içerisinde kullanılan dolgu malzemeleriyle doğrudan ilişkilidir. Karışımların içine katılan dolgu malzemeleri ile değişim incelemeleri literatürde bulunmaktadır (Bülbül, 2014). Çalışmada karışımların yırtılma dayanımları incelendiğinde baz alınan EPDM-O karışım değerleri ile hızlandırıcı değişimlerinin yapıldığı karışımların sonuçlarında radikal bir değişim fark edilmemiştir. Bu durum reçeteyi oluşturan kauçukta ve dolgu malzemelerinde değişiklik yapılmadan sadece hızlandırıcı etkisiyle yırtılma değerlerinde önemli ölçüde bir değişim yaratılmadığı sonucunu çıkarabilmektedir. Tablo 7'te tüm karışımlara ait yırtılma değerleri yer almaktadır.

Tablo 7. Karışımların Yırtılma Dayanımları

Yapılan Test	EPDM-O	EPDM-T	EPDM-S	EPDM-D	EPDM-TH-1	EPDM-TH-2
Yırtılma Dayanımı (N/mm)	28	27,4	28,8	27,9	27,4	27

3.2.3. Kalıcı deformasyon değerleri

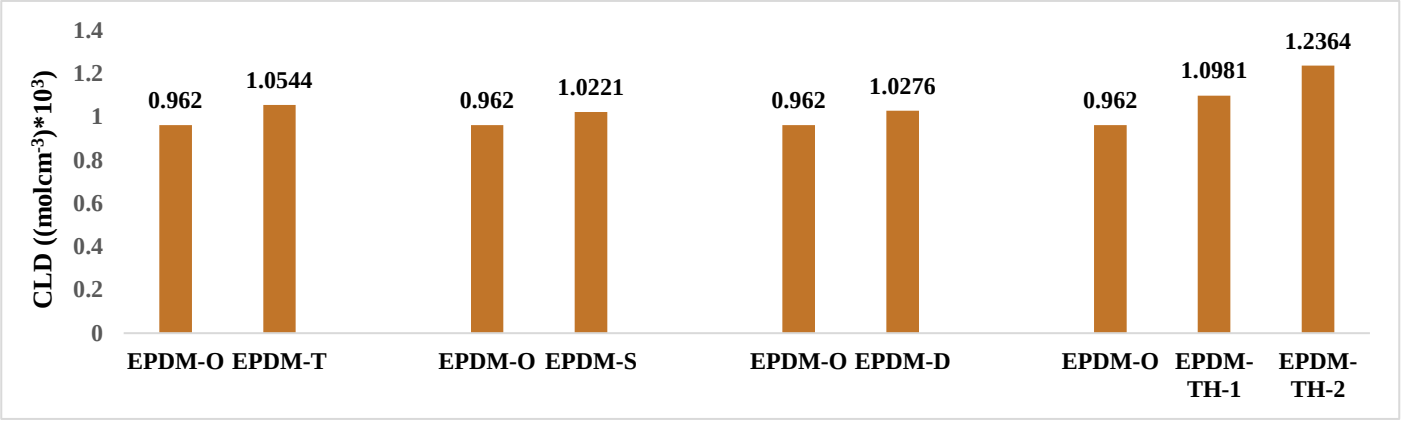
EPDM-T, EPDM-S ve EPDM-D karışımları EPDM-O ile karşılaştırıldığında yakın sonuçlar bulunmuştur. EPDM-TH-1 ve EPDM-TH-2 karışımları ise hem EPDM-O hem de diğer karışımlar ile karşılaştırıldığında deformasyon değerleri daha düşük çıkmıştır. En düşük deformasyon sonucu EPDM-TH-2 karışımda bulunmuştur. Deformasyon değerinin düşük çıkması malzemenin daha az deforme olduğu anlamına gelmektedir. Bulunan sonuçlara göre TBZTD kullanılan karışımının belirlenen sıcaklık ve sürede diğer hızlandırıcı denemelerine nazaran en az deforme olduğunu göstermektedir. Deformasyonun yüksek çıkması çapraz bağ oluşumunun istenilen seviyelere çıkmadığı anlamını taşıyabilmektedir (Güler, 2021). Şekil 4'de karışımlara ait kalıcı deformasyon sonuçları belirtilmiştir.



Şekil 4. Kalıcı Deformasyon Test Sonuçları

3.2.4. Çapraz bağ yoğunluğu değerleri

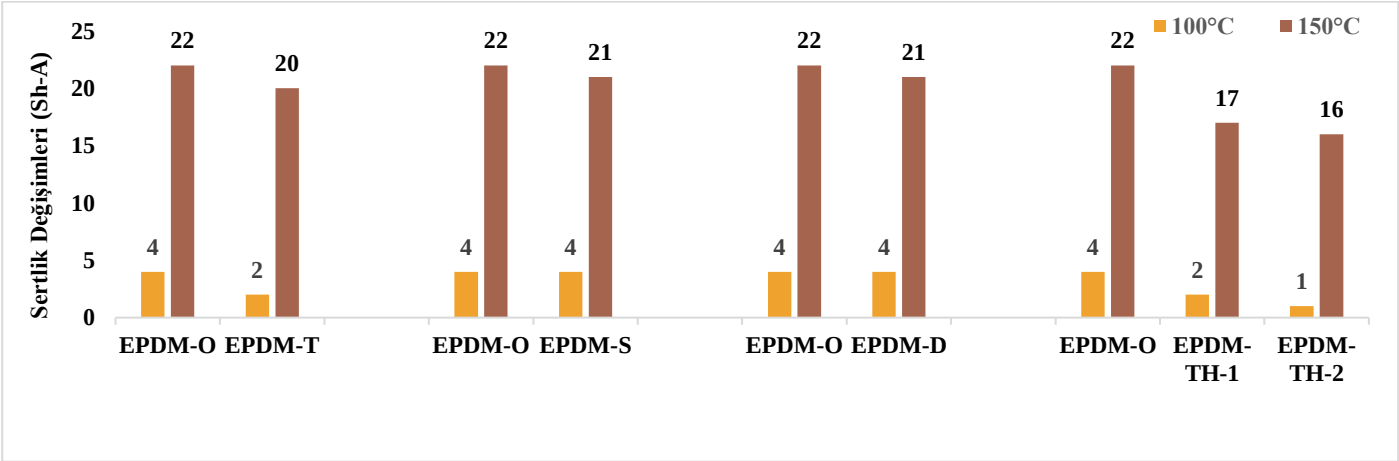
En düşük CLD değeri EPDM-O karışımında görülmektedir. En yüksek çapraz bağlanma EPDM-TH-2 karışımında bulunmaktadır. Vulkanizatın sertliği bileşenlerin sertliğine bağlıdır. Kopma mukavemeti, malzemenin yüke karşı direnci ile ilgilidir. Sertlik ve kopma mukavemeti, çapraz bağlanma yoğunluğu ile ilişkilidir. Sertlik ve kopma mukavemeti arttıkça çapraz bağlanma artmaktadır (Mayasari vd, 2019). Tüm deneme karışımların EPDM-O karışımından yüksek CLD değerine sahip olması, sertlik değerlerinin de orantılı olarak arttığı ile desteklenmektedir (Şahin, 2022). Ayrıca EPDM-T, EPDM-S, EPDM-D, EPDM-TH-1 ve EPDM-TH-2 karışımları EPDM-O ile karşılaştırıldığında CLD değerlerinde artış kalıcı deformasyon değerlerinde düşüş görülmektedir. Bu da bulunan CLD değerlerinin karışımların kalıcı deformasyon sonuçlarıyla birbirini desteklediğini göstermektedir. En düşük deforme olan karışım ile çapraz bağlanmanın en kuvvetli olduğu karışım aynıdır. Diğer karışımların deformasyon sonuçları da CLD sonuçlarıyla orantılıdır. Şekil 5'te karışımların CLD değerleri görülmektedir.



Şekil 5. Karışımların CLD Değerleri

3.2.5. Havada yaşlandırma değerleri

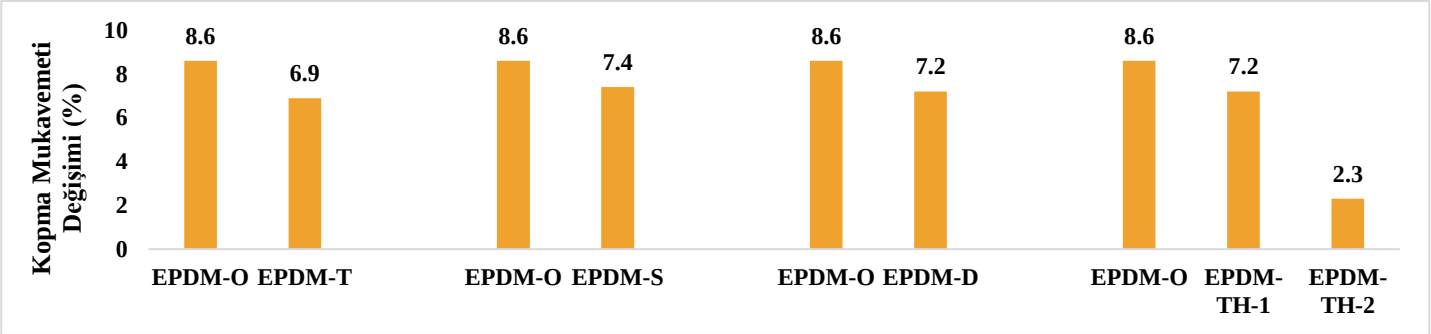
Havada yaşlandırma testleri malzeme özelliklerinde değişikliklerin derecesini tahmin etmek için kullanılan yaygın bir uygulamadır (Onay, 2020). Nihai son ürünün kullanım yerindeki ömrü ve dayanıklılığı hakkında yorum yapabilmek adına çok önemli testlerdendir. Bu çalışmada hızlandırıcı değişikliğinin verdiği tepkiyi görebilmek adına iki ayrı sıcaklıkta yaşlandırma testleri yapılmıştır. Karışımların sertlik değişimlerine bakıldığında çapraz bağlanmanın kuvvetli olduğu karışımlarda sertlik değişimlerinin daha az olduğu görülmektedir. Her iki sıcaklıktaki minimum sertlik değişimleri thiuram değişimleri sonucu TBZTD kullanılan karışımda görülmektedir. Şekil.6'da deneme karışımlarının EPDM-O karışımı ile karşılaştırmalı 100°C ve 150°C yaşlandırma sonrası sertlik değişimleri görülmektedir.



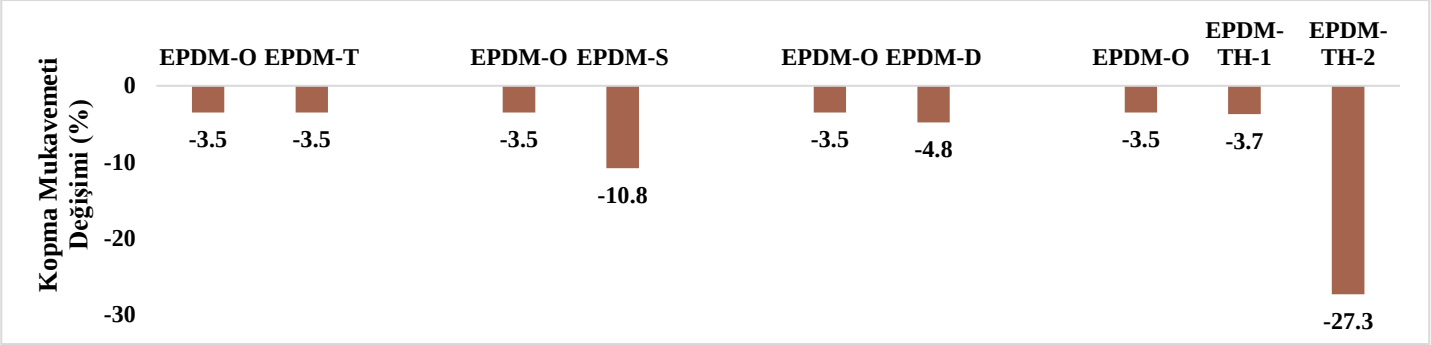
Şekil 6. 100°C ve 150°C Yaşlandırma Sertlik Değişimleri

Yaşlandırma sonrasında özellik değişimi istenmeyen bir durumdur. Yaşlanma sonrası sertlik değişimleri incelendiğinde 100°C'deki değişimler 150°C'deki değişimlerden daha azdır. İki sıcaklığı birbiri ile karşılaştırdığımızda her grup paralel değişimler göstermiştir. Bu değişimler çapraz bağların oranlarıyla örtüşmektedir. Yaşlandırma sıcaklığının artmasıyla beraber sertlik değişimleri de artmaktadır. Bunun sebebi yüksek sıcaklıklarla yaşlandırmanın kauçuk malzemenin elastikiyet özelliklerini kaybettirdiği şeklinde yorumlanabilir.

Karışımların 100°C ve 150°C yaşlandırma sonucunda kopma mukavemet değişimlerine de bakılmıştır. 100°C yaşlandırma sonrası değerler incelendiğinde EPDM-TH-2 karışımındaki kopma mukavemeti değişimi en az çıkmıştır. 100°C yaşlandırma sonrası kopma mukavemeti korumasının en iyi TBZTD hammaddesinde olduğu görülmektedir. 150°C'de EPDM-T, EPDM-D ve EPDM-TH-1 ile EPDM-O karşılaştığında benzer tepkiler verirken EPDM-S ile EPDM-TH-2 karışımları kopma mukavemeti değişimleri yüksek çıkmıştır. Özellikle EPDM-TH-2 karışımında EPDM-O karışımına nazaran değişim çok yüksek görülmüştür. Bunun sebebi EPDM-TH-2 karışımı içerisinde kullanılan TBZTD hızlandırıcısının yüksek sıcaklıklarda mukavemet koruyamadığı şeklinde yorumlanabilir. Şekil 7'de 100°C'de, Şekil 8'de 150°C'de yaşlandırma sonrası karışımların EPDM-O karışımına karşı kopma mukavemet değişimleri yer almaktadır.

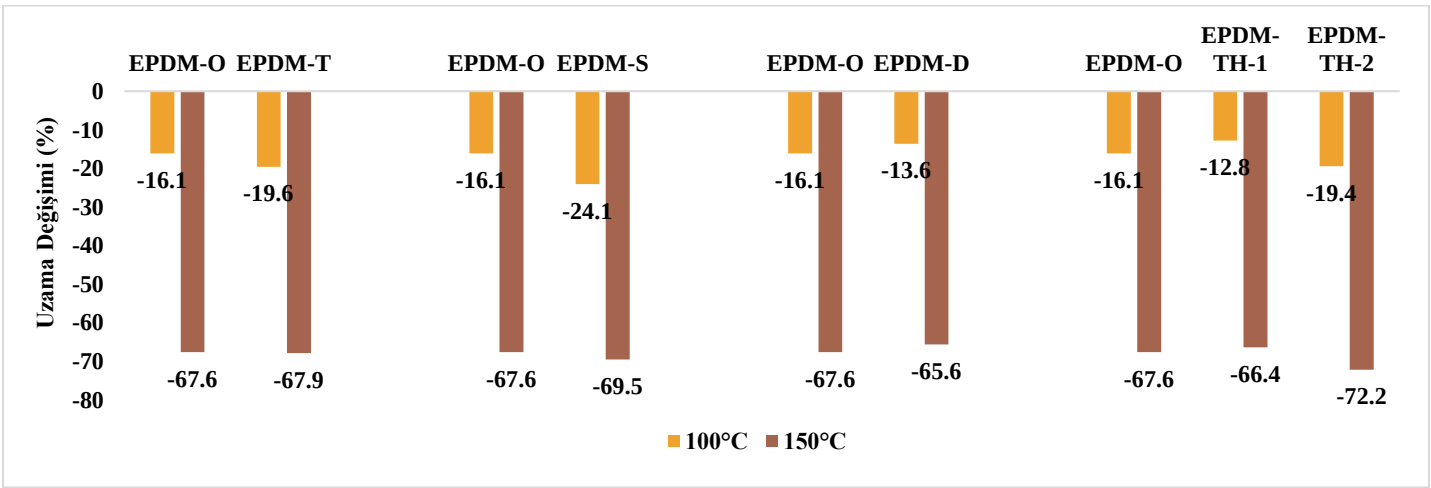


Şekil 7. 100°C Yaşlandırma Sonrası Kopma Mukavemet Değişimleri



Şekil 8. 150°C Yaşlandırma Sonrası Kopma Mukavemet Değişimleri

Sıcaklık yaşlandırmaları sonrası karışımların uzama değerlerindeki değişim de incelenmiştir. 100°Cdeki karışımların uzama değişimleri değerlendirildiğinde EPDM-O karşısında en kötü değerler EPDM-S karışımında görülmüştür. CBS hızlandırıcısı ile 100°C'deki yaşlandırma değerlerinde uzama değişimi yüksek çıkmıştır. Bu da CBS hızlandırıcısının reçete içerisinde kullanılması ile elastikiyetin olumsuz etkilendiğini gösterebilmektedir. Buna karşın EPDM-D ve EPDM-TH-1 karışımında EPDM-O karşısında uzama miktarındaki değişimde iyileşme söz konusudur. Bu veri de ZBEC'ye karşı ZDBC'nin, TMTM'ye karşı TMTD'nin ısıl yaşlandırma sonrası elastikiyet korumasında daha etkili olduğunu gösterebilmektedir.
150°Cdeki uzama değerleri incelendiğinde EPDM-T ve EPDM-S değerleri EPDM-O ile benzer sonuçlar vermektedir. EPDM-O karşısında en büyük değişim EPDM-TH-2 karışımının uzama değerinde görülmüştür. Bu veri 150°C yaşlandırma sonrası kopma mukavemeti değişimi ile paralel çıkmıştır. Sıcaklığın artışı ile beraber TBZTD kullanılan karışımın elastikiyetini kaybettiği görülmektedir. Elastikiyet, kauçuk malzemenin aranan özelliklerindendir ve kauçuk malzeme kullanım alanında çevresel şartlardan çok etkilenmemeli, ön değerlerini koruyabilme özelliğine sahip olmalıdır. 150°C'deki EPDM-TH-2 karışımındaki yüksek elastikiyet kaybı TMTM hızlandırıcısına nazaran TBZTD hızlandırıcısının sıcaklığa karşı direncinin az olduğunu gösterebilmektedir. Şekil 9'da tüm karışımların yaşlandırma sonrası uzama değişimleri görülmektedir.



Şekil 9. 100°C ve 150°C Yaşlandırma Sonrası Uzama Değişimleri

4. Sonuçlar

Yapılan çalışmada EPDM formülasyonunda farklı tür hızlandırıcılar eklenerek 6 farklı karışım oluşturulmuş, elde edilen karışımların reolojik ve mekanik sonuçları değerlendirilmiştir. Reolojik sonuçlar değerlendirildiğinde thiazole grupları karşılaştırmasında MBTS kullanılan karışımın MBT kullanılan karışıma nazaran daha geç vulkanizasyon sürelerine sahip olduğu görülmektedir. MH değerini değişiklik radikal bir şekilde etkilemezken, ML değerinde ufak bir yükselme görülmüştür. Sülfenamide gruplarında CBS ile TBBS karşılaştırıldığında CBS kullanılan karışımların TBBS kullanılan karışımlardan daha erken vulkanize olduğu görülmektedir. Değişiklik ile ML değerinde artış görülürken, MH değerinde düşüş yaşanmıştır. Dithiocarbamate gruplarında değişim ile MH değerinde ufak bir azalma görülmüş, ZDBC hızlandırıcısının ZBEC'ye nazaran vulkanizasyonu tamamlamasında daha etkili olduğu görülmüştür. Thiuram gruplarında ise TMTM'nin TBZTD ve TMTD olarak değişimiyle ML ve MH değerlerinde artış, T90 değerlerinde ise gerileme görülmüştür. Karışımların viskozite sonuçları da ML değerleriyle paralel sonuçlar vermiştir. ML değeri testin yapıldığı sıcaklıktaki minimum viskozitedir. Bu sebeple reometre sonucunda elde edilen ML değerleri ile viskozite sonuçlarının orantılı ve birbirini destekleyici şekilde çıkması beklenen bir durumdur. Karışımların sertlikleri ve kopma mukavemetleri incelendiğinde MBTS, TMTM, ZBEC, TBBS kombinasyonlu EPDM-O karışımında en düşük sertlik ve kopma değeri, TMTM yerine TBZTD'nin kullanıldığı EPDM-TH-2 karışımında en yüksek sertlik ve kopma değeri görülmektedir. Buna karşın en düşük uzama değeri EPDM-TH-2 ve en yüksek uzama değeri EPDM-O karışımında bulunmuştur. Yüksek sertlik, bu grupların yüksek çaprazbağ yoğunluğu sağlama özelliklerinin bir sonucu olarak değerlendirilebilir. Buna bağlı olarak yüksek sertlikler ile yüksek kopma dayanımı değerleri elde edilebilir. Uzama, kauçuk malzemenin elastikiyetini gösteren değerlerden biridir. Kopma dayanımı artmasıyla uzama değerinin düştüğü görülmesi literatürde desteklenmektedir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda TMTD ve TBZTD hızlandırıcılarının TMTM'ye nazaran karışıma dirilik katıp, elastikliğini azalttığını, MBT, CBS ve ZDBC hızlandırıcılarının TMTD ve TBZTD hızlandırıcıları kadar olmasa da MBTS, TBBS ve ZBEC hızlandırıcılarına nazaran benzer etkiler yarattığını göstermiştir. Yırtılma dayanımı ham kauçuğun cinsi ve reçete içerisinde kullanılan dolgu malzemeleriyle doğrudan ilişkilidir. Literatürde bu özellikle alakalı malzeme yapısının farklılığının etkilerinin incelendiği çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada hızlandırıcıların yırtılma değeri üzerinde kauçuk ve dolgu malzemeleri gibi önemli ölçüde etki yaratmadığı görülmüştür. Çaprazbağ yoğunluğu ile kalıcı deformasyon sonuçları orantılı sonuçlanmıştır. Çaprazbağ yoğunluğu yüksek olan grupların düşük kalıcı deformasyon sergilediği görülmüştür. Yüksek bağ yapısına sahip TBZTD hızlandırıcısın en düşük deformasyona uğradığı bulunmuştur. 100°C ve 150°C havada yaşlandırma testleri de yapılmıştır. Her kauçuğun belirli bir sıcaklık dayanımı vardır ve bu sıcaklıkların üstünde kauçuk dayanım sergilemeyip bağ yapısı bozulmaktadır. Çalışmada 150°C'deki değişimler 100°C'deki değişimlerden yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni EPDM kauçuğun maksimum dayanım sıcaklığının 150°C olmasıdır. Her iki sıcaklıktaki minimum sertlik değişimleri thiuram değişimleri sonucu TBZTD kullanılan karışımda görülmektedir. Tüm değişimler CLD değerleri ile paralel bulunmuştur. 150°C için en yüksek kopma mukavemeti değişimi thiuram değişimleriyle TBZTD kullanılan karışımda görülmüştür. Bu da TBZTD'nin hem thiuram hem de diğer gruplara kıyasla yüksek sıcaklıklarda bağ yapısını ve mukavemeti koruyamadığını göstermiştir. Uzama verileri incelendiğinde 100°C yaşlandırma sonrası en fazla kayıp CBS ile değişimde görülmüştür. ZDBC ve TMTD değişimlerinde ise 100°C için iyileşme görülmüştür. 150°C yaşlandırma için ise bağ yapısındaki bozulmadan dolayı TBZTD değişimi yapılan EPDM-TH-2 karışımının hem EPDM-0 karışımından hem de diğer karışımlardan çok daha fazla elastikiyetini kaybedip uzama değerinde değişim sergilediği görülmüştür.

Kauçuk malzemeler beyaz eşya, otomotiv, demir yolları, inşaat, uçak endüstrisi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Kullanım yerindeki ihtiyaca, hedef maliyete göre kauçuk reçetenin içeriği de değişebilmektedir. Hızlandırıcı seçimi kauçuk parçanın nihai kullanım alanındaki dış ortam maruziyetlerine ve mekanik ihtiyaçlarına göre seçilmelidir. Yapılan çalışmada farklı tür hızlandırıcıların baz reçete içerisine katılmasıyla özelliklerinin değişimi ve ekstrem koşullar altında etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan TBZTD hızlandırıcısının diğer hızlandırıcılara nazaran düşük sıcaklıklar için daha uygun olup yüksek sıcaklığa maruz kalacak son ürünlerde kullanımının uygun olmadığı sonucu çıkarılabilmektedir.

Referanslar

Akçakale N. (2008). NR/SBR tipi elastomer esaslı ayakkabı taban malzemelerinin mekaniksel özelliklerine bazı dolgu maddelerinin etkilerinin incelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Başdemir D. Y. (2022). Karbon siyahı tipinin ve vulkanizasyon sisteminin yeni nesil etilen propilen dien monomer (EPDM) elastomerlerinin statik ve dinamik mekanik özelliklerine etkisi. Hacettepe Üniversitesi, Polimer Bilimi ve Teknolojisi Anabilim Dalı.

Bülbül Ş. (2014). Farklı inorganik ve organik dolguların NR/SBR tipi elastomer malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Formela K., Wasowicz D., Formela M., Hejna A., Haponiuk J. (2015). Curing characteristics, mechanical and thermal properties of reclaimed ground tire rubber cured with various vulcanizing systems. Iran Polymer. DOI:10.1007/s13726-015-0320-9

Ghosh P., Chattopadhyay B. & Sen A.A. (1996). Thermal and oxidative degradation of PE-EPDM blends vulcanized differently using sulfur accelerator systems. European Polymer Journal; 1996; Vol.32 Issue:8 p1015-1021, 7p.

Güler E. (2021). Otomotivde kullanılan AEM (etilen akrilik monomer) kauçuk hava hortumlarının ektrüzyon ve otoklav parametrelerinin optimizasyonu. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Kalle H., Minna P. & Hanna-Mari T. (2007). Elastomeric materials, Leonardo Da Vinci.

Koç A. & Tüken T. (2019). EPDM Kauçuk karışımlarının kükürt vulkanizasyon sistemlerinde kullanılan hızlandırıcıların rheolojik özelliklerine etkisinin incelenmesi. Ç.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi.

Kordayıoğlu A. (2018). Vulkanizasyon parametrelerinin doğal kauçukların çaprazbağ yoğunluğu ve malzeme ömrü üzerindeki etkisinin incelenmesi. Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kılıç B. (2018). Çaprazbağ yoğunluğu hesabında kullanılan tekniklerin doğal kauçuk (NR) ve etilen propilen dien kauçuk (EPDM) için karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Markovic G., Radovanovic B., Cincovic M. M. & Simendic J. B. (2009). The effects of accelerators on curing characteristics and properties of natural rubber/chlorosulphonated polyethylene rubber blend. https://doi.org/10.1080/10426910902967087.

Mayasari H.E., Setyorini I. & Yuniari A. (2019). The blending of EPDM/NR with maleic anhydride as compatibilizer: comparing the effect of accelerators on cure characteristic and mechanical properties. Indones. J. Chem. Doi:10.22146/ijc.27730

Onay M. (2020). Silikon elastomerlerin ömür sürelerine etki eden parametrelerin belirlenmesi. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Öztürk E. (2008). Farklı kauçuk karışımlarının vulkanizasyonuna hızlandırıcıların etkisi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Sae-Oui P., Sirinsinha C., Thepsuwan U. & Thapthong P. (2007). Influence of accelerator type on properties of NR/EPDM blends. Polymer Testing, volume26 issue8, https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2007.07.004.

Samarasinghe H., Walpalage S., Edirisinghe D. & Egodage S. (2021). Comparative study on cure, mechanical and dynamic-mechanical properties of natural rubber compounds formulated with DIXP, TBZTD, ZBEC and TBBS accelerators. Moratuwa Engineers Conferences 2021.

Saraç S. (2018). İnorganik katkılı kauçuk malzemenin özelliklerinin incelenmesi. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Şahin B. (2022). EPDM kauçuk esaslı hidrolifik kompozitler. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Vahapoğlu V. (2007). Kauçuk türü malzemeler 1. Doğal kauçuk. CBÜ Fen Bilimleri Dergisi. 3.1 (2007)57-70.

Yıldırım Ö. (2019). Sıcaklık dayanım performansı geliştirilmiş EPDM esaslı malzeme geliştirilmesi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Zhao J. (2001). Effects of sulfur accelerators on the performance of EPDM/SBR blends. Kautschuk and Gummi Kunststoffe.

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

UMAGD, (2023) 15(2), 665-670.

10.29137/umagd.1289051

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

İçme Suyu Arıtma Çamuru Atığının Seramik Duvar Karosu Üretiminde Kullanım Potansiyeli

Use Potential of Drinking Water Treatment Sludge Waste in Ceramic Wall Tile Production

Suna Çetin[1*]

***Başvuru/Received**: 28/04/2023 **Kabul / Accepted**: 02/06/2023 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Öz

Atık su arıtma tesislerinde üretilen arıtma çamurunun gün geçtikçe artması ve depolanması önemli bir çevresel sorundur. Günümüzde bu tür atıkların alternatif imha yöntemlerinin çevre dostu olmaması nedeni ile yararlı yeniden kullanım ve yeni alternatif geri dönüşüm stratejilerinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada, Adana Çatalan İçme Suyu Arıtma tesisinden temin edilen çamurun nihai bertarafına bir alternatif olarak duvar karo üretimi için kaplama seramik malzemesi imalatında püskürtülerek kurutulmuş atık çamurun kullanımı analiz edilmiştir. Yığın bileşimlerine ağırlıkça %5,10 ve 20 oranında içme suyu arıtma çamur atığı ilave edilmiş, laboratuar koşullarında kuru presleme ile şekillendirilerek bir dizi seramik karo formülasyonu hazırlanmıştır. Numuneler 1145 °C de 35 dakika süre ile endüstriyel koşullarda pişirilmiştir. Numunelerin pişme küçülmesi, su emme ve eğme dayanımları gibi teknolojik özelliklerinin yanı sıra mikroyapı analizleri de araştırılmıştır. Yapılan testler, içme suyu arıtma çamuru atığının, duvar karosu bünyesinde ikincil hammadde olarak % 5 oranında kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler

"İçme suyu arıtma çamuru, duvar karosu, geri dönüşüm"

Abstract

The increase and storage of sewage sludge produced in wastewater treatment plants is an important environmental problem. Since alternative disposal methods of such wastes are not environmentally friendly, it is important to determine useful reuse and new alternative recycling strategies.In this work, the production potential of industrial solid waste obtained from Adana Çatalan Drinking Water Treatment Plant in ceramic wall tile manufacturing was investigated. A series of ceramic tile formulations were prepared with 5, 10 and 20 wt% of drinking water treatment sludge waste incorporation into the batch compositions and shaping by dry pressing under laboratory conditions. Samples were fired at 1145 ° C for 35 minutes under the industrial conditions. In addition to the technological properties of the samples such as firing shrinkage, water absorption and bending strength, microstructure analyzes were also investigated. Tests have shown that drinking water treatment sludge waste can be used as a secondary raw material at a rate of 5% in wall tiles.

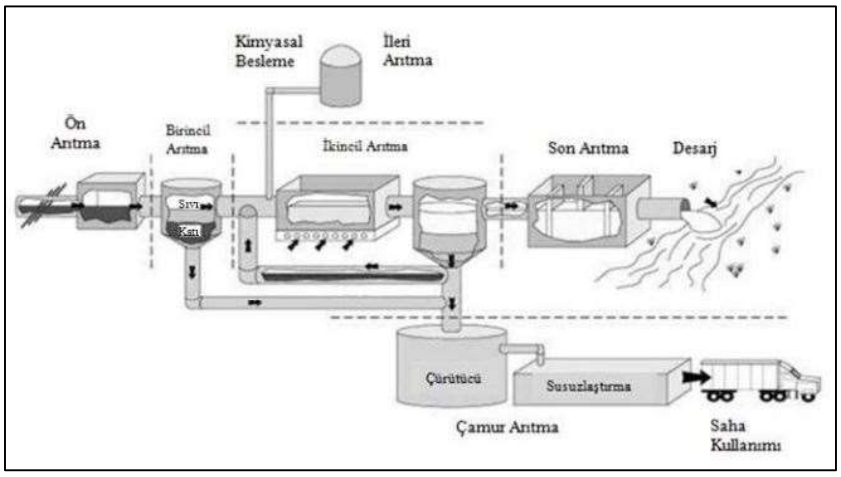
Key Words

"Drinking water treatment sludge, wall tile, recycling"

***Sorumlu Yazar:** cetinsster@gmail.com*

1. Giriş

Katı atık yönetimi; yüksek enerji tüketimi, endüstriyel atıklarda orantısız artış ve çevre kirliliği gibi birçok sorunla sonuçlanan küresel bir sorundur. Pek çok çevre sorunu, çoğunlukla hacimleri ve potansiyel olarak toksik elementlerin içerikleri ile ilgili olarak, endüstriyel ve evsel atıkların ve çamurun birikmesinden kaynaklanmaktadır. Tüm bu konular, sürdürülebilir bir kalkınma sağlamak için yeni çözümlerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Temiz üretim, endüstrilerdeki atık ve kirleticilerin işlenmesine yönelik entegre bir yaklaşımdır (Visvanathan et al., 1999). Bu yaklaşım, enerji kullanımında, hammadde kullanımında iyileştirmeler ve emisyon ve atıkta azalmayı kapsayan ekonomik, çevre dostu bir üretim sistemini gerektirir. Atığın hammadde olarak kullanılması, hem ilgili ekonomik maliyetlerle birlikte depolama alanı sorunlarının hem de herhangi bir yeni ürünün imalatında kullanılacak hammaddelerin çıkarılması ihtiyacının azalmasını temsil etmektedir (Tarrago et al., 2017). Bu açıdan bakıldığında, atıkların değerlendirilmesi çevrenin korunmasını ve doğal kaynakların rasyonel kullanımını teşvik eden bir tedbirdir.
Atık su arıtma tesislerinde üretilen arıtma çamurunun hacminin sürekli büyümesi, kullanımı ve depolanması önemli bir çevresel sorundur. Kentsel atık su arıtma tesisinin işlem süreci Şekil 1'de görüldüğü üzere özetlenebilir. Atık su arıtma çamurları doğrudan nehirlere, derelere, göletlere, göllere, kanalizasyona vb. deşarj edilmekte veya ticari depolama alanlarına gönderilerek tarımsal amaçlı kullanılmaktadır. Bu alternatif imha yöntemleri çevre dostu değildir, bu nedenle özelliklerine göre yararlı yeniden kullanım ve yeni alternatif geri dönüşüm stratejilerinin belirlenmesi önem arz etmektedir.



Şekil 1. Atık su arıtma tesisi örnek akış şeması (chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.hlccevre.com/images/PDF/sektorel-kilavuzlar/barajlar-ve-hesler.pdf)

Özellikle seramik sektöründe doğal hammadde kaynaklarının hızla tükenmesi, alternatif hammadde kaynağı olarak atık maddelerin kullanılmasının önemini artırmaktadır. Ayrıca, bu tür yararlı yeniden kullanımlar arasında, çamurun yapı endüstrisi için potansiyel bir ikame malzeme olarak kullanılması güvenli bertaraf yöntemleri sağlayabilir (El-Din et al., 2011; Benlalla et al., 2015). Bu bağlamda yapı için seramik malzeme üretiminden bahsedebiliriz. Bazı seramik fabrikalarında üretilen ürünlerin rengi, kil içerisinde az miktarda Fe_2O_3 ve çok miktarda ince dağılan karbonatlar nedeniyle soluktur. Seramik ürünlerin rengi, oluşum kütlesine boyar katkı maddeleri katılarak değiştirilebilir. Bu katkı maddelerinin az bir miktarı bile (kuru malzeme kütlesinin %1-5'i) seramik ürünlerin maliyetini artırmaktadır. Bu nedenle, seramik ürünlerin rengini değiştirebilecek ve aynı zamanda nihai ürünün fiyatını çok fazla etkilemeyecek katkı maddelerinin üretimde kullanılması rasyoneldir. Su arıtma tesislerinde oluşan çamur yukarıda belirtilen özelliklerle karakterize edilir. Bu atıklar sadece seramik gövdelerin rengini değil aynı zamanda fiziksel ve mekanik özellikleri ile seramik gövdenin yapısal özelliklerini de etkilemektedir. 2020'de dünya karo üretiminin 16,093 milyon m^2'ye yükseldiği göz önünde bulundurulduğunda atık su arıtma çamurlarının küçük yüzdelerinin seramik karo ve tuğla gibi yapı endüstrisinde kullanılan bu ürünlere dahil edilmesi bile, çamurun potansiyel kullanımı açısından çok önemli olacaktır (Crasta, 2021; Cremades et al., 2018).

İçme suyu arıtma tesislerinden kaynaklanan çamuru ağırlıkça %70 artan oranlarda seramik kaplama imalatında kullanan Cremades L.V arkadaşları, çamur ilave yüzdesindeki artışla seramik numunelerin yüksek bir açık gözenekliliğe sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Bu iki özellik dikkate alındığında, bu malzemenin olası bir uygulamasının sırlı karoların imalatı olabileceği sonucuna varmışlardır.

Mevcut çalışmada, içme suyu arıtma çamuru atığının seramik duvar karosu üretiminde kullanım olanakları araştırılmıştır. Bu amaçla Kale-Seramik fabrikası Ar-Ge laboratuvar ölçeğinde deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma takip edilen süreci, elde edilen seramik duvar karosunun karakterizasyonunu ve bunların çevresel değerlendirmelerini göstermektedir.

2. Materyal ve Metod

Bu çalışmada, kullanılan içme suyu arıtma çamur atığı Adana ilinde bulunan 500.000 m^3/gün kapasiteye sahip "Çatalan İçme Suyu Arıtma" yüzey suyu arıtma tesisinden temin edilmiştir. Endüstriyel seramik duvar karo üretim formülasyonu Kaleseramik standart (Std) duvar karosu bileşimden seçilmiştir. İçme suyu arıtma çamur atığının kimyasal analizini belirlemek için X-ışını floresans spektrometresi (Panalitik Axios XRF, Kale Seramik Araştırma Merkezi) kullanılmıştır. Standart duvar karosu reçetesi ile kıyaslama yapmak için oluşturulan katkılı duvar karosu reçetelerinde ağırlıkça % 5, %10 ve % 20 içme suyu arıtma çamur atığı kullanılmıştır. Standart duvar karo ve içme suyu arıtma çamur atığı içeren bünye kompozisyonları, laboratuvar tipi bilyalı değirmen kullanılarak sulu öğütme ile hazırlanmıştır. Değirmenden alınan çamur 110 °C'de kurutularak, 63 μm'nin altına öğütülerek ağırlıkça % 6 su ile nemlendirildi. Nemlendirilmiş karışımlar, Gabrielli marka pres kullanılarak 50 mm çapında disk numuneler, 36 bar basınçta preslendi. Mukavemet testleri için ise 100x50x5 mm ebadındaki karolar 130 bar basınçta preslenerek şekillendirildi. Şekillendirilen örnekler, 110 °C'de kurutularak endüstriyel rulo fırınında 35 dakika süre ile 1145 °C'de sırlanmadan pişirilmiştir.

Deneme numunelerine standartlar dâhilinde fiziksel ve mekanik testler uygulanmış, ortalama değerleri alabilmek amacıyla her bir test için üçer adet numune hazırlanmıştır. Pişmiş üründe oluşan fazların tespiti Empyrean model Panalitik marka XRD cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Mikroyapısal incelemeler için ise numunelerin dağlanmış kırık yüzeylerinde (FEI Quanta FEG 650 model SEM) taramalı elektron mikroskobu ile ikincil elektron görüntüleri alınmıştır İki analiz; Çukurova Üniversitesi Merkez Araştırma Labaratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan nihai ürünler, TS EN 14411 (Grup BIII, E >%10) standart test serisine göre değerlendirilmeye alınmıştır. Numunelerin renk değerleri Minolta CR 300 marka renk ölçüm cihazı ile ölçülmüş, 3 nokta mukavemet değerleri Gabrielle CR5/650 marka mukavemet cihazı ile Çanakkale Seramik fabrikası Ar-Ge labaratuvarında tespit edilmiştir. Pişmiş karo örneklerinin su emme değerleri ISO 10545-3 standardına göre ölçülmüştür.

3. Deneysel Çalışmalar

3.1. Kimyasal Analiz

Çalışmada kullanılan hammaddelerin kimyasal kompozisyonları Tablo 1'de, farklı oranlarda içme suyu arıtma çamur atığı içeren bünye kompozisyonları da Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 1. İçme suyu arıtma çamur atığı ve standart duvar karo bileşiminin kimyasal analizleri (ağırlıkça %)

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	A.Z.
İçme suyu arıtma çamur atığı	61,10	11,12	14,57	3,75	0,64	Eser	0,37	0,36	7,16
Standart duvar karo bileşimi	57,93	17,68	2,02	7,21	0,81	0,90	2,34	0,85	10,27

A.Z.: Ateş zaiyatı

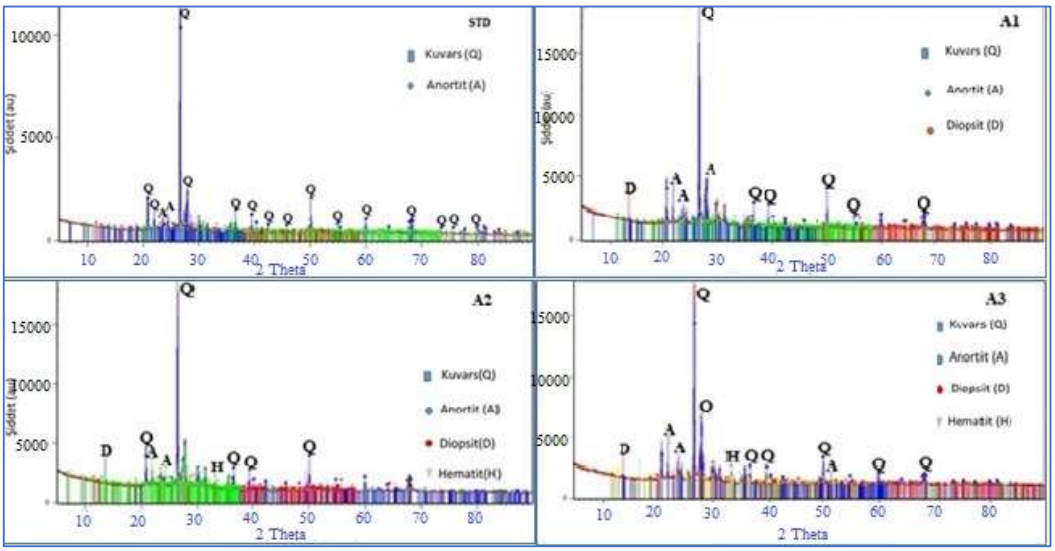
Tablo 2. Karışımların ağırlıkça oranları

Karışım adı	Std	İçme Suyu Arıtma Çamur Atığı
A1	95	5
A2	90	10
A3	80	20

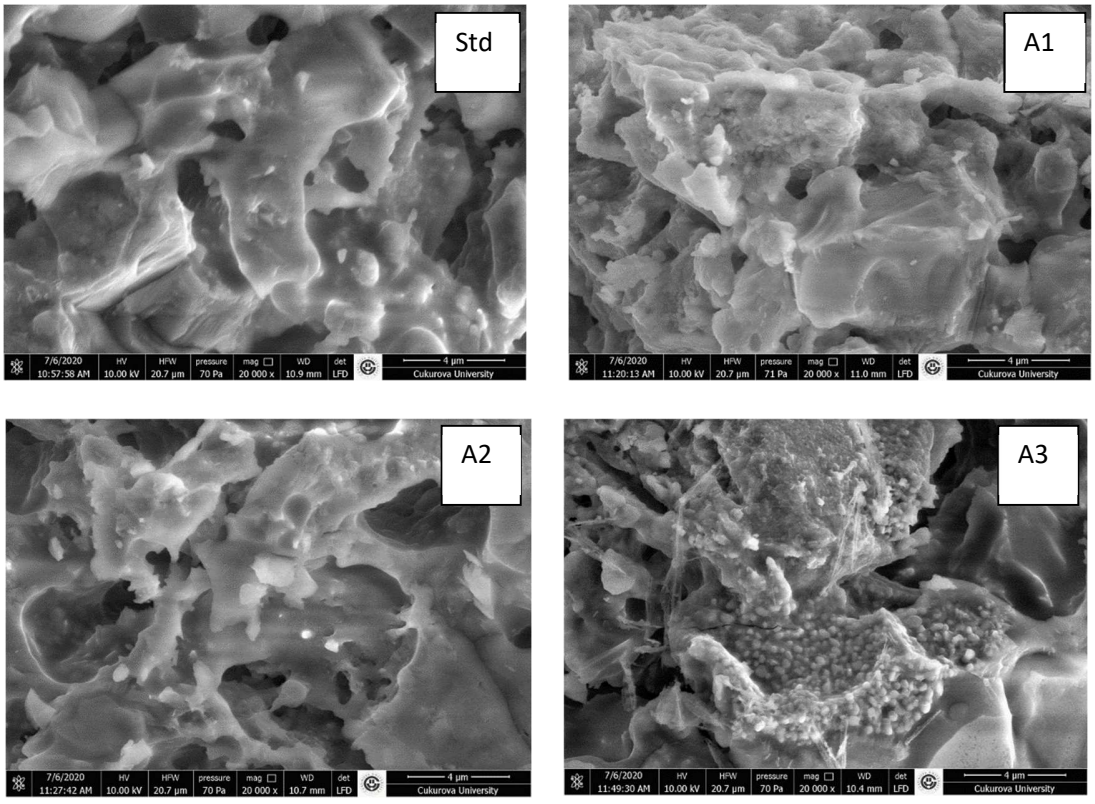
3.2. Faz Analizleri

Numunelere ait XRD analizleri sonuçları Şekil 2'de verilmiştir. XRD analizi sonuçlarına göre, sinterlenmiş standart duvar karosu bünyesinin ana kristal fazı kuvarstır. A1 duvar karosu bünyesinde ana kristal fazlar kuvars, anortit ve diopsittir. Ayrıca A2 ve A3 bünyelerinde pik şiddeti az da olsa hematit fazı görülmektedir. İçme suyu arıtma çamur atığı yaklaşık % 15 oranında demir oksit içermektedir. Dolayısı ile hematit fazının, standart duvar karosu bünyesine ilave edilen içme suyu arıtma çamur atığı miktarındaki artışı sebebi ile olduğu söylenebilir.

Sinterlenmiş örneklerin SEM görüntüleri ise Şekil 2'de verilmiştir. Örneklerin SEM görüntüleri incelendiğinde, gözeneklilik açısından benzer oldukları görülmektedir. Örneklerin su emme yüzdelerinin birbirine yakın olması bu durumu desteklemektedir (Tablo 3). Anortit kristalleri, termal döngü sırasında kalsit dekompozisyonundan kaynaklanır. Yapılan çalışmada tüm örneklerde oluşan Anortit ($CaAl_2Si_2O_8$) mineral fazı XRD analizi ile tespit edilmiştir.



Şekil 2. STD, A1, A2 ve A3 bünyelerine ait XRD görüntüleri



Şekil 3. Standart ve geliştirilen A1, A2 ve A3 bünyelerine ait SEM görüntüleri

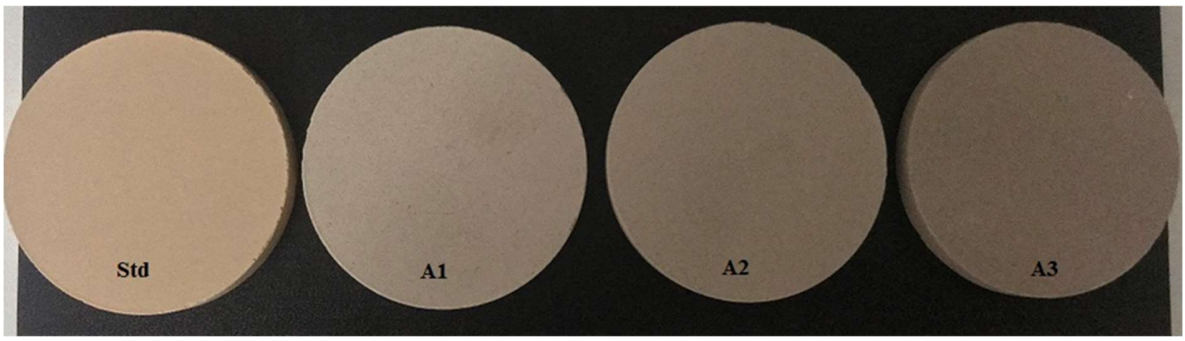
Teknolojik Özellikler

Fırınlanan duvar karo gövdelerinin teknolojik özellikleri karakterize edilmiş ve sonuçlar Tablo 3' de verilmiştir.

Tablo 3. Numunelere ait teknolojik özellikler

Ürün Kodu	Pişme Küçülmesi	Pişmiş Mukavemet (N/mm^2)	Su Emme	Renk Analizi		
				L*	a*	b*
Std	0,30	24,9	16,28	73,56	7,21	21,41
A1	0,20	23,2	17,04	73,28	4,67	12,28
A2	0,10	21,8	18,20	70,63	4,99	12,44
A3	0,50	20,4	15,80	64,66	5,21	12,86

Tablo 3'deki sonuçlara göre içme suyu arıtma çamur atığı bazlı karışımların standart duvar karosu karışımı ile kıyaslandığında A1 kodlu örneğin benzer değerler gösterdiği görülebilir. Renk açısından standart ve A1 kodlu örnekler kıyaslandığında A1 kodlu örneğin a* ve b* değerlerinin düşük olduğu görülmektedir. Dolayısı ile standart pişmiş karo örneğine göre A1 kodlu örneğin daha koyu renkte olduğu görülmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Örneklerin fiziksel görüntüleri

4. Sonuç

Yapılan bu çalışmada; içme suyu arıtma çamuru atığının seramik duvar karosu üretiminde kullanım olanakları araştırılmıştır. Bu amaçla standart duvar karosu reçetesine artan oranlarda (%5, %10 ve %20) içme suyu arıtma çamuru atığı ilave edilerek laboratuvar ölçeğinde duvar karosu üretimi yapılmıştır. Yapılan standart testler sonucunda;

- A1 kodlu örneğin standart duvar karosu örneği ile benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. A1 kodlu örneğin renk testi sonucuna bakıldığında standart duvar karosu örneğinden daha koyu renkte pişme rengi verdiği görülmektedir. Renk farkı A1 kodlu örnek için geliştirilecek sır tabakası ile giderilebilir.
- Türkiye'nin güneyindeki su arıtma tesisinden çıkan içme suyu arıtma çamuru atığının, duvar karosu bünyesinde ikincil hammadde olarak % 5 oranında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.
- Bu çalışma göstermiştir ki, atıkların depolanması ve taşınmasının yanı sıra çevreye verilen zararın azaltılabilmesi için bu tip çalışmaların daha çok desteklenmesi önem arz etmektedir.

Teşekkür
Deneysel çalışmalarım için endüstriyel labaratuvar imkanı sağlayan Kale-Seramik Ar-ge çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Referanslar

Benlalla, A., Elmoussaouiti, M., Dahhou, M., Assafi, M. (2015). Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. Applied Clay Science, 118, 171-177. https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.09.012

Crasta, G. P. (2021). Tile International 3. İtalya, Tile Edizioni.

Cremades, L.V., Cusidó, J.A., Arteaga, F. (2018). Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. Journal of Cleaner Production, 201, 1071-1080. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.094

Çevresel Etkiler ve Alınacak Önlemler Kılavuzu-AtıkSu Arıtma Tesisleri (2017) 15 chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.hlccevre.com/images/PDF/sektorel-kilavuzlar/barajlar-ve-hesler.pdf

El-Din, B., Hegazy, E., Fouad, H.A., Hassanain, A.M. (2011). Reuse of water treatment plant sludge in brick manufacturing. Journal of Applied Sciences Research, 4, 1223-1229.

Kizinievič, O., Žurauskienė, R., Kizinievič, V., Žurauskas, R. (2013). Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. *Construction and Building Materials*, 41, 464-473. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.041

Tarrago, M., Garcia-Valles, M., Mobarak, A., Martínez, S. (2017). Valorization of sludge from a wastewater treatment plant by glass-ceramic production. *Ceramics International,* 43, 930-937. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.10.083

Visvanathan, C., Kumar, S. (1999). Issues for better implementation of cleaner production in Asian small and medium industries. *Journal of Cleaner Production*, 7, 127-134. https://doi.org/10.1016/S0959-6526(98)00050-X

MÜHENDİSLİK MİMARLIK FAKÜLTESİ

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

UMAGD, (2023) 15(2), 671-688.

10.29137/umagd.1253099

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Zemin Kat Yüksekliği ve Kat Adedi Farklı Olan Betonarme Binalarda Sismik İzolatör Kullanımının Bina Davranışına Etkisinin İncelenmesi

Investigation of the Effect of Seismic Isolator Use on Building Behaviour in Reinforced Concrete Buildings with Different Ground Storey Height and Number of Storey

Ali Mert ÖZKAN[1], Şenol GÜRSOY[2*], Zehra Şule GARİP[2]

[1]Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, 78050 Karabük, TÜRKİYE
[2]Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 78050 Karabük, TÜRKİYE

***Başvuru/Received**: 19/02/2023* ***Kabul/Accepted**: 05/02/2023* ***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Öz

Türkiye'de binaların zemin katları genellikle dükkân, otopark, otomobil galerisi, banka, otel lobileri, depo vb. gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Bu durumda da zemin katların yükseklikleri, normal katlara göre daha yüksek olmakta dolayısıyla zemin katın rijitliği üst katlara göre azalmaktadır. Rijitliği zayıf olan bu katlarda depremler sırasında ağır hasarlar oluşmaktadır. Bu çalışmada üç farklı bina formuna sahip ankastre mesnetli ve kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlü betonarme binaların zemin kat yüksekliğindeki artışın yapısal davranışlarına etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu amaçla önce toplam kat alanları sabit tutularak üç farklı bina formuna ve farklı kat adedine sahip ankastre mesnetli betonarme bina modelleri oluşturulmuş ve söz konusu modellerin zemin kat yüksekliğinin farklı oranlardaki artışının yapısal davranışlarına etkileri araştırılmıştır. Daha sonra söz konusu bina modellerinin temeli ile kolonları arasına kurşun çekirdekli kauçuk izolatör yerleştirilerek sismik izolasyonlu bina modellerinin davranışları ankastre mesnetli bina modelleri ile karşılaştırmaktadır. Yapısal çözümlemelerden elde edilen bulgular sismik izolatörlü bina modellerinde zemin kat yüksekliğinin artması ile taban kesme kuvveti değerlerinin ve üst katlardaki göreli kat ötelenmelerinin ankastre mesnetli bina modellerine göre önemli ölçüde azaldığını ve periyot değerlerinin ve kat yer değiştirmelerinin önemli ölçüde arttırmadığını ortaya koymaktadır. Bu bulgular deprem tehlikesinin yüksek olduğu bölgelerde inşa edilecek betonarme binaların emniyeti ve deprem performansı bakımından sismik izolatörlerin alternatif olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler

"Betonarme yapılar, bina periyodu, sismik izolasyon, yumuşak kat düzensizliği, zemin kat yüksekliği"

Abstract

Ground storeys of buildings in Turkey are usually used for purposes such as shops, car parks, car dealerships, banks, hotel lobbies, warehouses, etc. In this case, the heights of the ground storeys are higher than the normal storeys, so the stiffness of the ground storey decreases compared to the upper storeys. These storeys, which have weak rigidity, are heavily damaged during earthquakes. This study investigated the effects of the increase in ground storey height on the structural behaviours of reinforced concrete buildings with fixed support and lead core rubber insulators with three different building forms. To that end, firstly fixed support reinforced concrete building models with three different building forms and three different number of storeys by keeping the total storey areas constant was created. The effects on the structural behaviours of the increase at different rates of the ground storey height of these models were researched. Then, a lead-core rubber insulator is placed between the foundation and the columns of the aforementioned building models, and the behaviours of the seismic isolated building models is compared with the fixed support building models. The findings from the structural analyses reveal that with the increase in the ground storey height in seismic isolator building models, the base shear force values and the relative storey drifts on the upper storeys decreased significantly compared to the fixed support building models and, the period values and storey displacements did not increase significantly. These findings show that seismic isolators can be used as an alternative in terms of the safety and earthquake performance of reinforced concrete buildings to be constructed in areas with high earthquake hazard.

Key Words

"Reinforced concrete structures, building period, seismic isolation, soft storey irregularity, ground storey height"

***Sorumlu Yazar:** sgursoy@karabuk.edu.tr*

1. Giriş

Depreme dayanıklı yapı tasarımında taşıyıcı sistemi oluşturan yapısal elemanların, deprem yüklerini temel zeminine kesintisiz ve güvenli olarak aktaracak yeterli rijitlik, dayanım ve süneklik koşullarına sahip olmaları gerekmektedir. Ancak Türkiye'deki mevcut yapı stoğunu oluşturan az ve orta katlı betonarme binalarda, ticari ve estetik kaygılar, imar durumu, mal sahibinin istekleri ve alan yetersizliği vb. gibi etmenler nedeniyle zemin katların yüksekliği genellikle normal katlara göre daha fazla olabilmektedir. Bu husus da komşu katlar arasında düzensiz bir rijitlik dağılımına neden olmaktadır (Korkmaz ve Uçar, 2006; Kirac, *et al.* 2011; İnan *et al.* 2014; Gürsoy *et al.* 2015*;* Gürsoy ve Öz, 2016; Çağlar *et al.* 2016; Garip ve Dibekoğlu, 2023). Diğer bir ifadeyle zemin kat düşey taşıyıcı elemanlarının, üst katlara göre daha düşük rijitliğe sahip olması nedeniyle depremler sırasında zemin katlar, üst katlara göre daha fazla yerdeğiştirme yapmaktadır. Bu durum Ocak 2019'da yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY) *yumuşak kat (rijitlik) düzensizliği* olarak ifade edilmektedir (TBDY, 2019).

Günümüzde depreme dayanıklı tasarım yaklaşımında yapının, zeminden gelen dinamik etkileri dolayısıyla şekil değiştirme enerjisini, elastik ötesi davranış göstererek sönümlediği kabul edilmektedir. Buna göre, taşıyıcı sistemde plastik mafsallar oluşmakta dolayısıyla da söz konusu yapıda kalıcı hasarların oluşmasına izin verilmektedir (Komodromos, 2000). Ancak depremler sonrası kesintisiz hizmet vermesi gereken yapıların tasarımında (hastaneler, telekominasyon merkezleri, nükleer santraller, afet koordinasyon merkezleri vb. gibi) plastik mafsalların oluşumuna izin verilmemektedir. Bu durum söz konusu yapıların ekonomiklikten uzaklaşılmasına neden olmaktadır. Diğer taraftan teknolojinin gelişimiyle birlikte geleneksel depreme dayanıklı yapı tasarımına alternatif olarak *sismik izolasyon sistemleri* geliştirilmiştir. Günümüzde dünyanın birçok bölgesinde sismik izolasyon sistemleri dolayısıyla da bunlara ilişkin tasarım yöntemleri başarıyla uygulanmaktadır (bkz. Çizelge 1). Bunlardan kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler, yüksek sönümlü kauçuk izolatörler ve sürtünmeli sarkaç izolatörler en yaygın olarak kullanılanlardır. 1994 Ocak ayı itibariyle ABD'de kullanılan izolatörlerin %69'u kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerden, %23'u yüksek sönümlü kauçuk izolatörlerden ve %8'i de sürtünmeli sarkaç izolatörlerden oluşmaktadır (Komodromos, 2000). Sismik izolasyon uygulamasında LRB'nin kullanıldığı binalar, 1994 Northridge ve 1995 Kobe depremlerinde iyi performans gösterdikleri ifade edilmiştir (Özpalanlar, 2004). Deprem performansı, kolay montajı ve yapım maliyetleri göz önüne alındığında bu çalışma kapsamında sismik izolasyonlu oluşturulan bina modellerinde kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler kullanılmıştır.

Çizelge 1. Sismik izolasyon sistemlerinin sınıflandırılması

Kauçuk Esaslı Sistemler	Kayma Esaslı Sistemler	Yay Esaslı Sistemler
1) Düşük sönümlü kauçuk izolatörler (LDRB-Low damping rubber bearing)	1) Sürtünmeli sarkaç izolatörler (FPS-Friction pendulum system)	
2) Yüksek sönümlü kauçuk izolatörler (HDRB-High damping rubber bearing)	2) Esnek sürtünmeli taban izolatör sistemi (R-FBI-Resilient friction base isolation)	
3) Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler (LRB-Lead rubber bearing)	3)Fransız elektrik kurumu sistemi	
	4) TASS sistemi	
	5) EERC birleşik sistem	

Sismik izolasyon sistemlerinin çalışma mantığı, yapıların dinamik davranışlarını değiştirerek depremler sırasında yapıya etkiyen yüklerin, özellikle spektral ivmelerin, azaltılması ilkesine dayanmaktadır. Bu sistemlerle yapıların periyod, yer değiştirme ve sönüm gibi dinamik özellikleri değiştirilerek depremlerin yıkıcı etkileri azaltılabilmektedir (Yücesoy, 2005; Şengel *et al.* 2009).

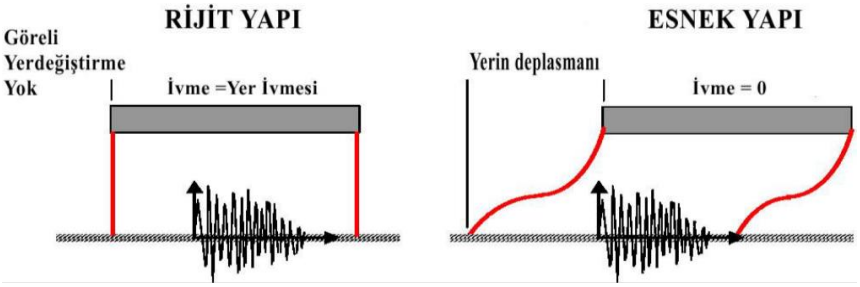
Bu çalışmada, farklı kat adedi ve kat alanları dikkate alınarak oluşturulan üç farklı forma sahip ankastre mesnetli ve sismik izolasyonlu betonarme binalarda, zemin kat yüksekliğindeki artış miktarının yapısal davranışa etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmektedir.

2. Sismik İzolasyon Sistemleri

Artan nüfusun, yaşam ve barınma ihtiyaçlarını karşılayabilmek amacıyla çok katlı komplike yapılara talep her geçen gün artmaktadır. Bu durum yapı mühendisliği açısından bazı problemlerin oluşmasına sebebiyet vermektedir. Çünkü geleneksel depreme dayanıklı yapı tasarımının en büyük problemi, katlar arası ötelenmelerin ve kat ivmelerinin nasıl azaltılacağıdır. Bu amaçla geleneksel yöntemlerde yapının rijitliğinin artırılmasıyla göreli kat ötelenmelerinin azaltılması sağlanmaktadır. Ancak bu durum depremlerin yapılar üzerindeki etkilerini daha da artırmakta dolayısıyla buna bağlı olarak kat ivmelerinin artmasına neden olmaktadır (bkz. Şekil 1). Diğer taraftan yapının sünek tasarlanmasıyla kat ivmeleri azaltılabilmekte, ancak bu durum da söz konusu yapıdaki göreli kat ötelenmelerini arttırmaktadır (Naeim and Kelly, 1999).

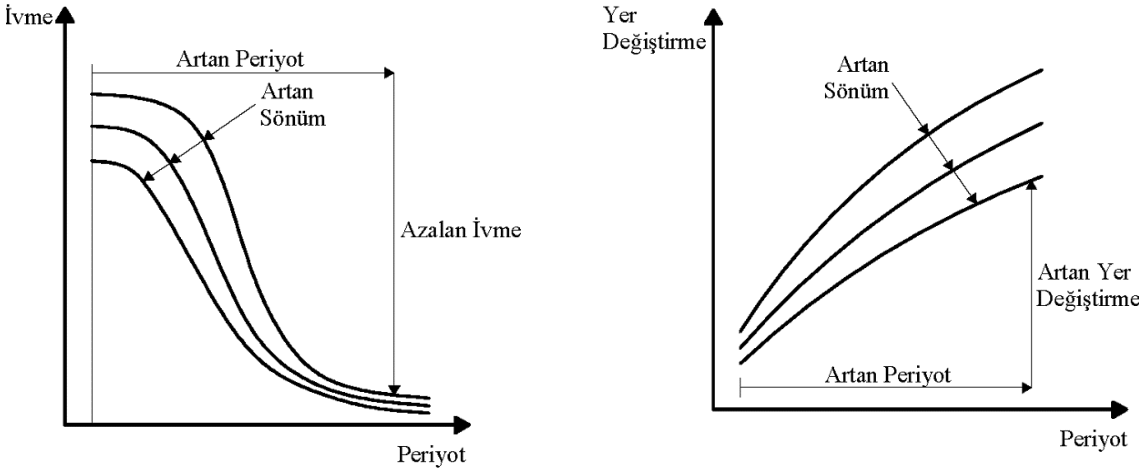
Teknolojinin gelişmesiyle birlikte geleneksel depreme dayanıklı yapı tasarımına alternatif olarak hem göreli kat ötelenmelerini hem de kat ivmelerini eş zamanlı olarak azaltmayı amaçlayan yapısal kontrol sistemleri olarak adlandırılan mekanizmalar geliştirilmiştir. Teknik literatürde yapısal kontrol sistemleri, aktif ve pasif kontrol sistemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Bunlardan pasif kontrol sistemlerinden biri olan sismik izolasyon sistemleri, genellikle yapı ile temel arasına yerleştirilmektedir. Bunlar, düşey doğrultudaki rijitliği yüksek ve yatay doğrultuda ise yer değiştirme yapmasına izin verilen sismik izolatörler vasıtasıyla yapı ile zemin arasındaki etkileşimi sınırlandıran yapısal sistemlerdir. İzolatörler, yapının temeline yerleştirilebileceği gibi yapının farklı bölgelerine de (katlar arası, kolon ortası, çatı vb.) yerleştirilebilmektedir. Sismik izolasyon sistemleri, yapının depreme karşı koyma kapasitesini arttırmak yerine izolatörler vasıtasıyla yapının doğal periyodunu arttırmayı dolayısıyla üst yapıya gelen deprem

yüklerini azaltmayı amaçlayan yapısal sistemlerdir. Diğer bir ifadeyle sismik izolasyon sistemleri, yapıların titreşim frekansını aynı taşıyıcı sistem özelliklerine sahip ankastre mesnetli yapıların titreşim frekansına ve depremin hakim frekansına göre azaltmaktadırlar. Ayrıca ankastre mesnetli yapılarda hakim periyot düşük olduğundan, söz konusu yapının yüksek frekanslı yer hareketi sırasında rezonansa girme olasılığı da yüksek olmaktadır. Diğer bir ifadeyle bu tür yapılar genellikle deprem sırasında zeminden aktarılan ivmeleri yükseklikleri boyunca arttırmaktadır. Bu durum, göreli kat ötelenmelerinin ve kat ivmelerinin artmasına neden olmaktadır. Diğer taraftan sismik izolasyonlu yapıların toplam kütle katılım modunda (hakim modlarda) söz konusu yapı salınım yaparken hemen hemen tüm yer değiştirmeler izolasyon seviyesinde gerçekleşmekte ve üst yapı rijit bir kütle olarak hareket etmektedir. Böylece ankastre mesnetli yapılarda karşılaşılan problemler ortadan kaldırılmış olmaktadır (Zayas *et al.* 1999; Ryan ve Chopra, 2004; Soyluk ve Tuna, 2011; Toprak, 2012; Çavdar ve Özdemir, 2018; Güneş ve Ulucan, 2020; Özer ve İnel, 2021; Alasaf ve Öztürk, 2022; Öztürk, 2022;).



Şekil 1. Rijit ve esnek yapıların deprem yükleri altında davranışları (Özpalanlar, 2004)

Sismik izolasyon uygulanan yapılarda, katlar arası yer değiştirme oranı minimum seviyelere düştüğünden yapısal ve yapısal olmayan elemanlardaki şekil değişimlerin minimum seviyede kaldığı dolayısıyla da yapısal elemanların depremlerin yatay kuvvetinden ve ivmelenmeden minimum seviyede etkilendikleri gözlenmiştir (Yücesoy, 2005). Sonuç olarak yapının periyodunun artması nedeniyle yüksek titreşim periyotlarında söz konusu yapıya etkiyen ivmeler azalmaktadır (bkz. Şekil 2). Böylece yapı daha fazla yer değiştirme yapabilmekte dolayısıyla yapının enerji yutma kapasitesini arttırmaktadır.



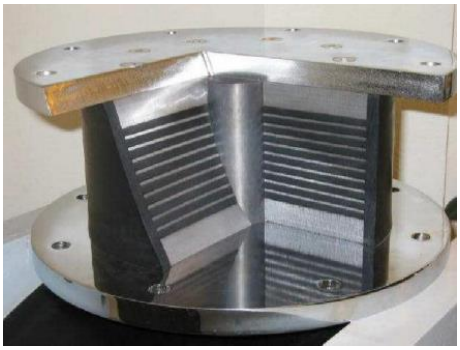
a) Yapının periyot-ivme ilişkisi

b) Yapının periyot-yer değiştirme ilişkisi

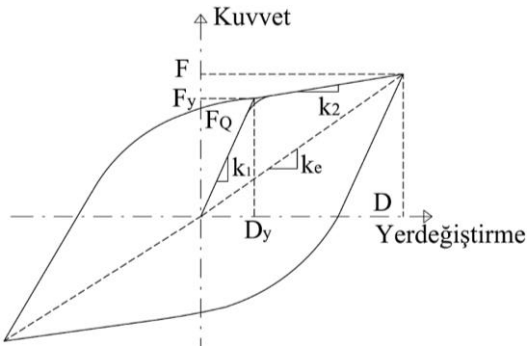
Şekil 2. Sönüme bağlı olarak yapının periyot-ivme ve periyot-yer değiştirme ilişkileri (Batur, 2005).

2.1. Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatör

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler, ilk olarak 1975 yılında Yeni Zelanda'da icat edilmiş olup, günümüzde birçok ülkede yaygın olarak kullanılmaktadır (Naeim and Kelly, 1999). Bu izolatörler kauçuk ve çelik tabakaların birbirleri ile birleştirilmesiyle üretilmektedir. Ayrıca bu izolatörlerde, enerji dağılımında ek rijitlik sağlanması amacıyla merkezinde en az bir adet kurşun çekirdek bulunmaktadır (bkz. Şekil 3). Söz konusu kurşun çekirdeğin çapı da, taşıyıcı sistemin sismik ihtiyaçlarına göre belirlenmektedir. LRB'lerde sönüm gereksinimi büyük oranda kurşun çekirdekle karşılandığından, kauçuğun kayma modülü düşük tutulmaktadır. Bu sayede yatay doğrultuda oldukça sünek ve doğrusal bir davranış elde edilebilmektedir (Komodromos, 2000). Diğer taraftan merkezde bulunan kurşun çekirdek, söz konusu izolatör sistemine yaklaşık 10 MPa'lık bir akma dayanımı kazandırmaktadır. Ancak bu değerin aşılması durumunda kurşun çekirdekte akma meydana gelmekte ve plastik şekil değiştirmeler başlamaktadır (bkz. Şekil 4). Ayrıca kurşun ve kauçuğun birlikte çalışmasından dolayı, başlangıçta küçük bir bölgede elastik davranış görülmekte, daha sonra pekleşen plastik davranış durumu gösteren şekil değiştirmeler ortaya çıkmaktadır (Celep, 2019; Komodromos, 2000).



Şekil 3. Tipik LRB kesitinden bir görünüm (Özpalanlar, 2004)



Şekil 4. LRB kuvvet-yer değiştirme eğrisi (TBDY, 2019)

Şekil 4'te F_Q LRB'nin karakteristik dayanımını, k_1 LRB'nin başlangıç (elastik) rijitliğini, k_2 LRB'nin elastik ötesi rijitlik rijitliğini, k_e D yer değiştirmesine karşılık gelen etkin rijitliği, F D yer değiştirmesine karşılık gelen yatay kuvveti, F_y etkin akma dayanımını ve D_y LRB'nin etkin akma yer değiştirmesini göstermektedir.

3. Yapısal Modeller ve Analiz

Bu çalışmada, farklı bina formuna sahip betonarme binalarda zemin kat yüksekliğindeki çeşitli oranlarda artış miktarının yapısal davranışa etkileri, ankastre mesnetli ve sismik izolasyonlu bina modelleri çerçevesinde karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. Bu kapsamda, önce toplam kat alanları sabit tutularak elde edilen üç farklı bina formuna sahip betonarme bina modelleri oluşturulmuştur. Daha sonra söz konusu betonarme bina modellerinin temeli ile zemin kat kolonları arasına kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler yerleştirilerek, binaların yapısal davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu incelemede, izolatörlerin mekanik tasarımında TBDY-2019'da önerilen tasarım koşulları dikkate alınmıştır. Oluşturulan bina modellerinin yapısal çözümlemeleri ise TBDY-2019'daki kurallara uygun olarak mod birleştime yöntemine göre Sta4-Cad programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir (Sta4-Cad, 2021).

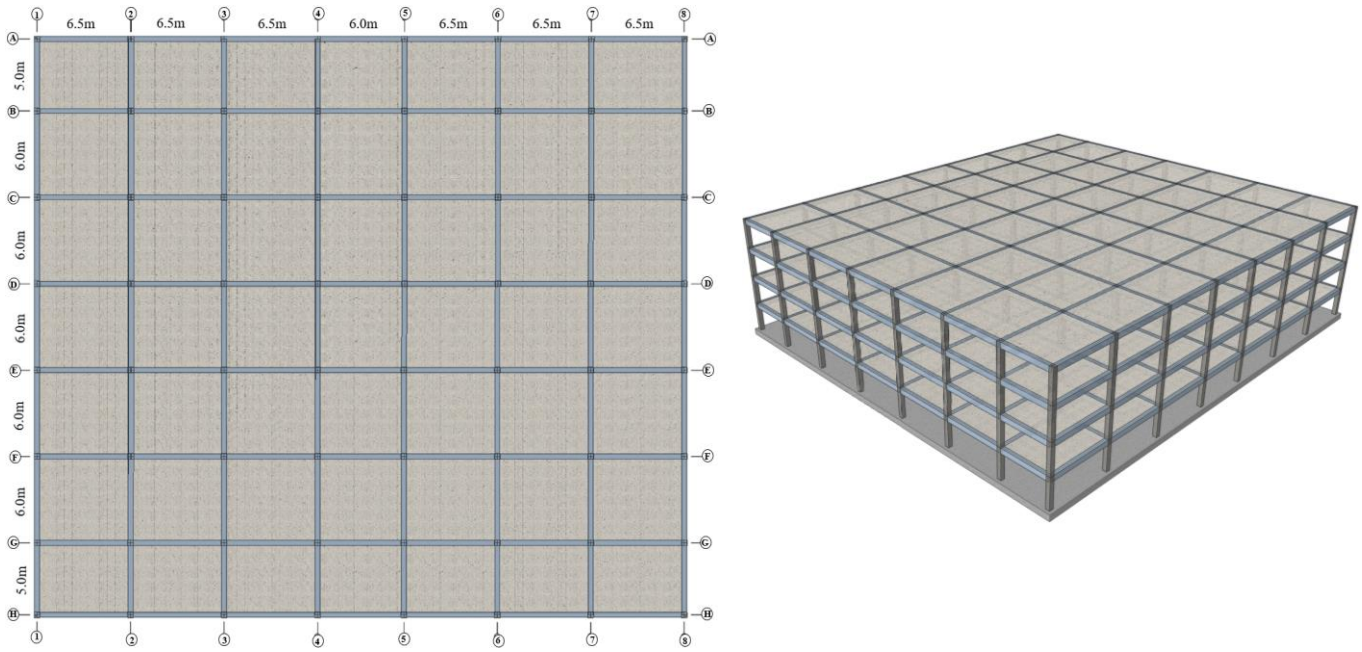
3.1. Ankastre Mesnetli ve Sismik İzolasyonlu Bina Modellerinin Oluşturulması

Çalışma kapsamında, toplam kat alanları sabit tutularak farklı yapı formları elde edilmiştir. Bu amaçla 4, 8 ve 12 kattan oluşan ve kat alanları sırasıyla 1800, 900 ve 600 m² (toplam kat alanları 7200 m²) olan betonarme bina modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bina modellerinin yapısal davranışa etkilerini ortaya koyabilmek amacıyla tüm bina modellerinde taşıyıcı sistem elemanlarının boyutları aynı seçilmiştir. Söz konusu bina modellerinde, beton sınıfı C30, çelik sınıfı B420C, kolon boyutları 50x50 cm, kiriş boyutları 30x50 cm ve döşeme kalınlıkları 15 cm ve döşeme kaplama yükü 5,87 kN/m^2 olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca bina modellerinin bulunduğu (41.2060˚ enlem ve 32.6598˚ boylam) bölgenin zemin sınıfı (ZA), zemin yatak katsayısı 1000000 kN/m^3 ve zemin taşıma gücü gerilmesi ise 2800 kN/m^2 seçilmiştir (Özkan, 2022). Diğer taraftan bina modellerinin yumuşak kat düzensizliği etkilerini ortaya koymak amacıyla, normal katlarında kat yükseklikliği 3m olan modellerin, zemin kat yükseklikleri sırasıyla 3m'den 4, 5 ve 6m'ye kadar artırılmıştır. Bugün yürürlükteki TBDY, betonarme yapıların yapım ve yük yönetmelikleri de dikkate alınarak (TS498, 1997; TS500, 2000) oluşturulan bina modellerin özellikleri Çizelge 2'de özetlenmektedir. Bu çizelgede bina modelleri isimlerindeki ilk harf, binanın hangi kat planına sahip olduğunu, harf sonrasında gelen sayı binanın kat adedini, ondan sonraki sayı zemin kat yüksekliğini ifade etmektedir. Ayrıca bina model isimlerinde bulunan 'İ' harfi ise binanın sismik izolasyonlu olduğunu göstermektedir. Söz konusu bina modellerine ilişkin kalıp planları ve 3 boyutlu görünüşleri sırasıyla Şekil 5~Şekil 7'de verilmektedir.

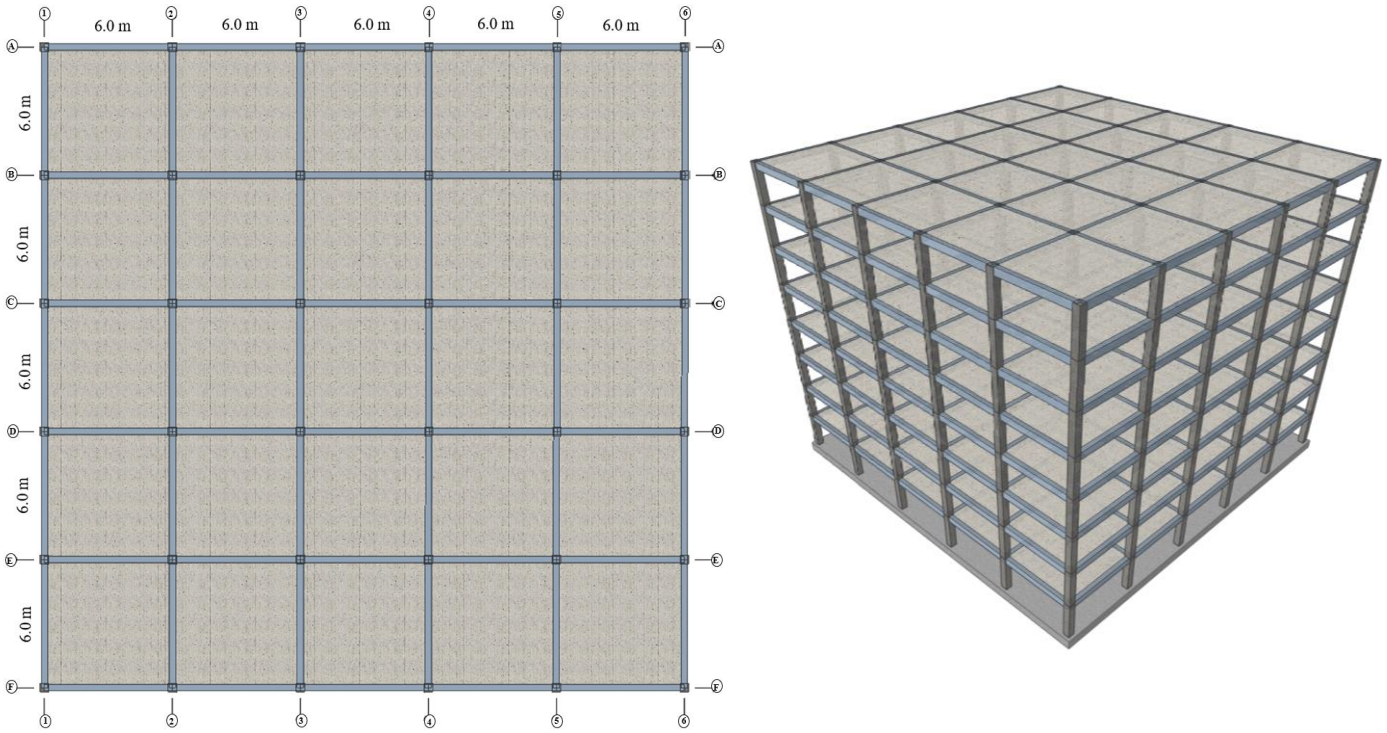
Burada az katlı, orta yükseklikli ve çok katlı farklı bina formlarını ortak payda da buluşturabilmek amacıyla toplam kat alanlarının sabit tutulduğunu ve kat adetlerinin buna göre belirlendiğini belirtmek yararlı olacaktır.

Çizelge 2. Oluşturulan Bina Modellerinin Listesi

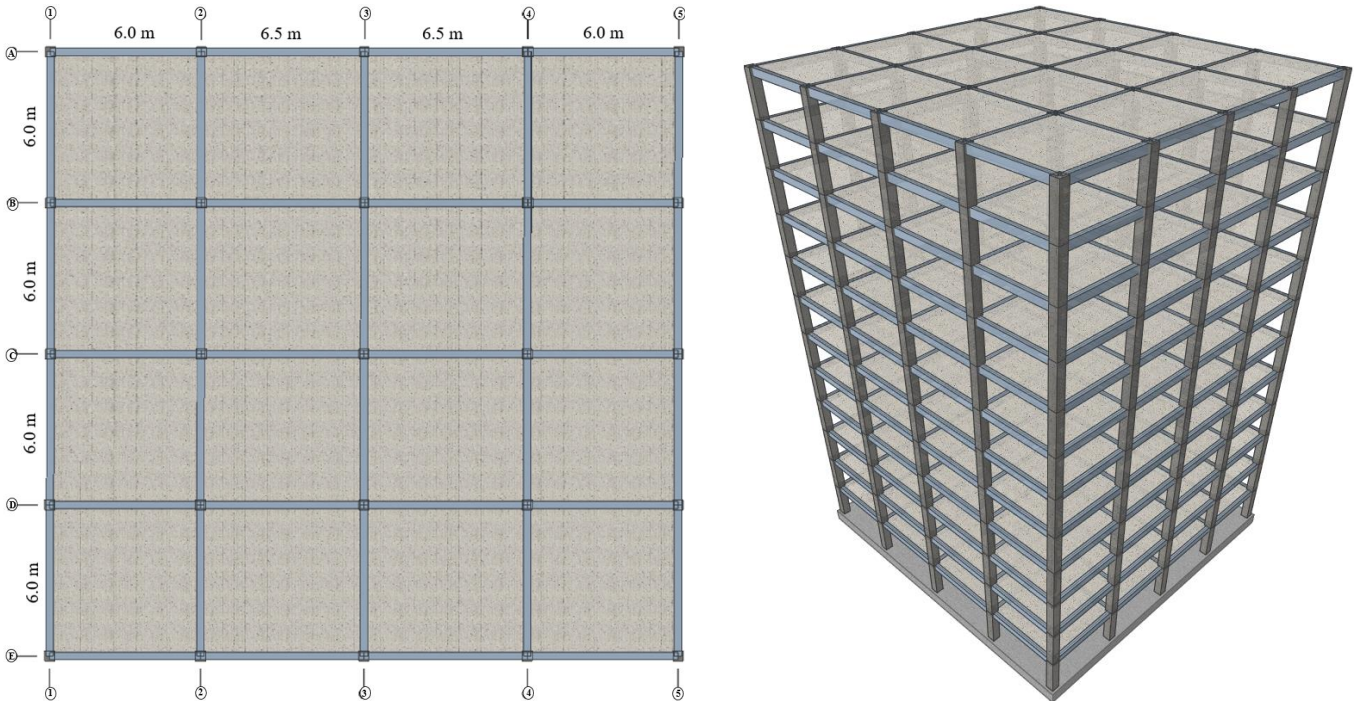
Model Adı	Kat Adedi	H_{zemin} (m)	H_{normal} (m)	Kat Alanı (m²)	Toplam Kat Alanı (m²)	Mesnet Tipi
A4-3	4	3	3	1800	7200	Ankastre
A4-4	4	4	3	1800	7200	
A4-5	4	5	3	1800	7200	
A4-6	4	6	3	1800	7200	
A4-3-İ	4	3	3	1800	7200	İzolatörlü
A4-4-İ	4	4	3	1800	7200	
A4-5-İ	4	5	3	1800	7200	
A4-6-İ	4	6	3	1800	7200	
B8-3	8	3	3	900	7200	Ankastre
B8-4	8	4	3	900	7200	
B8-5	8	5	3	900	7200	
B8-6	8	6	3	900	7200	
B8-3-İ	8	3	3	900	7200	İzolatörlü
B8-4-İ	8	4	3	900	7200	
B8-5-İ	8	5	3	900	7200	
B8-6-İ	8	6	3	900	7200	
C12-3	12	3	3	600	7200	Ankastre
C12-4	12	4	3	600	7200	
C12-5	12	5	3	600	7200	
C12-6	12	6	3	600	7200	
C12-3-İ	12	3	3	600	7200	İzolatörlü
C12-4-İ	12	4	3	600	7200	
C12-5-İ	12	5	3	600	7200	
C12-6-İ	12	6	3	600	7200	



Şekil 5. A4 Bina Modellerine İlişkin Kalıp Planı ve 3 Boyutlu Görünüm



Şekil 6. B8 Bina Modellerine İlişkin Kalıp Planı ve 3 Boyutlu Görünüm



Şekil 7. C12 Bina Modellerine İlişkin Kalıp Planı ve 3 Boyutlu Görünüm

Ankastre mesnetli olarak modellenen 4, 8 ve 12 katlı bina modellerinde kullanılacak sismik izolatörlerin tasarımı TBDY'de ve uluslararası standartlarda belirtilen tasarım esasları dikkate alınarak yapılmıştır (bkz. Çizelge 3). İzolatörlerin tasarımları, izolasyonlu binaların hedeflenen periyot değerlerine göre gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, 4 katlı bina modelleri için hedeflenen izolasyon periyodu 2s, 8 katlı bina modelleri için hedeflenen izolasyon periyodu 3s ve 12 katlı bina modelleri için hedeflenen izolasyon periyodu ise 4s alınarak sayısal işlemler gerçekleştirilmiş ve söz konusu bina modellerinde kullanılacak kurşun çekirdekli izolatörlerin tasarımları yapılmıştır (Özkan, 2022). Ön tasarımı yapılan bina modellerinde kullanılacak izolatörlerin üzerine gelen eksenel yük olarak bina ağırlığı (G+0,3Q) dikkate alınmıştır. Ayrıca DD1 deprem düzeyi etkileri dikkate alınarak tasarlanan izolatörlerin depremli ve depremsiz durumlar için kararlılık hesapları da yapılmıştır. Oluşturulan bina modellerinde izolatörler söz

konusu binaların temeli ile zemin kat kolonları arasına yerleştirilmiş ve DD1 ve DD2 deprem düzeyleri etkileri dikkate alınarak mod birleştirme yöntemine göre yapısal çözümlemeleri gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3. Tasarımı Yapılan İzolatörlere İlişkin Mekanik Özellikleri

			Bina Modelleri		
İzolatör Özellikleri	**Sembol**	**Birim**	**A4**	**B8**	**C12**
İzolatör adedi	n	-	64	36	25
Hedeflenen etkin titreşim periyodu (DD1)	T_M	s	2	3	4
Hedeflenen etkin sönüm oranı	β_e	-	0,2	0,2	0,2
Maksimum izolatör yer değiştirmesi (DD1)	D_M	m	0,1467	0,2188	0,2942
Kurşun çekirdek çapı	B_L	m	0,08	0,087	0,09
Kauçuk kayma modülü	G_v	kN/m^2	500	500	500
Çelik plaka ile yapışmış kauçuğun çapı	B	m	0,42	0,46	0,48
Tek bir kauçuk katmanının yüzey alanı toplamı	A_r	m^2	0,1335	0,16025	0,174594
Toplam kauçuk tabaka kalınlığı	T_r	m	0,1	0,15	0,2
Bir adet kauçuk tabaka kalınlığı	t	m	0,005	0,005	0,005
İzolatör karakteristik dayanım	F_Q	kN	50,266	59,444	63,616
Etkin akma yer değiştirmesi	D_y	m	0,00821	0,0123	0,01641
İzolatör etkin akma dayanımı	F_y	kN	55,747	66,014	70,779
İzolatör elastik ötesi rijitliği	k_2	kN/m	667,588	534,167	436,485
Elastik ötesi rijitlik / elastik rijitlik	k_2/k_1	-	0,1	0,1	0,1
Elastik rijitlik	k_1	kN/m	6675,88	5341,67	4364,85
Etkin rijitlik	k_e	kN/m	1010,23	805,849	652,719
Toplam etkin rijitlik	$\sum k_e$	kN/m	64654,74	29010,56	16317,971
Şekil faktörü	S	-	20,238	22,177	23,156
Düşey rijitlik	K_v	kN/m	881045,66	793850,407	684217,121
Toplam düşey rijitlik	$\sum K_v$	kN/m	56386922,2	28578614,7	17105428,03

4. Bulgular ve İrdelemeler

4.1. Periyot Değerleri

Toplam kat alanları sabit tutularak oluşturulan sismik izolatörlü ve ankastre mesnetli bina modellerinin gerçekleştirilen yapısal çözümlemelerinden elde edilen 1. doğal titreşim periyodu değerleri Çizelge 4'te verilmektedir. Bu çizelgeden ankastre mesnetli bina modellerinde zemin kat yüksekliği arttıkça söz konusu binanın periyodunun da arttığı görülmektedir. Sismik izolatörlü bina modellerinde ise zemin kat yüksekliğindeki artış miktarının yapı periyodunu çok etkilemediği görülmüştür. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör kullanılarak oluşturulan A4 ve B8 bina modellerine ilişkin doğal titreşim periyodu değerlerinin, hedeflenen tasarım periyot değerlerine ulaştığı, ancak 12 katlı olan C12 bina modellerine ilişkin doğal titreşim periyodu değerinin hedeflenen periyot değeri olan 4 s'yi az da olsa aştığı görülmektedir. Diğer bir ifadeyle sismik izolasyonlu bina modellerinde kat adedinin artmasıyla taşıyıcı sistemin periyodu hedeflenen periyot değerinden uzaklaşmaktadır.

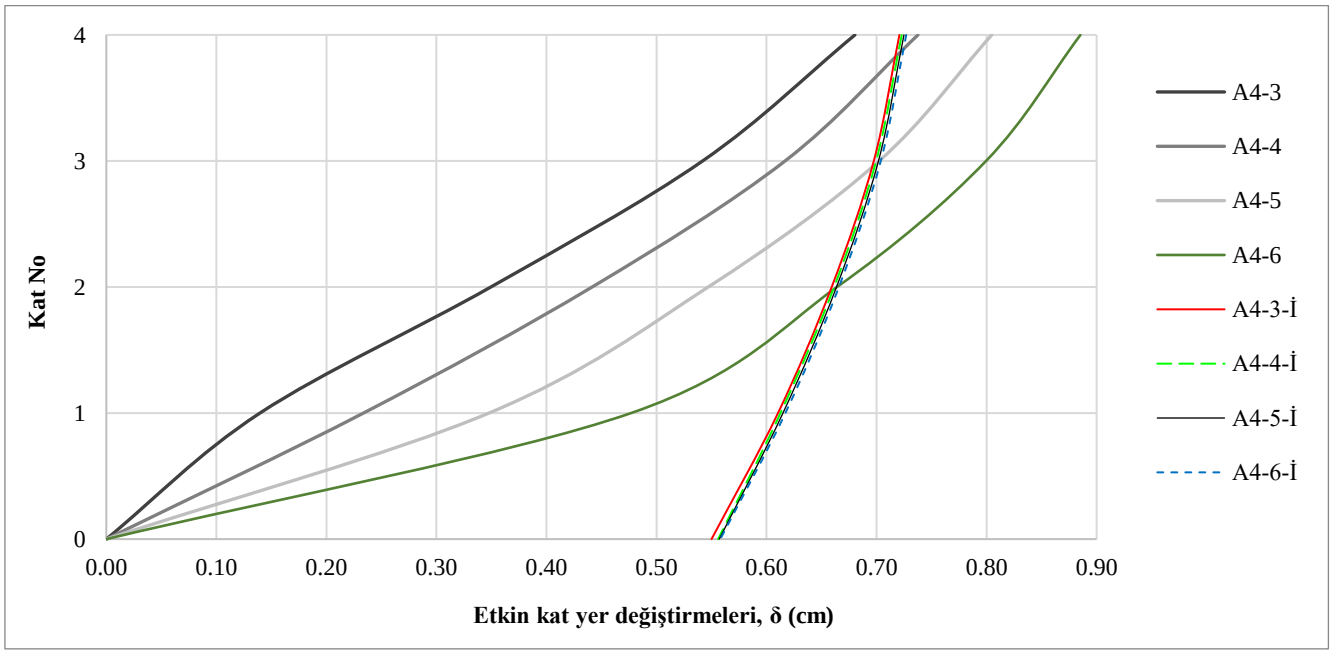
Çizelge 4. Toplam Kat Alanı Sabit Tutularak Oluşturulan Ankastre Mesnetli ve Sismik İzolatörlü Bina Modellerine İlişkin Periyot Değerleri

Ankastre mesnetli bina modelleri periyotları (s)			Sismik izolatörlü bina modelleri periyotları (s)		
Bina modelleri	x doğrultusu	y doğrultusu	Bina modelleri	x doğrultusu	y doğrultusu
A4-3	0,7881	0,7393	A4-3-İ	1,957	1,9406
A4-4	0,894	0,843	A4-4-İ	1,9621	1,9459
A4-5	1,029	0,977	A4-5-İ	1,9673	1,9511
A4-6	1,1922	1,1398	A4-6-İ	1,9724	1,9563
B8-3	1,5481	1,5481	B8-3-İ	3,0788	3,0788
B8-4	1,6516	1,6516	B8-4-İ	3,0825	3,0825
B8-5	1,7872	1,7872	B8-5-İ	3,0861	3,0861
B8-6	1,9584	1,9584	B8-6-İ	3,0898	3,0898
C12-3	2,3898	2,3646	C12-3-İ	4,2843	4,2712
C12-4	2,4931	2,4674	C12-4-İ	4,2873	4,2742
C12-5	2,6283	2,6024	C12-5-İ	4,2903	4,2772
C12-6	2,8007	2,7749	C12-6-İ	4,2933	4,2802

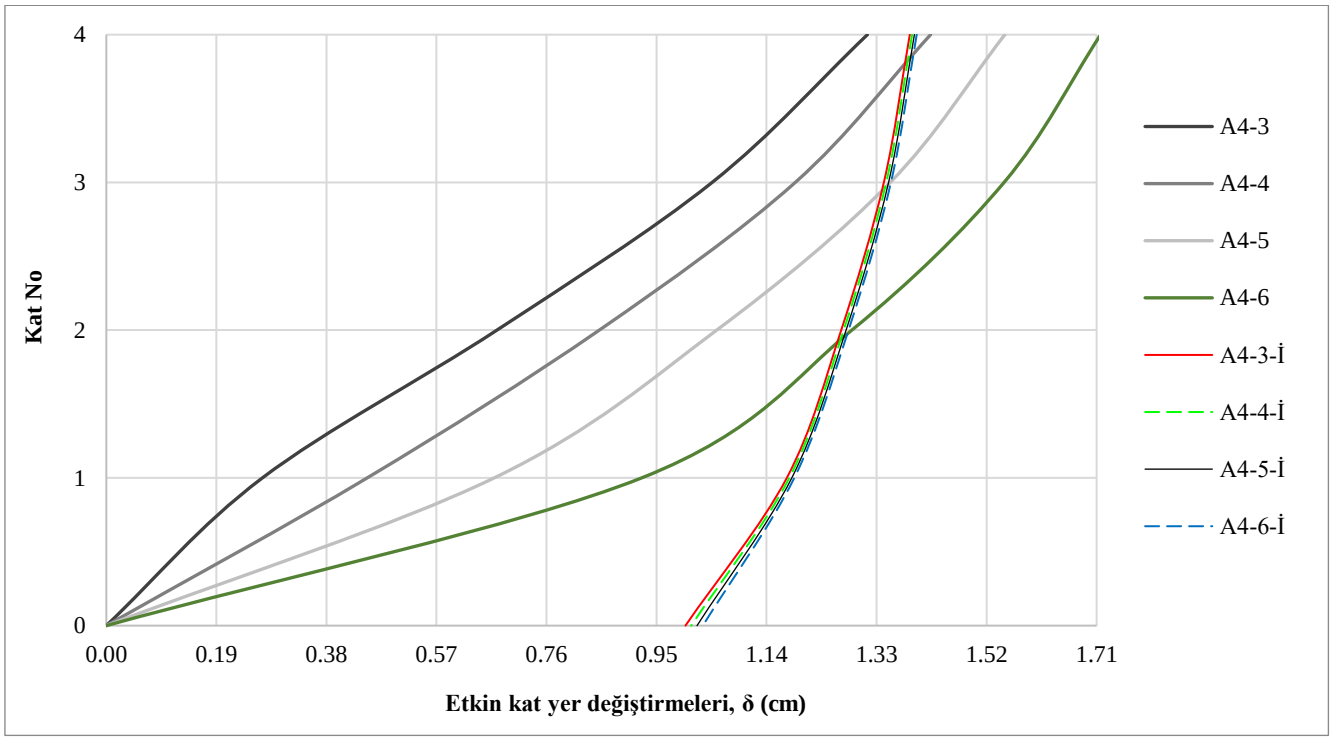
4.2. Kat Yer Değiştirmeleri

Bu makalede dikkate alınan deprem düzeyleri için söz konusu bina modellerinin etkin kat yer değiştirmeleri sırasıyla Şekil 8~Şekil 13'te verilmektedir. Bu şekillerden 3 farklı bina formuna sahip ankastre mesnetli bina modellerinde zemin kat yüksekliğinin artmasıyla oluşan etkin kat yer değiştirmelerinin arttırdığı görülmektedir. Buna karşın sismik izolasyonlu bina modellerinde ise,

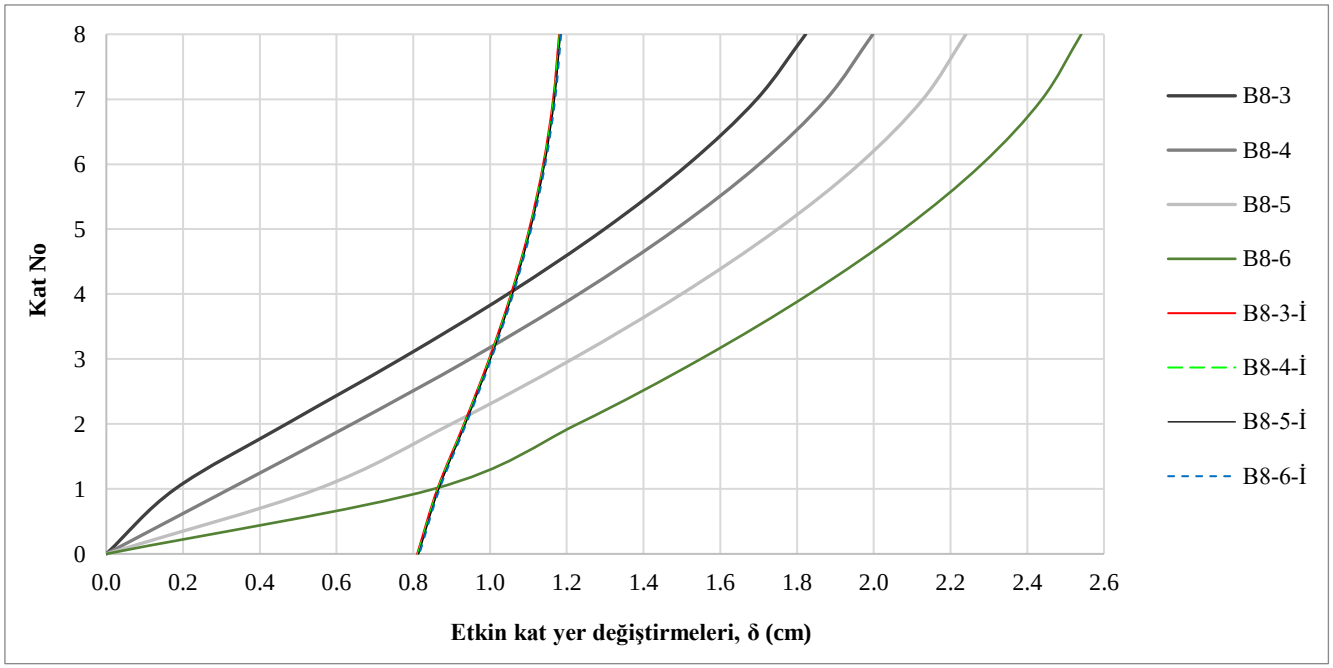
söz konusu bina modelleri rijit olarak hareket ettiğinden, katlar arası yer değişme farkı ankstre mesnetli bina modellerine göre önemli ölçüde azalmaktadır. Ayrıca sismik izolasyonlu bina modellerinde tepe noktası yer değiştirmeleri, özellikle zemin kat yüksekliğinin artmasıyla, ankastre bina modellerine kıyasla daha az olmaktadır. Diğer taraftan kat adedinin arttığı sismik izolasyonlu bina modellerinde tepe noktası yer değiştirmeleri daha az olduğu görülmektedir. Kat yer değiştirmeleri bakımından elde edilen bu bulgu artan kat adetlerinde sismik izolasyonlu bina modellerinin daha iyi davranış gösterdiğini ortaya koymaktadır.



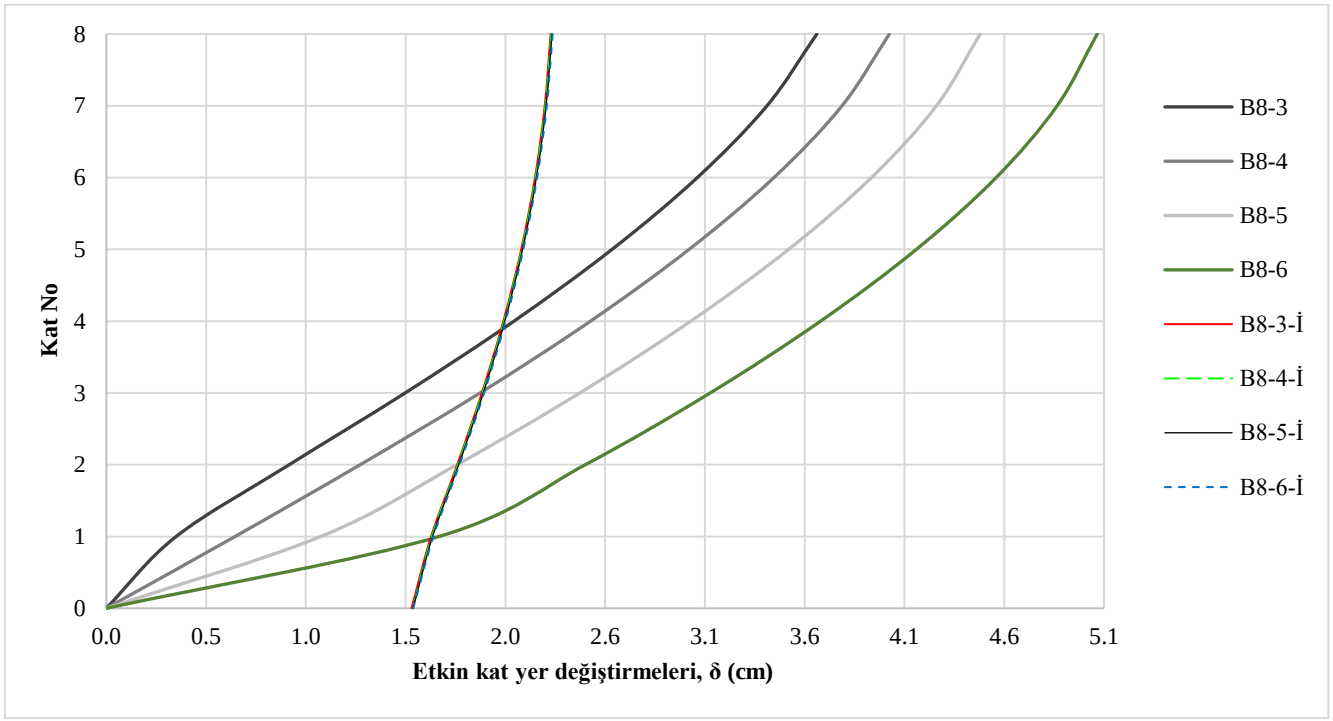
Şekil 8. DD2 Deprem Düzeyinde A4 Bina Modellerinin Maksimum Kat Yer Değiştirmeleri



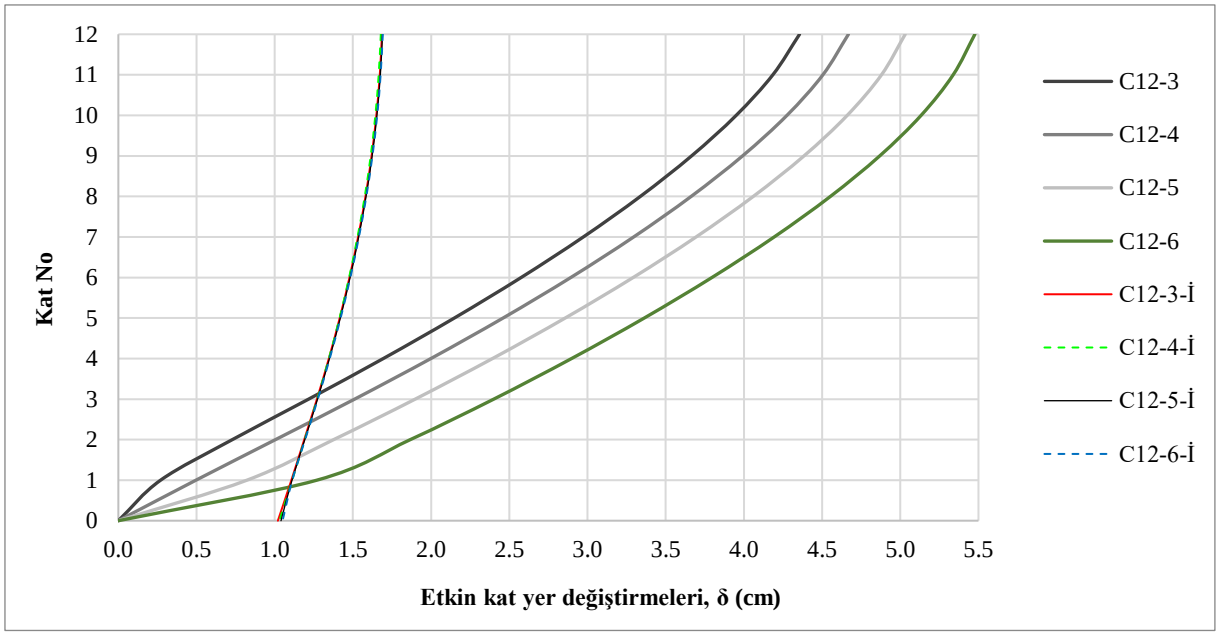
Şekil 9. DD1 Deprem Düzeyinde A4 Bina Modellerinin Maksimum Kat Yer Değiştirmeleri



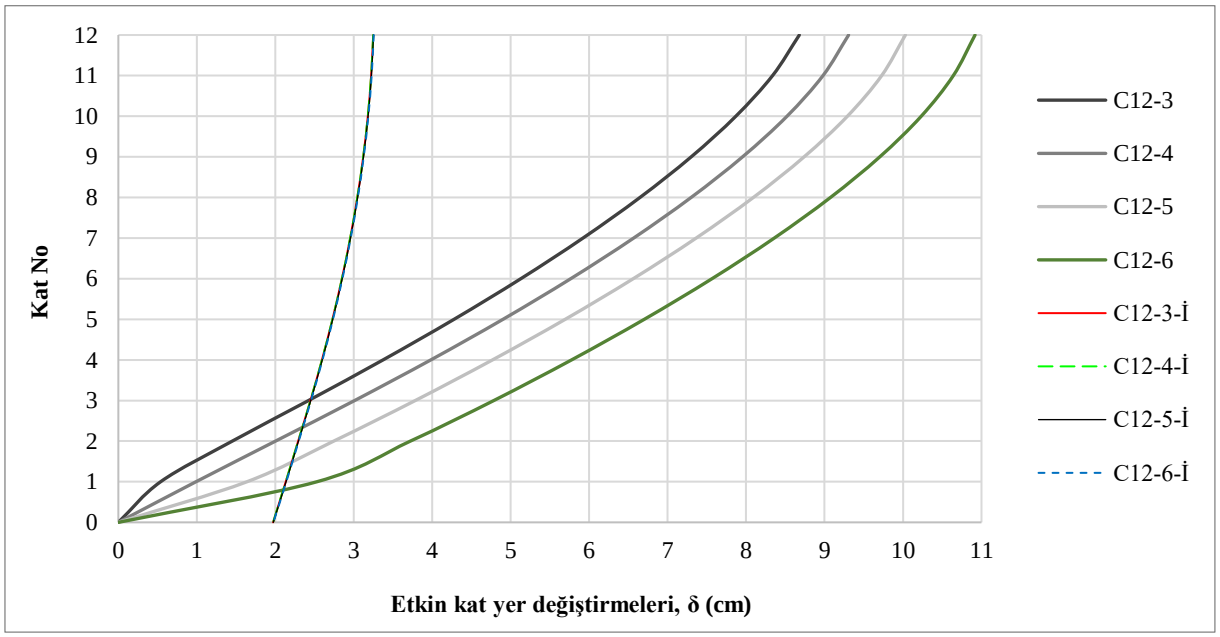
Şekil 10. DD2 Deprem Düzeyinde B8 Bina Modellerinin Maksimum Kat Yer Değiştirmeleri



Şekil 11. DD1 Deprem Düzeyinde B8 Bina Modellerinin Maksimum Kat Yer Değiştirmeleri



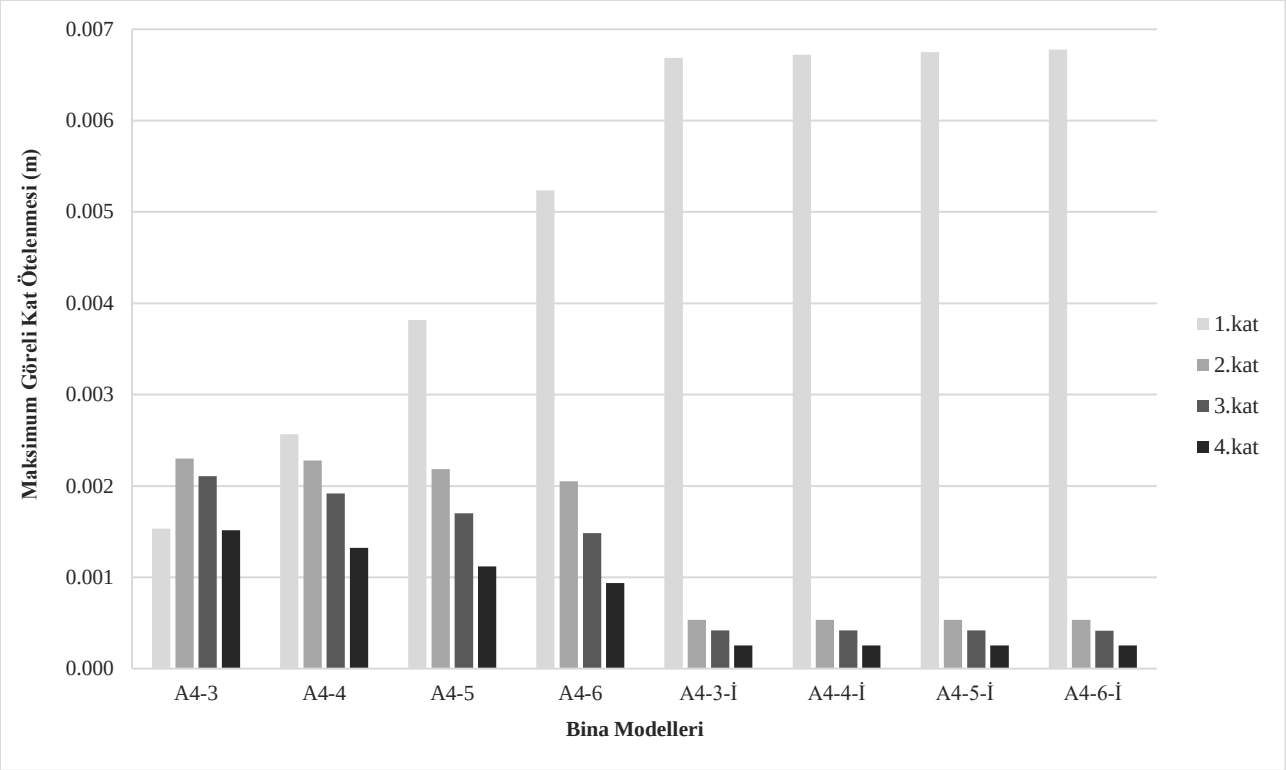
Şekil 12. DD2 Deprem Düzeyinde C12 Bina Modellerinin Maksimum Kat Yer Değiştirmeleri



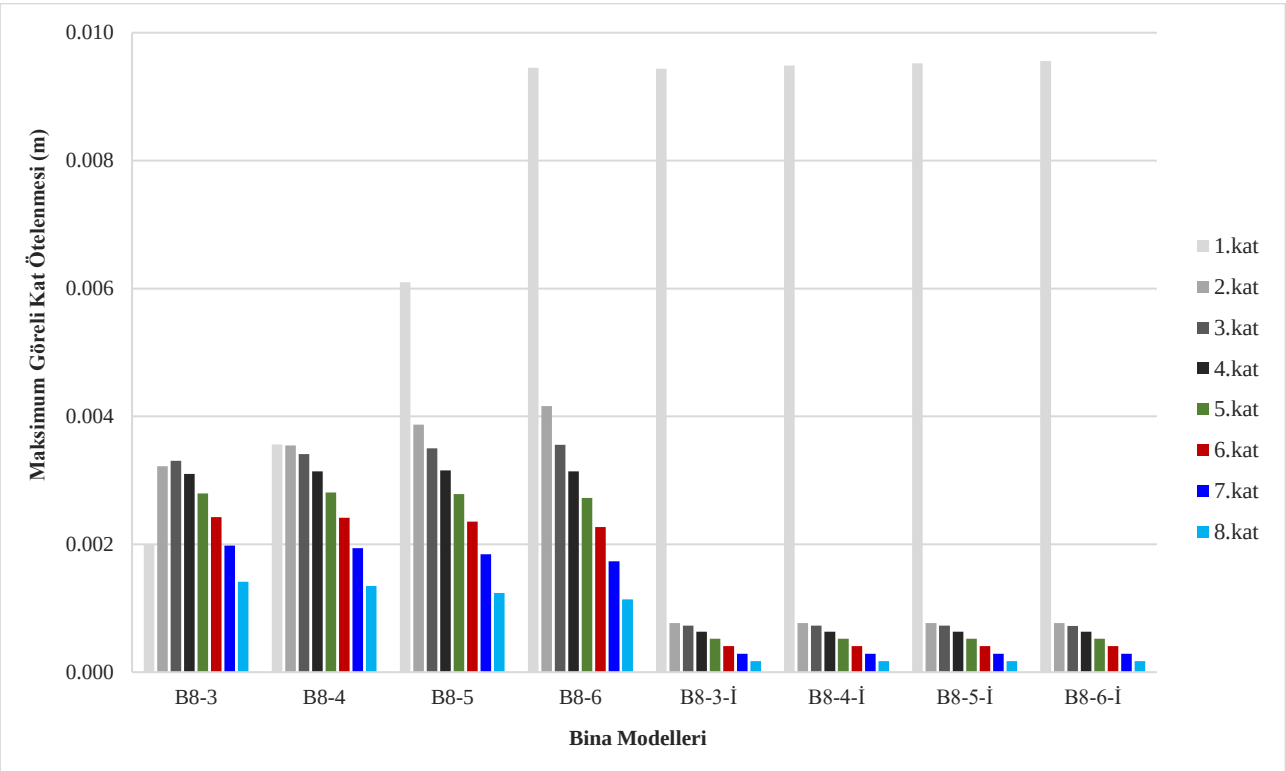
Şekil 13. DD1 Deprem Düzeyinde C12 Bina Modellerinin Maksimum Kat Yer Değiştirmeleri

4.3. Göreli Kat Ötelenmeleri ve Yumuşak Kat Düzensizlik Katsayıları

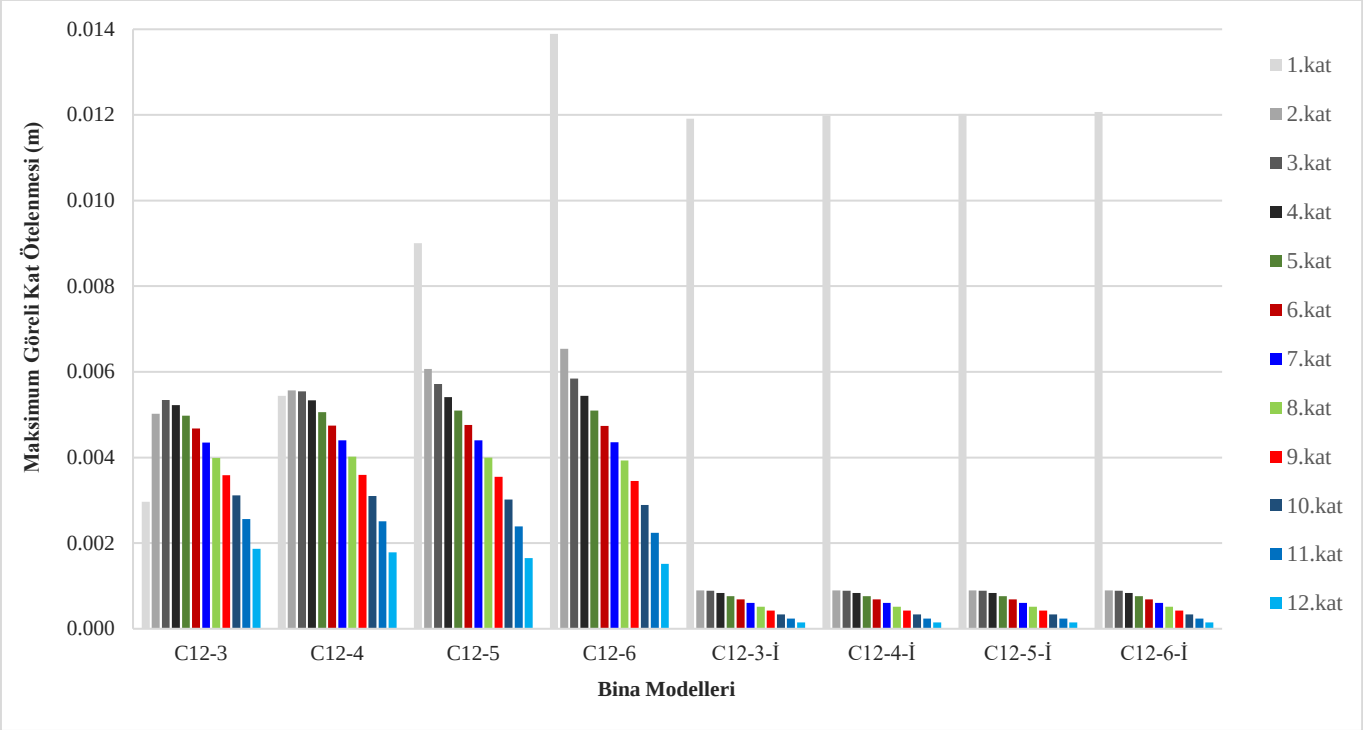
Yapısal çözümlemeler sonucu ankastre mesnetli ve sismik izolasyonlu betonarme bina modellerinin, ±%5 ek dışmerkezlik etkileri de hesaba katılarak, her iki doğrultudaki göreli kat ötelemeleri zemin kat yüksekliğindeki artışa bağlı olarak sırasıyla Şekil 14~Şekil 16'da verilmektedir. Bu şekillerden, ankastre mesnetli bina modellerinde zemin kat yüksekliğinin artmasıyla zemin kattaki göreli kat ötelenmelerinin arttığı ve üst katlardaki göreli kat ötelenmelerinin ise bir miktar azaldığı görülmektedir. Buna karşın sismik izolasyonlu bina modellerinde en büyük göreli kat ötelenmesi, izolatör yer değiştirmesinde dolayı söz konusu binanın tabanında görülürken, üst katlardaki göreli kat ötelenmelerinin değerleri, ankastre mesnetli bina modellerine göre önemli ölçüde azalmaktadır. Diğer bir ifadeyle DD2 deprem düzeyinde ankastre mesnetli bina modellerinde zemin kat yüksekliğinin 3m'den 6m'ye artmasıyla 1. kattaki göreli kat ötelenmesi değeri 4 katlı bina modelinde % 241.8, 8 katlı bina modelinde % 375.48 ve 12 katlı bina modelinde ise % 368.92 artmakta, buna karşın izolasyonlu bina modellerinde 1. kattaki göreli kat ötelenmesi değeri 4 katlı bina modelinde yaklaşık % 1.35, 8 katlı bina modelinde yaklaşık % 1.26 ve 12 katlı bina modelinde ise % 1,28 kadar artmaktadır. Ayrıca ankastre mesnetli bina modellerinde zemin kat yükseliğinin artmasıyla yumuşak kat düzensizliği katsayısı (η_{ki}) artmakta buna karşın sismik izolasyonlu bina modellerinde ise zemin kat yükseliği değişiminin η_{ki} 'yi çok fazla etkilemediği görülmektedir (bkz. Çizelge 5~Çizelge 7). Diğer taraftan kat adedinin artmasıyla hem ankastre mesnetli bina modellerinde hem de sismik izolasyonlu bina modellerinde zemin kattaki η_{ki} değerleri azalmaktadır.



Şekil 14. DD2 Deprem Düzeyinde Ankastre Mesnetli ve Sismik İzolasyonlu 4 Katlı Bina Modellerinin Maksimum Göreli Kat Ötelenmeleri



Şekil 15. DD2 Deprem Düzeyinde Ankastre Mesnetli ve Sismik İzolasyonlu 8 Katlı Bina Modellerinin Maksimum Göreli Kat Ötelenme Değerleri.



Şekil 16. DD2 Deprem Düzeyinde Ankastre Mesnetli ve Sismik İzolasyonlu 12 Katlı Bina Modellerinin Maksimum Göreli Kat Ötelenmeleri

Çizelge 5. DD-1 ve DD-2 Deprem Düzeylerinde 4 Katlı Ankastre Mesnetli ve Sismik İzolasyonlu Bina Modellerinin η_{ki} Düzensizlik Katsayıları

		Katlar	Ankastre mesnetli bina modeli								Sismik izolasyonlu bina modeli							
			A4-3		A4-4		A4-5		A4-6		A4-3-İ		A4-4-İ		A4-5-İ		A4-6-İ	
			DD1	DD2	DD1	DD2	DD1	DD2	DD1	DD2	DD1	DD2	DD1	DD2	DD1	DD2	DD1	DD2
Depremin	X doğrultusu	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		3	1,39	1,39	1,45	1,45	1,52	1,52	1,58	1,58	1,64	1,64	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
		2	1,09	1,09	1,19	1,19	1,28	1,28	1,38	1,38	1,27	1,27	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28
		1	0,67	0,67	0,84	0,84	1,05	1,05	1,27	1,27	-	-	-	-	-	-	-	-
	Y doğrultusu	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		3	1,41	1,41	1,48	1,48	1,55	1,55	1,61	1,61	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68
		2	1,13	1,13	1,23	1,23	1,33	1,33	1,44	1,44	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31
		1	0,68	0,68	0,88	0,88	1,12	1,12	1,38	1,38	-	-	-	-	-	-	-	-

Çizelge 6. DD1 ve DD-2 Deprem Düzeylerinde 8 Katlı Ankastre Mesnetli ve Sismik İzolasyonlu Bina Modellerinin η_{ki} Düzensizlik Katsayıları

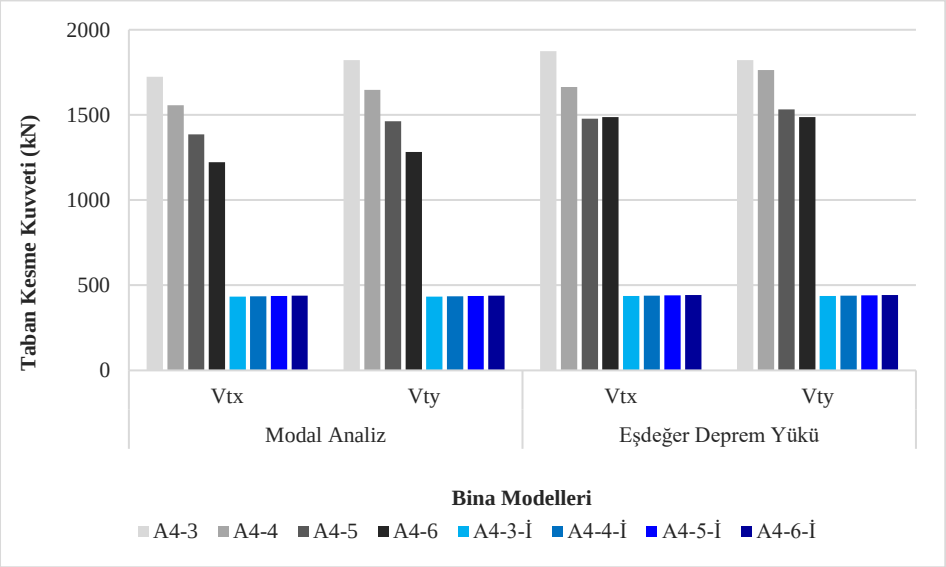
	Katlar	Ankastre mesnetli bina modeli								Sismik izolasyonlu bina modeli							
		B8-3		B8-4		B8-5		B8-6		B8-3-İ		B8-4-İ		B8-5-İ		B8-6-İ	
		DD1	DD2	DD1	DD2	DD1	DD2	DD1	DD2	DD1	DD2	DD1	DD2	DD1	DD2	DD1	DD2
x ve y deprem doğrultusu	8	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	7	1,4	1,4	1,44	1,44	1,49	1,49	1,52	1,52	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
	6	1,23	1,23	1,25	1,25	1,28	1,28	1,31	1,31	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
	5	1,15	1,15	1,16	1,16	1,18	1,18	1,20	1,20	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
	4	1,11	1,11	1,12	1,12	1,13	1,13	1,15	1,15	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21
	3	1,07	1,07	1,09	1,09	1,11	1,11	1,13	1,13	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
	2	0,98	0,98	1,04	1,04	1,11	1,11	1,17	1,17	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
	1	0,62	0,62	0,75	0,75	0,95	0,95	1,14	1,14	-	-	-	-	-	-	-	-

Çizelge 7. DD1 ve DD-2 Deprem Düzeylerinde 12 Katlı Ankastre Mesnetli ve Sismik İzolasyonlu Bina Modellerinin η_{ki} Düzensizlik Katsayıları

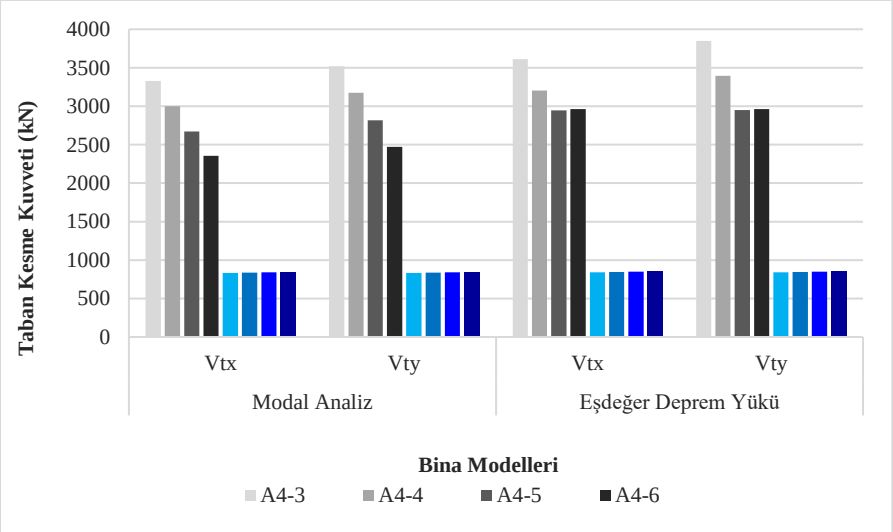
		Katlar	Ankastre mesnetli bina modeli								Sismik izolasyonlu bina modeli							
			C12-3		C12-4		C12-5		A4-6		C12-3-İ		C12-4-İ		C12-5-İ		A4-6-İ	
			DD1	DD2	DD1	DD2	DD1	DD2	DD1	DD2	DD1	DD2	DD1	DD2	DD1	DD2	DD1	DD2
Depremin Doğrultusu	x doğrultusu	12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		11	1,37	1,37	1,41	1,41	1,44	1,44	1,48	1,48	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57
		10	1,22	1,22	1,24	1,24	1,26	1,26	1,29	1,29	1,39	1,39	1,40	1,40	1,39	1,39	1,40	1,40
		9	1,15	1,15	1,16	1,16	1,17	1,17	1,19	1,19	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28
		8	1,11	1,11	1,12	1,12	1,13	1,13	1,14	1,14	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21
		7	1,09	1,09	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11	1,11	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
		6	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,09	1,09	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
		5	1,06	1,06	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
		4	1,05	1,05	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09
		3	1,02	1,02	1,04	1,04	1,06	1,06	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
		2	0,94	0,94	1,00	1,00	1,06	1,06	1,12	1,12	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
		1	0,59	0,59	0,73	0,73	0,89	0,89	1,06	1,06	-	-	-	-	-	-	-	-
	y doğrultusu	12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		11	1,38	1,38	1,41	1,41	1,45	1,45	1,48	1,48	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57
		10	1,22	1,22	1,24	1,24	1,27	1,27	1,29	1,29	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
		9	1,15	1,15	1,16	1,16	1,17	1,17	1,19	1,19	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28
		8	1,11	1,11	1,12	1,12	1,13	1,13	1,14	1,14	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21
		7	1,09	1,09	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11	1,11	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
		6	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,09	1,09	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
		5	1,06	1,06	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
		4	1,05	1,05	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09
		3	1,02	1,02	1,04	1,04	1,06	1,06	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
		2	0,94	0,94	1,01	1,01	1,06	1,06	1,12	1,12	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
		1	0,59	0,59	0,74	0,74	0,90	0,90	1,06	1,06	-	-	-	-	-	-	-	-

4.4. Taban Kesme Kuvvetleri

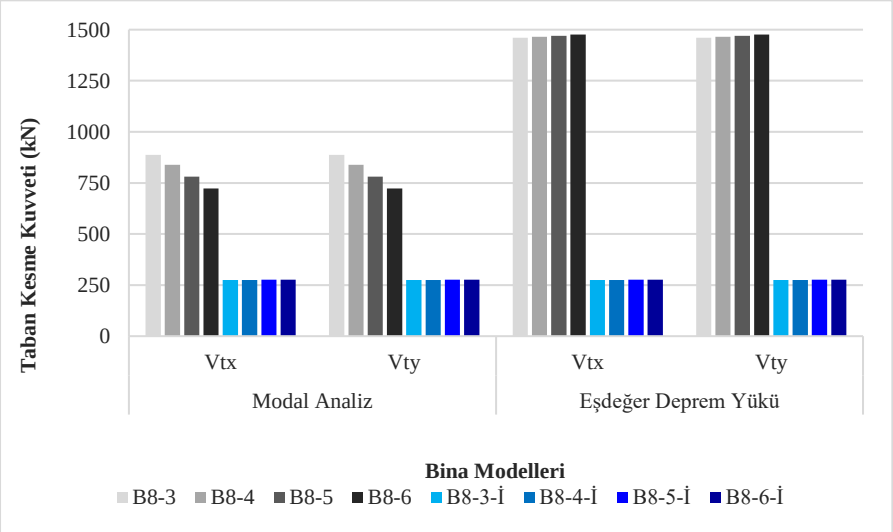
Bu çalışmada dikkate alınan ankastre mesnetli ve sismik izolasyonlu bina modellerinin DD1 ve DD2 deprem düzeylerine göre ve zemin kat yüksekliğinin artmasına bağlı olarak gerçekleştirilen yapısal çözümlemeleri sonucunda elde edilen taban kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırmalı değişimleri sırasıyla Şekil 17~Şekil 22'de verilmektedir. Bu şekillerden hem sismik izolasyonlu hem de ankastre mesnetli bina modellerinin eşdeğer deprem yükü yöntemiyle elde edilen taban kesme kuvveti değerlerinin modal analiz yöntemiyle elde edilenlerden daha büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca sismik izolatörlü bina modellerinden elde edilen taban kesme kuvveti değerlerinin ankastre mesnetli bina modellerine göre büyük ölçüde azaldığı görülmektedir. Elde edilen bu bulgu sismik izolatör uygulamasının avantajını belirgin bir şekilde ortaya koymaktadır.



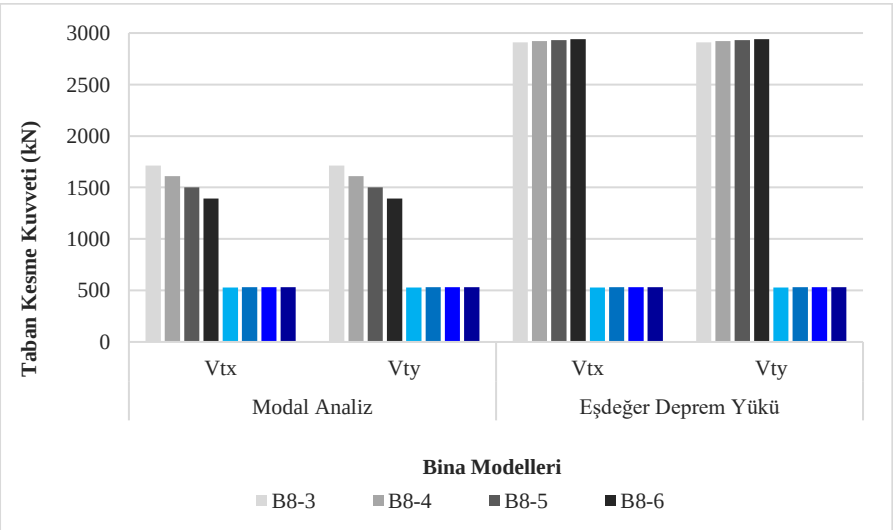
Şekil 17. DD2 Deprem Etkisi İçin Ankastre Mesnetli ve Sismik İzolasyonlu A4 Bina Modellerinin Modal Analiz ve Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemlerine Göre Taban Kesme Kuvveti Değerleri



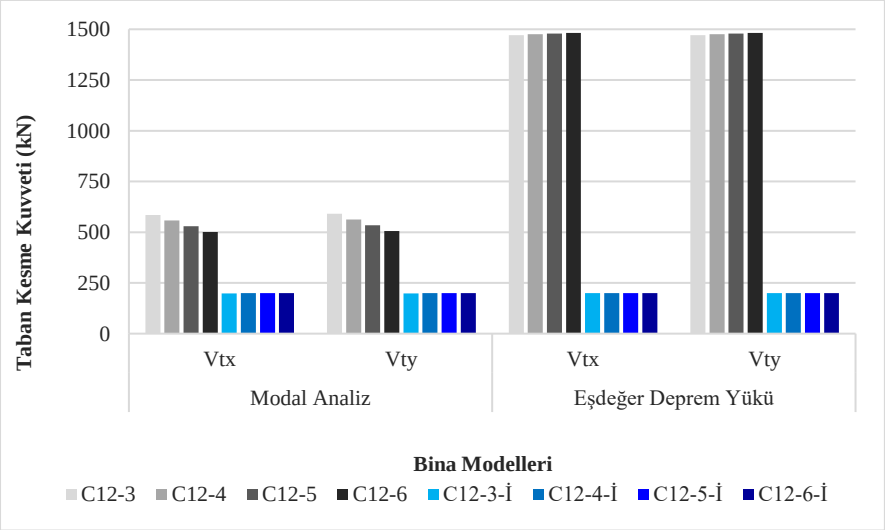
Şekil 18. DD1 Deprem Etkisi İçin Ankastre Mesnetli ve Sismik İzolasyonlu A4 Bina Modellerinin Modal Analiz ve Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemlerine Göre Taban Kesme Kuvveti Değerleri



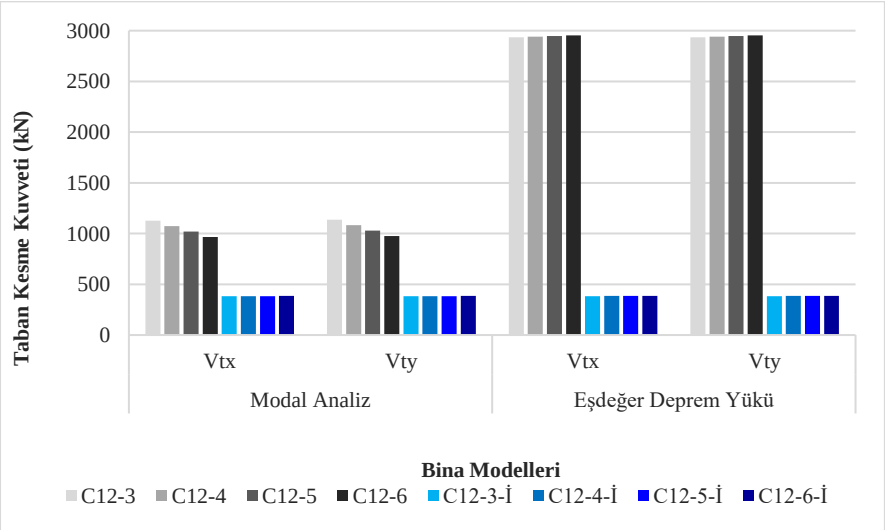
Şekil 19. DD2 Deprem Etkisi İçin Ankastre Mesnetli ve Sismik İzolasyonlu B8 Bina Modellerinin Modal Analiz ve Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemlerine Göre Taban Kesme Kuvveti Değerleri



Şekil 20. DD1 Deprem Etkisi İçin Ankastre Mesnetli ve Sismik İzolasyonlu B8 Bina Modellerinin Modal Analiz ve Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemlerine Göre Taban Kesme Kuvveti Değerleri



Şekil 21. DD2 Deprem Etkisi İçin Ankastre Mesnetli ve Sismik İzolasyonlu C12 Bina Modellerinin Modal Analiz ve Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemlerine Göre Taban Kesme Kuvveti Değerleri



Şekil 22. DD1 Deprem Etkisi İçin Ankastre Mesnetli ve Sismik İzolasyonlu C12 Bina Modellerinin Modal Analiz ve Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemlerine Göre Taban Kesme Kuvveti Değerleri

DD2 deprem etkisi için kat adedinin yumuşak kat düzensizliğine etkisini incelemek amacıyla B tipi kalıp planına sahip 4, 8 ve 12 kattan oluşan ankastre mesnetli bina modellerinin, ±%5 ek dışmerkezlik etkileri de hesaba katılarak, zemin kat yüksekliğinin ve kat adedinin artışına bağlı olarak her iki doğrultudaki göreli kat ötelemeleri ve düzensizlik katsayıları Çizelge 8 ve Çizelge 9'da verilmektedir. Bu çizelgelerden ankastre mesnetli bina modellerinde zemin kat yüksekliği ve kat adedinin artmasıyla zemin kattaki göreli kat ötelenmesinin arttığı görülmektedir. Ayrıca η_{ki} zemin kat yükseliğinin artmasıyla artmakta buna karşın kat adedinin artmasıyla azalmaktadır. Ancak kat adedinin artırıldığı bina modellerinde de zemin kat yüksekliğinin artmasıyla η_{ki} artmaktadır.

Çizelge 8. DD2 Depreminde 4 ve 8 Katlı Ankastre Mesnetli Bina Modellerinin Göreli Kat Ötelenmeleri ve Düzensizlik Katsayıları.

x ve y deprem doğrultusu	Katlar	B4 bina modelleri								B8 bina modelleri							
		B4-3		B4-4		B4-5		B4-6		B8-3		B8-4		B8-5		B8-6	
		$(\Delta_i)_{ort}$ (m)	η_{ki}	$(\Delta_i)_{ort}$ (m)	η_{ki}	$(\Delta_i)_{ort}$ (m)	η_{ki}	$(\Delta_i)_{ort}$ (m)	η_{ki}	$(\Delta_i)_{ort}$ (m)	η_{ki}	$(\Delta_i)_{ort}$ (m)	η_{ki}	$(\Delta_i)_{ort}$ (m)	η_{ki}	$(\Delta_i)_{ort}$ (m)	η_{ki}
	8									0,0012748	0	0,0012145	0,00	0,0011184	0,00	0,0010253	0,00
	7									0,0017840	1,4	0,0017461	1,44	0,0016624	1,49	0,0015634	1,52
	6									0,0021865	1,23	0,0021759	1,25	0,0021239	1,28	0,0020448	1,31
	5									0,0025178	1,15	0,0025301	1,16	0,0025089	1,18	0,0024579	1,20
	4	0,0013195	0,00	0,0011551	0,00	0,0009819	0,00	0,0008257	0,00	0,0027915	1,11	0,0028307	1,12	0,0028446	1,13	0,0028292	1,15
	3	0,0018100	1,37	0,0016543	1,43	0,0014711	1,50	0,0012878	1,56	0,0029770	1,07	0,0030721	1,09	0,0031529	1,11	0,0032053	1,13
	2	0,0020052	1,11	0,0019925	1,20	0,0019162	1,30	0,0018041	1,40	0,0029027	0,98	0,0031940	1,04	0,0034901	1,11	0,0037509	1,17
	1	0,0013220	0,66	0,0022141	0,83	0,0032955	1,03	0,0045201	1,25	0,0017915	0,62	0,0032128	0,75	0,0055009	0,95	0,0085318	1,14

Çizelge 9. DD2 Deprem Düzeyinde 12 Katlı Ankastre Mesnetli Bina Modelinin Göreli Kat Ötelenmeleri ve Düzensizlik Katsayıları.

	Katlar	B12 bina modelleri							
		B12-3		B12-4		B12-5		B12-6	
		$(\Delta_i)_{ort}$ (m)	η_{ki}	$(\Delta_i)_{ort}$ (m)	η_{ki}	$(\Delta_i)_{ort}$ (m)	η_{ki}	$(\Delta_i)_{ort}$ (m)	η_{ki}
x ve y deprem doğrultusu	12	0,0016005	0,00	0,0015218	0,00	0,0014020	0,00	0,0012771	0,00
	11	0,0022278	1,39	0,0021748	1,43	0,0020629	1,47	0,0019228	1,51
	10	0,0027265	1,22	0,0027060	1,24	0,0026264	1,27	0,0025045	1,30
	9	0,0031409	1,15	0,0031446	1,16	0,0030950	1,18	0,0030000	1,20
	8	0,0035026	1,12	0,0035248	1,12	0,0034989	1,13	0,0034293	1,14
	7	0,0038254	1,09	0,0038619	1,10	0,0038551	1,10	0,0038080	1,11
	6	0,0041192	1,08	0,0041675	1,08	0,0041767	1,08	0,0041494	1,09
	5	0,0043867	1,06	0,0044489	1,07	0,0044746	1,07	0,0044670	1,08
	4	0,0046133	1,05	0,0047022	1,06	0,0047570	1,06	0,0047806	1,07
	3	0,0047375	1,03	0,0049041	1,04	0,0050393	1,06	0,0051459	1,08
	2	0,0044934	0,95	0,0049636	1,01	0,0053964	1,07	0,0058004	1,13
	1	0,0027237	0,61	0,0050052	0,76	0,0083126	0,92	0,0128621	1,11

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, farklı kat adedi ve kat alanına sahip üç farklı formdaki ankastre mesnetli ve sismik izolasyonlu betonarme binalarda zemin kat yüksekliğindeki artışın yapısal davranışa etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmektedir.

- Gerçekleştirilen yapısal çözümlemelerden ankastre mesnetli bina modellerinde zemin kat yüksekliği arttıkça söz konusu bina modellerinin doğal titreşim periyotlarının arttığı görülmektedir. Sismik izolatörlü bina modellerinde ise, hedeflenen izolasyon periyotlarına bağlı olarak, binaların doğal titreşim periyotlarının ankastre mesnetli bina modellerine göre daha büyük olmaktadır. Ayrıca sismik izolatörlü bina modellerinde zemin kat yüksekliğinin artmasıyla periyot değerlerinin önemli ölçüde arttırmadığı görülmektedir.

- Yapısal çözümlemelerden, sismik izolasyonlu A4 ve B8 bina modellerinde hedeflenen etkin periyot değerlerine ulaşılırken, C12 modellerinin titreşim periyodunun hedeflenen periyot değerinden fazla olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle sismik izolasyonlu bina modellerinde kat adedi arttıkça taşıyıcı sistemin titreşim periyodunun hedeflenen periyottan uzaklaştığı görülmüştür. Bu sonuç çok katlı binaların dinamik davranışını kurşun çekirdekli kauçuk izolatör kullanılarak kontrol altına alınmasını zorlaştıracağını dolayısıyla kat adedi fazla olan binalarda kurşun çekirdekli kauçuk izolatör kullanımının uygun olmadığını ortaya koymaktadır.

- Toplam kat alanları sabit tutularak oluşturulan 3 farklı bina formuna sahip ankastre mesnetli bina modellerinde zemin kat yüksekliğinin artmasıyla kat yer değiştirmelerinin arttığı buna karşın sismik izolasyonlu bina modellerinde ise kat yer değişme değerlerinin büyük kısmının izolatör seviyesinde gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca sismik izolasyonlu bina modellerinde zemin kat yüksekliğindeki artış miktarının kat yer değiştirmelerini ankastre mesnetli bina modellerine göre çok etkilemediği görülmüştür. Bu sonuç sismik izolasyonlu bina modellerinin kat yer değiştirmelerinin ankastre mesnetli bina modellerine göre önemli ölçüde azaldığını ortaya koymaktadır.

- Toplam kat alanları sabit tutularak oluşturulan 3 farklı bina formuna sahip ankastre mesnetli bina modellerinde zemin kat yüksekliğinin artmasıyla göreli kat ötelenme değerlerinin arttığı görülmektedir. Sismik izolasyonlu bina modellerinde ise en büyük göreli kat ötelenmeleri izolatör yer değiştirmesine bağlı olarak zemin katlarda meydana gelmekte, üst katlarda ise göreli kat ötelenmeleri ankastre mesnetli bina modellerine göre önemli ölçüde azalmaktadır.

- Toplam kat alanları sabit tutularak oluşturulan 3 farklı bina formuna sahip ankastre mesnetli bina modellerinde zemin kat yüksekliğinin artmasıyla modal analizle elde edilen taban kesme kuvveti değerleri azalırken, eşdeğer deprem yükü yöntemiyle elde edilen taban kesme kuvvet değerleri B8 ve C12 bina modellerinde bir miktar artış göstermektedir. Buna karşın sismik izolasyonlu bina modellerinde ise taban kesme kuvveti değerleri ankastre mesnetli bina modellerine göre önemli ölçüde azalmakta ve zemin kat yüksekliğinin artmasıyla taban kesme kuvvet değerleri çok fazla değişmemektedir. Elde edilen bu sonuç sismik izolatörlerin söz konusu binanın davranışına olumlu katkı sağladığını göstermektedir.

- Yapısal çözümlemelerinden elde edilen bulgular ankastre mesnetli bina modellerinde zemin kat yüksekliğinin artmasıyla oluşan yumuşak kat düzensizliğinin kurşun çekirdekli kauçuk izolatör kullanılarak oluşturulan bina modellerinde oluşmadığını ortaya koymaktadır. Elde edilen bu sonuç çeşitli nedenlerle binaların özellikle zemin katında oluşan yumuşak kat düzensizliğinin sismik izolatörlerin kullanılarak ortadan kaldırabileceğini göstermektedir.

- Bu çalışmanın bulguları irdelendiğinde Türkiye'de özellikle deprem tehlikesi yüksek olan bölgelerde inşa edilecek betonarme binaların emniyeti ve performansı bakımından sismik izolatörlerin alternatif olarak kullanılabileceği kanaatine ulaşılmıştır.

Referanslar

Alasaf, E. & Öztürk, H. (2022). Sismik izolatörlü yapıların tasarımına etki eden faktörlerin incelenmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10 (4): 2155-2164. doi: 10.29130/dubited.1089421

Batur, M. E. (2005). Standart yapılarda sismik izolasyon, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze/Türkiye.

Celep, Z. (2019). Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı, 7. Baskı, Beta Basım Yayın, 506-538, İstanbul/Türkiye.

Çağlar, N., Garip, Z.Ş. & Ala, N.T. (2016). Investigation of the contribution of soil conditions to damage and failure of RC structures in Adapazarı, *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 4(2), 1-12.

Çavdar, E. & Özdemir, G. (2018). Change in maximum isolator displacements due to change in orientation of scaled near field ground motion records, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33 (2): 585-598. doi: 10.17341/gazimmfd.416367

Garip, Z.Ş. & Dibekoğlu, Ş. (2023). Deprem etkisindeki betonarme binalarda dolgu duvarların davranışa etkilerinin incelenmesi, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi (UMAGD)*, 15(2): 344-360. doi.org/10.29137/umagd.1178219

Güneş, N. & Ulucan, Z.Ç. (2020). Farklı tasarlanmış iki sismik yalıtımlı binanın karşılaştırılması, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 32 (1): 37-46. doi: 10.35234/fumbd.569792

Gürsoy, Ş. & Öz, R., (2016). Yumuşak kat düzensizliğinin betonarme binaların deprem davranışına ve kaba inşaat maliyetine etkisinin incelenmesi, *Uluslararası Doğal Afet ve Afet Yönetimi Sempozyumu (DAAYS'16)*, 2-4 Mart, Karabük Üniversitesi, Bildiriler CD'si, 243-250, Karabük/TÜRKİYE.

Gürsoy, Ş., Öz, R. & Baş, S. (2015). Investigation of the effect of weak-story on earthquake behavior and rough construction costs of RC buildings, *Computers and Concrete*, 16(1), 141-161. doi:10.12989/cac.2015.16.1.141

İnan, T., Korkmaz, K. and Cagatay, I.H. (2014). The effect of architectural form on the earthquake behavior of symmetric RC frame systems, *Computers and Concrete*, 13(2), 271-290. doi:10.12989/cac.2014.13.2.271

Kirac, N., Dogan, M. & Ozbasaran, H. (2011). Failure of weak-storey during earthquakes, *Engineering Failure Analysis*, **18**(2), 572-581. doi:10.1016/j.engfailanal.2010.09.021

Komodromos, P. (2000). Seismic isolation for earthquake resistant structures, *WIT Press*, Southampton, UK.

Korkmaz, A. & Uçar, T. (2006). Yumuşak kat düzensizliğinin betonarme binaların deprem davranışında etkisi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 11(2): 65-76.

Naeim, F. & Kelly, J. M. (1999). Design of seismic isolated structures: From theory to practice, *John Wiley And Sons, Inc*, New York.

Özer, E. & İnel, M. (2021). Sismik izolatörlerin betonarme konut binasının performansı üzerindeki etkileri, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27 (3): 303-311.

Özkan, A.M. (2022). Farklı zemin kat yüksekliğine sahip betonarme binalarda sismik izolatör kullanımının bina davranışına ve kaba inşaat maliyetine etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük/Türkiye.

Özpalanlar, C. G. (2004). Depreme dayanıklı yapı tasarımında sismik izolasyon ve enerji sönümleyici sistemler, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul/Türkiye.

Öztürk, H. (2022). Sismik izolasyonlu yapıların tasarımında kullanılan analiz yöntemlerinin karşılaştırılması, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 38 (1): 117-127.

Ryan, K. L. & Chopra, A. K. (2004). Estimation of seismic demands on isolators in asymmetric buildings using non-linear analysis, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (33): 395-418. doi.org/10.1002/eqe.355

Soyluk, A. & Tuna, M. E. (2011). Düzensiz binalarda sismik taban izolatörü uygulamasının mimari tasarıma etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik & Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26 (3): 635-642.

Sta4-Cad, (2021). Structural analysis for computer aided design, ver.14.1. www.sta.com.tr

Şengel, H. S., Erol, H. & Yavuz, E. (2009). Sismik izolasyon tekniği ve kullanılışına ilişkin örnek uygulama, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22 (2): 165-178.

TBDY, (2019). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, *Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 30364 Sayılı Resmi Gazete*, Türkiye.

Toprak, T. (2012). Burulma düzensizliği olan yapılarda sismik izolasyon kullanımının deprem yükleri altındaki davranışa olan etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**,** İstanbul/Türkiye.

TS 498, (1997). Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara/Türkiye.

TS-500, (2000). Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara/Türkiye.

Yücesoy, A. (2005). Sismik izolatörler ile depreme dayanıklı yapı tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa KemaL Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya/Türkiye.

Zayas, V.A., Low, S.S., & Mahin, S.A. (1990). A simple pendulum technique for achieving seismic isolation, *Earthquake Spectra*, 6(2): 317-333. https://doi.org/10.1193/1.1585573

MÜHENDİSLİK MİMARLIK FAKÜLTESİ

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

UMAGD, (2023) 15(2), 689-703.

10.29137/umagd.1286178

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Derleme Makale / Review Article

Ultra Hafif Betonda Güncel Gelişmeler

Current Developments in Ultra-Light Weight Concrete

İlker Bekir Topçu [1], İsmail Hocaoğlu[2], İlkay Kara [3]

[1,3]Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26040 Eskişehir, TÜRKİYE
[2]Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bolvadin Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 03300 Afyonkarahisar, TÜRKİYE

***Başvuru/Received**: 20/04/2023 **Kabul / Accepted**:06/06/2023 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Öz

Günümüzün en önemli yapı malzemelerinden biri olan betonun farklı özel çeşitleri bulunmaktadır. Bunlardan biride hafif betonlardır (HB). HB'ler üzerinde yapılan çalışmalarla birim ağırlıkları azaltılmakta ve üretilen betonlara ultra hafif beton (UHB) denilmektedir. Birim ağırlıkları azaltılmaya çalışılırken basınç dayanımı, ses emme özelliği, ısıl iletkenlikleri, yangına ve dona dayanıklılıkları gibi özellikleri iyileştirilmeye çalışılmaktadır. UHB'lerin üretiminde kullanılan agregalarda zamanla değişime uğramaktadır. Atık malzemelerin değerlendirilerek sürdürülebilir ve doğa dostu UHB çalışmaları devam etmektedir. Doğal kaynakların kullanılması yerine atıkların değerlendirilerek kullanılması UHB'lere karşı ilginin ve talebin artmasını sağlamaktadır. Böylece UHB'lerin ekonomik, çevreci ve sürdürülebilirliği dikkat çekmektedir. Kullanılan agregaların türlerine ve boyutlarına göre UHB'ler sadece binalarda ısı ve ses yalıtım malzemesi olarak kullanılmasının yanı sıra dayanım özellikleri arttırılarak, yapının kendi yükünü azaltarak deprem kuvvetlerinin etkilerini de azaltması amaçlanmaktadır. Bu çalışmada mevcut literatür incelenerek UHB'lerle ilgili son gelişmeler incelenmiştir. UHB'ler arasında karşılaştırmalar yapılmakla birlikte avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler

"Ultra hafif beton, HA, dayanım, sürdürülebilirlik, ısıl iletkenlik"

Abstract

Concrete, one of today's most important building materials, has different special types. One of them is lightweight concrete (LWC). With the studies on LWC, the unit weights tried to be reduced, and ultra-light concretes (ULWC) were tested. While reducing unit weights, it is tried to improve properties such as compressive strength, sound absorption feature, thermal conductivity, and fire and frost resistance. Aggregates used in the production of ULWC change over time. Sustainable and nature-friendly ULWC works continue by evaluating waste materials. Using waste instead of natural resources increases the interest and demand for ULWC. Thus, its economic, environmental, and sustainability draw attention. According to the types and dimensions of the aggregates used, ULWCs are not only used as heat and sound insulation materials in buildings but also aim to reduce the effects of earthquake forces by increasing the strength properties of the building and reducing its load. This study investigates the latest developments in ULWC by examining the literature sources. Comparisons were made between ULWC, and their advantages and disadvantages were evaluated.

Key Words

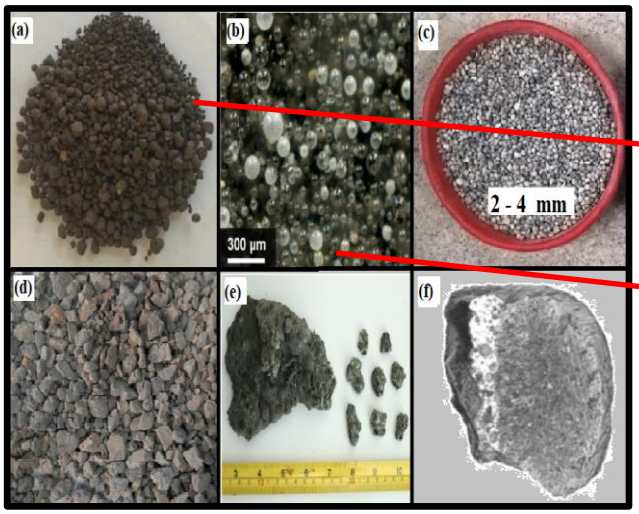
"Ultra-light weight concrete, light weight aggregate, strength, sustainability, thermal conductivity"

***Sorumlu Yazar: ilkerbt@ogu.edu.tr**

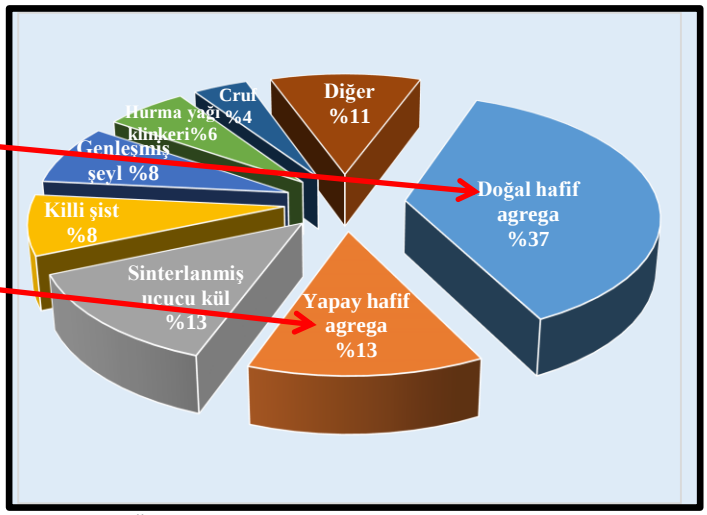
1. Giriş

Geçmişteki yapılar incelendiğinde hafif betonların (HB) 3000 yıl öncesine kadar kullanıldığı görülmektedir. Roma İmparatorluğu döneminde inşa edilen Cosa limanı ve mimari açıdan büyük öneme sahip Pantheon kubbesi gibi önemli yapılarda HB yapısı görülmektedir (Yu, vd., 2015). HB'lerin kullanım amacı yapının yükünü azaltarak yapıya etki edecek deprem kuvvetlerini ile oluşabilecek zararı azaltmaktır (Yasar vd., 2003). HB'lerin dayanımının, zaman ve bakım koşullarına bağlı olarak artması normal beton (NB) gibi olmaktadır. HB'lerde ısıl iletkenliğinin düşük olması nedeniyle hidratasyon sırasında ortaya çıkan ısı beton sıcaklığını artmaktadır. Bunun sonucu olarak betonun iç kısımlarında priz alma ve sertleşme olayları daha çabuk oluşarak betonun erken dayanım kazanmasını sağlamaktadır (Topçu ve Işıkdağ, 2008).

HB'ler üretim tekniklerine göre ayrı olarak sınıflandırılmasının yanında ayrıca kullanım alanları ve özelliklerine göre ayrılmaktadırlar (Topçu, 1988). Çok düşük birim ağırlığa sahip olan HB'ler yalıtım betonu olarak yapıda yer alırken, birim ağırlıklarının 2000 kg/m^3'e yaklaşması ile taşıyıcı hafif betonarme ve ön gerilmeli beton olarak kullanıldığı belirtilmektedir (Topçu ve Uygunoğlu, 2021). Volkanik cürufların HB agregası olarak kullanıldığı, betonun birim ağırlığını azaltmakta başarılı olduğu bilinmektedir (Topçu, 1989; 1996). Diğer bir çalışmada HA olarak bims kullanımı ile hafif polimer beton üretimi gerçekleştirilmiştir (Uygunoğlu vd., 2012). Bilim insanları HB üretiminde agrega olarak sinterlenmiş uçucu kül, killi şist, genleşmiş şeyl, hurma yağı klinkeri vb. malzemeleri de tercih etmişlerdir (Sifan vd., 2023) (Şekil 1). Bu agregalar düşük birim ağırlıkları ile yapısal ve yapısal olmayacak şekilde yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Zareef, 2010). Önceki araştırmalarda HB üretiminde en fazla doğal ve yapay HA'lar tercih edilmiştir (Sifan vd., 2023) (Şekil 2). Literatürdeki araştırmalarda UHB'lerin yoğunluklarının 800 kg/m^3'den daha düşük olduğu, ultra ısıl iletkenlik özelliği gösterdiği (ısıl iletkenlik katsayılarının 0.14 W/(m.K)'den daha düşük olduğu) gözlenmiştir (Spiesz ve Heidelberg, 2017). Ayrıca UHB'lerin basınç dayanımları da 10 MPa'nın üzerine çıkabilmektedir (Spiesz ve Heidelberg, 2017).



Şekil 1. HB üretiminde kullanılan agregalar; a- doğal kil, b- yapay HA, c- sinterlenmiş UK, d- killi şist, e- hurma yağı klinkeri, f- cüruf (Sifan vd., 2023)



Ş Şekil 2. Önceki araştırmalarda HB üretiminde kullanılan agrega oranları (Sifan vd., 2023)

Taşıyıcı özellikleri olmayan birim ağırlıkları daha az olan HB'ler ultra hafif beton (UHB) olarak adlandırılmaktadır (Subaşı vd., 2009). UHB'ler düşük yoğunluğu, iyi yangın direnci ve ısı yalıtımındaki gösterdiği avantajlar yapısal olan ve olmayan pek çok uygulamalarda kullandığı belirtilmektedir (Yu vd., 2013). Geleneksel HB'lerdeki agregaların yoğunlukları yaklaşık olarak 0.8-1.8 kg/m^3 arasında değiştiği bilinmektedir. Ancak betonda bu agregaların kullanılması (genleştirilmiş kil vb.) betonu yeterince hafifletememektedir. Bu durum bilim insanlarını alternatif malzemelerin kullanılmasına yönlendirmiştir. Örnek olarak beton üretiminde yoğunlukları 0.3-0.8 kg/m^3 arasında değişen genleşmiş cam agregaların kullanılması HB üretimine yeni bir vizyon katmıştır (Spiesz ve Heidelberg, 2017). Ancak; HB üretimi için kullanılan düşük yoğunluklu alternatif malzemeler betonun mekanik dayanımlarını (eğilme, basınç vb.) ve dayanıklılık özelliklerini fark edilebilir miktarda azaltmaktadır. Bu nedenle UHB üretiminde ilk amaç çimento esaslı malzemenin mekanik dayanımını en yüksek değerlerde tutabilmektir. Ayrıca, porozitesi yüksek olan betonun ısıl iletkenliğini (yalıtım özelliğini arttırmak amacıyla) azaltmaktır. Böylelikle sürdürülebilir, deprem açısından güvenli beton üretilebilmektedir. Günümüzde UHB'lerle ilgili çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. UHB'ler farklı amaçlar için kullanılabilmektedir. Örnek olarak UHB'ler yapılarda dış duvarlarda ve iç bölme duvarlarda kullanılabilmektedirler. Ayrıca UHB'ler dış cephe kaplaması olarak da kullanılabilmektedir. UHB'lerin kullanıldığı bazı yapılara ait fotoğraf Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3a Berlin'de UHB ile üretilen Schlaich evinin, Şekil 3b ise yine UHB ile üretilen Eindhoven evinin bir görünümüdür. Schlaich evinde kullanılan UHB'nin basınç dayanımı 7,4 MPa, yoğunluğunun 760 kg/m^3 ve ısıl iletkenliğinin 0,18 (W/(m.K)) olduğu belirlenmiştir. Eindhoven evinde kullanılan UHB'nin ise basınç dayanımı 10 MPa, yoğunluğunun 780 kg/m^3 ve ısıl iletkenliğinin 0,13 (W/(m.K)) olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3. UHB ile üretilen yapı örnekleri (a- Berlin'deki bir yapı b-Hollanda'daki bir yapı) (theconstructor.org, 2023)

Bazı araştırmalar sonucu UHB'lere silis dumanı ve nano boyutlu silika katılması ile boşluk oranının düşürülebileceği, mekanik dayanımlarının ise arttırılabileceği belirlenmiştir (Yu vd., 2015). Ayrıca günümüzdeki teknolojik araçlar (3 boyutlu yazılar vb.) kullanılarak UHB üretilmesini amaçlayan bazı çalışmalar bulunmaktadır (Avrupa Birliği Projesi, 2021). Bu çalışmada da literatürdeki UHB'lerin yoğunlukları, basınç dayanımları, ısıl özellikleri, rötre değerleri, E-modülleri, ses emme özelikleri ve dayanıklılıkları incelenmiştir.

2. Ultra Hafif Beton Çeşitleri

Beton karışımında hava, mevcut agregada, iri agregaların arasında ve çimento matrisinde bulunmaktadır. HB üretimi karışımdan ince agrega çıkartılarak havanın iri agregalar arasında kalmasını sağlayarak, HA kullanarak ve çimento matrisinde boşluk oluşturarak gerçekleştirilmektedir (Baradan vd., 2015).

2.1 Ultra Hafif Hücresel/Köpük Beton

Karışıma çeşitli köpük ajanı katkılar eklenerek hava boşlukları oluşturmakta ve beton yoğunluğunun azaltıldığı diğer bir yöntem köpük beton üretimi olmaktadır. Yapılan çalışmalarda yoğunluğu 300 kg/m^3'den daha az olan ultra hafif köpük betonların ısı yalıtımları için üstün özellikler gösterdiği belirtilmektedir (Shi vd., 2022). Ultra hafif köpük beton düşük ısıl iletkenliğine (0.10 W/(m.K)) sahip olması beklenmektedir. Nano gözenekli aerojeller kullanılarak 198 kg/m3 yoğunluğa sahip, ısıl iletkenliği 0.049 W/(m.K) değerinde ultra hafif köpük betonun hazırlanabileceği belirlenmiştir (Li vd., 2019).

2.2 İnce Agregasız Ultra Hafif beton

İnce agrega kullanılmadan çimento, su ve iri agrega karıştırılarak elde edilen beton ince agregasız hafif beton olarak adlandırılmaktadır. İri agrega boyutu genellikle 10-20 mm olarak değişmektedir. Ayrıca, daha iri boyutlarda da kullanılabilmektedir. Kullanılması gereken agreganın türü de önemli olmakla birlikte hafif betonun yoğunluğunu etkilemektedir. HA kullanılarak üretilen ince agregasız hafif betonların yoğunluğu 800- 1400 kg/m^3 arasında değişmektedir (Mohammed ve Hamad, 2014).

2.3 Hafif Agregalı Ultra Hafif Beton

Günümüzde HB'lerin iyi ısı yalıtımı, yangına karşı dayanıklı olmaları ve yoğunluklarının NB'lere göre az olması gibi avantajları dikkat çekmektedir. Ancak; UHB üretimi işlemleri NB üretimi aşamalarından farklıdır. UHB üretimlerinde işlenebilirlik, ayrışma, homojenlik, sıkıştırma vb. sorunlar oluşabilmektedir (Spiesz ve Heidelberg, 2017). Ayrıca UHB üretiminde kullanılan agregaların boşluklu yapısından dolayı, özellikle hidratasyonun ilk aşamalarında ısıyı hapsederek hidratasyon reaksiyonlarının olumsuz etkilenmesine neden olmasıdır. Hidratasyon sıcaklığının aşırı düşmesi, çimento esaslı malzemelerde mikro boyutlu çatlakların oluşmasına neden olabilmektedir. HA'lı betonların birçok uygulama alanında görülmektedir. Bunlar uzun açıklı köprüler, yüksek binalar olmakla beraber yüzer ve açık deniz yapıları vb. yapılardır (Zhang vd., 2022). HA'lı betonlarda kullanılan agreganın birim ağırlığı, sertliği, boyutu önemli olmakla beraber uygulanan s/ç oranı da önem taşımaktadır. HA'lı HB'lerde su/çimento oranının artması ile çimento matrisinde ve agrega çimento ara yüzeyinde boşluk miktarının artmasına neden olmakta, basınç dayanımında ise azalmalara neden olabilmektedir (Lo vd., 2007). Kırma taş agrega yerine HA kullanımı, betonun yoğunluğun azalmasını sağlamaktadır. Bu amaçla uçucu külün agrega olarak kullanıldığı çalışmalarda HB'nin homojen olduğu, işlenebilir olduğu görülmektedir (Yıldırım ve Özturan, 2013). Eurocode 2'ye göre HA'ların parçacık yoğunluğu 2000 kg/m^3'ten az olmalıdır. HB'lerin E-modülü genellikle aynı dayanımdaki normal betona göre %20-%50 daha az değerde olabilmektedir (Topçu ve Uygunoğlu, 2010; 2007).

2.4 Ferrocement Beton (FB)

Ferrocement bileşenleri kaba agrega içermemeleri nedeniyle istenilen şekilde inşa edilebilmektedir (Naaman, 2000; MVarma ve Hajare, 2015). Yapılan çalışmalarda ferrocement beton (FB) üretimi ile HB üretilebileceği belirlenmiştir. FB'nin çeşitli uygulama alanlarında kullanıldığı bilinmektedir. Literatürdeki araştırmalarda Ferrocement HB ile kano ve çadır yapımı gerçekleştirilmiş, çalışmanın teknik uygulamasında da başarılı sonuç elde edilmiştir (Topçu, 1999; 2000). Eltaly vd. (2023) yedi FB kolon ve dört konvansiyonel beton kolon (NB) dökmüşler ve eksenel ve eksantrik yükün etkisi altında kolonların davranışlarını test etmişlerdir. FB ile üretilen kolonlarda kullanılan tellerin konvansiyonel betonlardaki etriyelere alternatif olduğu, böylelikle BA elemanın ağırlığının azaltılabileceği belirlenmiştir. Eltaly vd. (2023) ayrıca beton ağırlığını daha da azaltmak için yeni bir yöntem geliştirmişler, polipropilen fiberlerle (PP) üretilen blokları kolonların orta kısımlarına yerleştirmişlerdir (Şekil 4). PP fiberlerle üretilen blokların birim hacim ağırlıkları 650 kg/m^3 olduğunu belirlenmiştir.



Şekil 4. Polipropilen fiberler ve ferrocement ile üretilen betonların üretim aşamaları (Eltaly vd., 2023)

3. Ultra Hafif Betonların Özellikleri

Günümüzde UHB'lerin tasarımında geri dönüşümden elde edilen genleştirilmiş cam parçaları ve mikro silika vb. özel agregalar kullanılarak geliştirilmiş üretilebilen yapı malzemeleri bulunmaktadır. Üretimde kullanılan bu özel agregalar normal betonda yer alan kumun ve çakılın yerini almaktadır. Karışımdaki yüksek hava içeriği ile birim ağırlık 800 kg/m^3'ü bulmaktadır (Roberz vd., 2017).

3.1 Dayanım

UHB çalışmasında kuru yoğunluğu 300-600 kg/m^3 arasında değişen EPS (polistiren boncuk) ve gözenek oluşturucu olarak doygun bentonit kullanılmış ve basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. İki farklı boyutta EPS boncuk kullanılmakla birlikte toplam hacmi %40, 30 ve 20 olan beton karışımları belirlenmiştir. Beton hacminde EPS hacminin azalması ile 300 ve 400 kg/m^3 betonlarda basınç dayanımının azaldığı ancak 500 ve 600 kg/m^3 kuru yoğunluğu olan betonlarda arttığı gözlenmiştir (Xie vd., 2019). Ünal vd. (2007) diatomit katkılı HB üretmişler, 28 günlük basınç dayanımlarının 3.5-6 MPa, yoğunluğunun ise 950-1200 kg/m^3 arasında olduğunu gözlemlemişlerdir. Wang ve Tsai, (2006) yoğunlukları 800-1500 kg/m^3 arasında değişen öğütülmüş silt katkılı HB üretmişlerdir. 28 günlük basınç dayanımlarının 18-42 MPa arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir.

Uçucu kül, genleştirilmiş cam, silika aerojel ve prefabrik plastik parçaların birlikte kullanıldığı çalışmada en düşük kuru yoğunluğun 713,5 kg/m^3 olduğu, eğilme ve basınç dayanımlarının yoğunluğun azalması ile birlikte düştüğü belirtilmektedir (Adhikary vd., 2020). Yoğunluğu 1500 kg/m^3'den daha düşük olan ve basınç dayanımının artmasını sağlayacak UHB ve yüksek dayanımlı ultra HA araştırmaları devam etmektedir (Zhang vd., 2022). Karakurt vd. (2010) agreganın %50 oranında zeolit ile yer değiştirilmesi sonucu 535 kg/m^3 yoğunluğa ulaşılabileceği ancak basınç dayanımının 3,2 MPa gibi düşük değerler aldığını gözlemlemişlerdir. UHB'lerde basınç dayanımlarının incelendiği çalışmada köpük ajanı olarak hidrojen peroksit, uçucu kül, PP elyaf, köpük dengeleyici kullanıldığı, görünür yoğunluğun 100-300 kg/m^3 arasında değiştiği gözlenmiştir. Görünür yoğunluk azalırken basınç dayanımı 0.55 s/ç oranına kadar yükseldiği daha sonra azaldığı belirlenmiştir (Huang vd., 2015). Önceki yapılan araştırmalarda HB üretimi için elde edilen bazı 28 günlük basınç dayanımı ve E-modülleri sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Önceki araştırmalarda 28-günlük HB'ler için elde edilen E-modülleri ve basınç dayanımları

Araştırmacı	Çimento tipi	HA oranı, %	E-modülü	Basınç dayanımı, MPa
Zhou vd. (2021)	CEM I 52.5 R	33	27.3-28	74.5-79.8
Zhang vd. (2004)	ASTM- Tip-1	38-44	24.0-28.9	60-81.6

Zhang vd. (2005)	CEM-1 42.5R	34-44	24.2-28.9	60.8-67.4
Liu vd. (2021)	CEM 1 52.5 R	53	23.2-31.3	68.8-98.1
Ahmmad vd. (2016)	CEM I 42.5 N	40	31.3	61.7
Bogas vd. (2014)	CEM I 42.5 R	35	21.8	61.1
Zhou ve Brooks (2019)	ASTM- Tip 1-2	45	17.5	60.1
Bajare vd. (2013)	CEM I 42.5 N	34-41	-	62
Wang ve Wang (2013)	CEM I 42.5 R	57	-	60.4-74.8
Sohel vd. (2018)	-	34-100	15.0-20.1	62.0-63.0
Ye vd. (2020)	CEM I 42.5 N	40	-	60.8-81.3

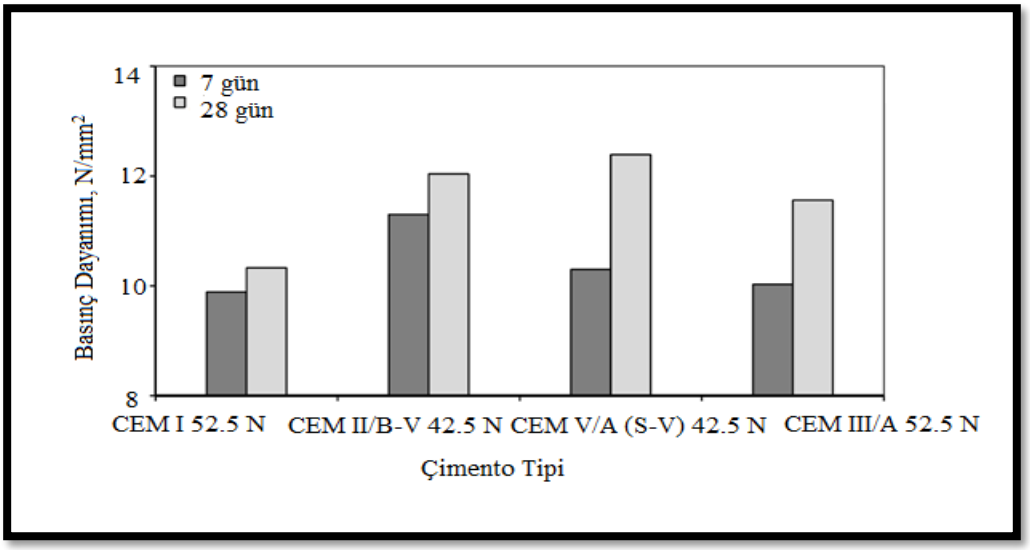
Tablo 2'de UHB uygulama sonuçları görülmektedir. Kullanılan çimento tipi ve agrega tipine göre yoğunluk, 28 günlük basınç dayanımları ve ısıl iletkenlik değerlerindeki farklılıklar dikkat çekmektedir. Belirtilen değerler deney sonuçlarında ki aralıkları ifade etmektedir. Bu çalışmaların haricinde ultra hafif çimentolu kompozit ile ilgili araştırmalarda mevcuttur (Du, 2019).

Tablo 2. Ultra hafif beton çalışmaları ve elde edilen sonuçlar

Araştırmacı	Çimento tipi	Agrega Tipi	UHB Tipi	Yoğunluk (kg/m3)	Basınç dayanımı, MPa	Isıl iletkenlik W/(m.K)
Yu vd. (2015)	CEM I 52.5 N, CEM II/B-V 42.5 N CEM III/A 52.5 N CEM V/A (S-V) 42.5N	Atık cam Nano silika Silika	UHB	650-700	10-12	0.12
Engin (2018)	CEM I 42.5 R	Perlit	UHB	150-468	0.13-0.87	0.039
Adhikary vd. (2020)	CEM I 42.5 R	Genleştirilmiş cam, silika aerojel, prefabrik plastik	UHB	862.4-713.5	3.72-12.2	0.302-0.356
Sikora vd. (2021)	CEM III/A 42.5 N	Nano silika ve Silis dumanı	UHAB HAB	450 850	~2.9-4.8 ~15-17.9	~0.12-0.17 ~0.22-0.34
Serelis ve Vaitkevicius (2022)	CEM I 42.5 R	Atık cam tozu	UHB	600	3-6	-
Bubeník vd. (2023)	CEM I 42.5 R	Cam köpük agrega	UHB	460-500	1.2-2.1	0.111–0.123

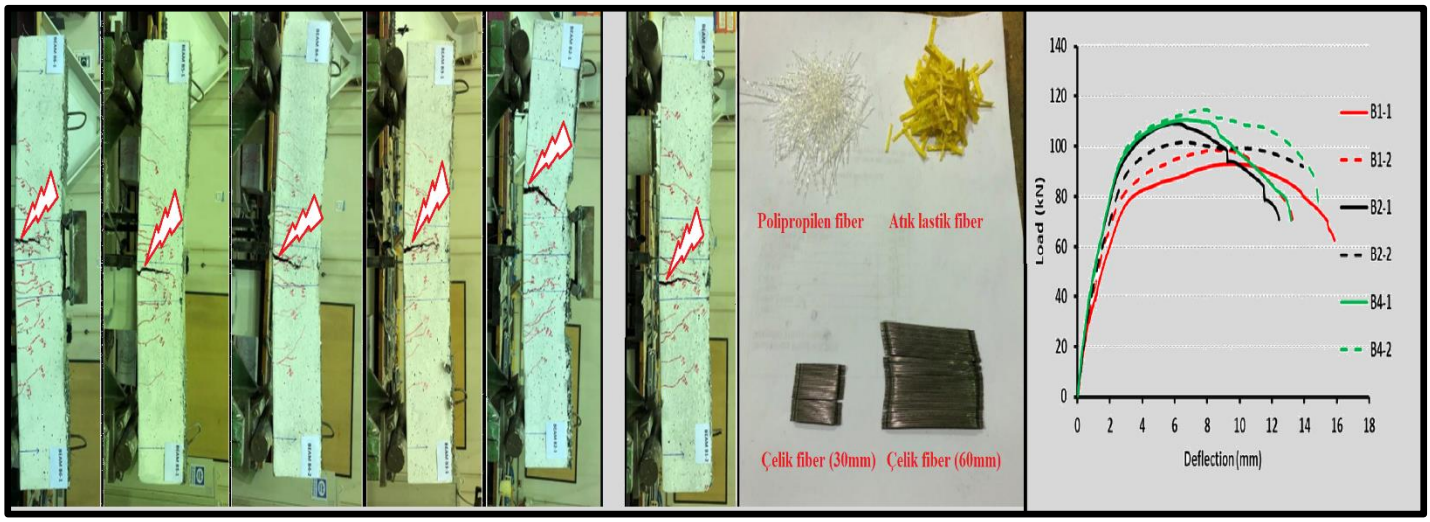
U:Ultra, H:Hafif, A:Agrega, B:beton

Yu vd. (2015) UHB'lerde çimento tipinin ve kür süresinin basınç dayanımına etkisini araştırmıştır. 7 gün kür edilen betonlarda CEM II/B-V 42.5N çimentosu kullanıldığında, 28 gün kür edilen betonda ise CEM V/A (S-V) 42.5 N çimentosu kullanıldığında en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir (Yu, 2015) (Şekil 5). Şekil 5 incelendiğinde yaklaşık 12 MPa'lık bir basınç dayanımı elde edilmiştir.



Şekil 5. UHB'lerde çimento tipinin ve kür süresinin basınç dayanımına etkisi (Yu et al, 2015).

Alshannag vd. (2023) HA ile üretilen kirişlerin eğilme çatlaklarını karşılaştırmışlardır (Şekil 6). HB üretiminde bazı hibrit liflerin belirli oranlarda eklenmesi ile yüksek mekanik dayanım elde edilebileceği sonucuna ulaşmışlardır. İncelenen kirişler (PP lif katkılı, atık lastik lif katkılı ve çelik lif katkılı) deneysel olarak; ilk çatlamaya kadar doğrusal elastik aşama, çoklu büyümenin eşlik ettiği çatlama sonrası aşamada oluşan çatlaklar, çekme donatı aşamasının akması ve göçmenin meydana gelmesine kadarki plastik deformasyon aşamaları incelenmiştir. Şekil 4'te B1 ile belirtilen kontrol betonu, B2 30 mm (B1-1-%0.50, B1-2-%1) çelik lif katkılı betonu, B4 ise 60 mm (B4-1-%0.50, B4-2-%1) çelik lif katkılı betonu temsil etmektedir. HB'lerde çelik lif konulması ve miktarının arttırılması ile mekanik dayanım arttırılabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Alshannag vd., 2023). Çalışmada elde edilen bir diğer sonuç ise PP lif ve atık lastik fiber kullanılan betonlarda eğilme dayanımları fark edilebilir düzeyde arttırmasıdır (Alshannag vd., 2023).



Şekil 6. Farklı hibrit lif katkılı HB'lerde oluşan eğilme çatlakları (Alshannag vd., 2023)

Spiesz ve Heidelberg, (2017) 4 farklı bileşenli UHB'nin özelliklerini araştırmıştır. Bunun için dört farklı bileşenlere sahip beton üretmişlerdir. Üretmiş oldukları beton bileşenleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. UHB bileşenleri (Spiesz ve Heidelberg, 2017)

Malzeme	Karışım 1 (kg/m^3)	Karışım 2 (kg/m^3)	Karışım 3 (kg/m^3)	Karışım 4 (kg/m^3)
CEM III/ C32.5 N	350	-	-	-
CEM I 42,5 N	-	350	350	350
Kireç tozu	-	-	100	-
Uçucu kül	100	100	-	100
HA (0.25-8 mm)	232	232	232	232
Su	147	147	147	147
Süper akışkanlaştırıcı	2	2,2	1,9	3,3
Hava sürükleyici	7,7	7,7	1,8	1,0

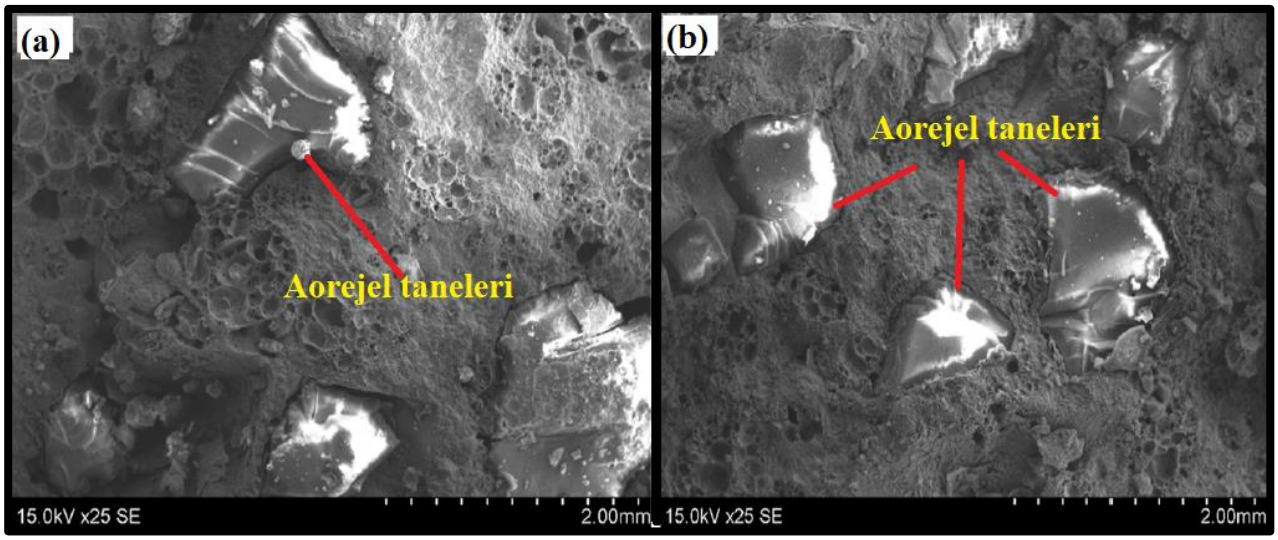
Spiesz ve Heidelberg, 2017 üretmiş oldukları UHB'lerin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 4'de gösterilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde hemen hemen tüm çökme sınıfına ait beton üretilebilmektedir. Farklı akıcılık sınıfına sahip beton üretilebileceği de gözlenmiştir. Yoğunluğu yaklaşık 700 kg/m^3'lük UHB üretilebilmektedir. Ancak, yoğunluğun yüksek miktarda düşmesi basınç dayanımını olumsuz etkilemektedir. Yoğunluğun düşmesi ile ısıl iletkenliğinin de düştüğü gözlenmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. UHB'lerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Spiesz ve Heidelberg, 2017)

Özellik	Karışım 1	Karışım 2	Karışım 3	Karışım 4
Çökme (mm)	247 (S5)	205 (S4)	150 (S3)	23 (S1)
Akıcılık (mm)	500 (F4)	410 (F2)	370 (F2)	270 (F1)
Kuru yoğunluk (kg/m^3)	760	703	739	815
Isıl iletkenlik (W/m.K)	0,14	0,15	0,19	0,20
Basınç Dayanımı (MPa)				
1-gün	0,6	3,5	6,2	6,0
7-gün	10,3	8,0	9,3	10,4
28-gün	10,2	7,9	8,9	12

3.2 Akışkanlık

Uçucu kül (UK), silika aerojel, genleştirilmiş cam ve prefabrik plastik parçaların kullanıldığı çalışmada üretilen UHB'lerin akışkanlıkları incelenmiştir. Betonda kullanılan agreganın boyutunun, şeklinin, harcın sıkıştırılmasında, boşluk oluşturmasında ve akışkanlığını etkilediği literatür çalışmalarınca bilinmektedir. Sutard viskozimetresi ve yayılma tablası kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde aerojel kullanılan serilerde akışkanlığın aerojel miktarının artması ile azaldığı ancak prefabrik plastik parçaların ve aerojellerin birlikte kullanıldığı UHB'lerde, prefabrik plastik parçaların akışkanlığı arttırdığı belirtilmektedir. Şekil 7' de görüleceği üzere UHB'nin hidratasyon sürecinde aerojellerin mikro yapısını etkilemediği belirlenmiştir (Adhikary vd., 2020).



Şekil 7. UHB'deki aerojel tanelerinin mikroyapı görüntüsü (a- su kaybının %7,09 ve b- 7,80 olan beton) (Adhikary vd., 2020)

3.3 Dayanıklılık

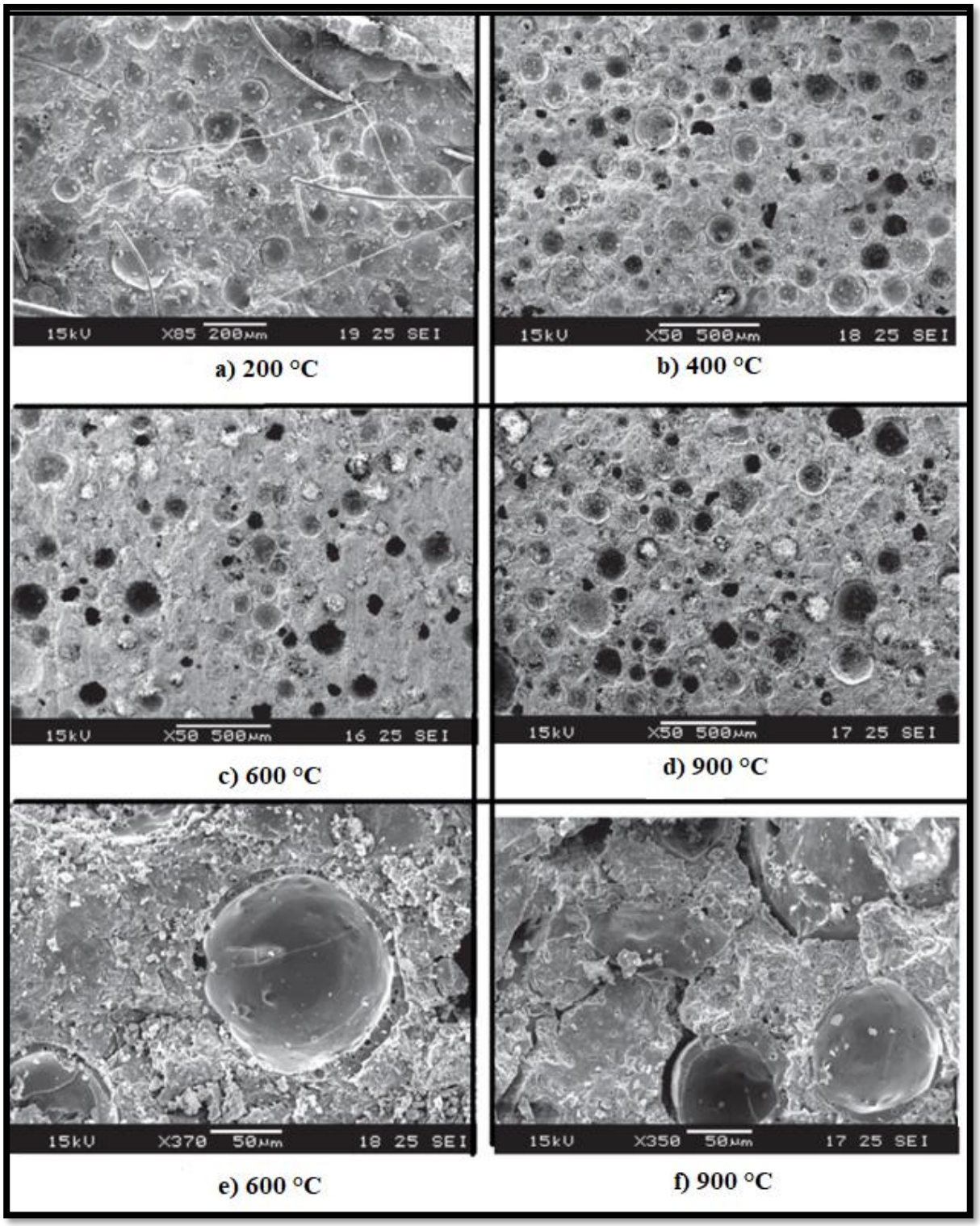
3.3.1 Yangına Dayanıklılık

Önceki araştırmalarda UHB'nin yangına karşı dayanıklılıkları ile ilgili çeşitli çalışmaların yapıldığı görülmüştür. Polistiren boncukların kullanıldığı farklı yoğunluklarda üretilen UHB'lerde, UHB'nin yoğunluğuna bağlı olarak yangına karşı olan direnci incelendiğinde yoğunluğun artması ile yangına karşı olan direncinin de arttığı belirlenmiştir. Şekil 8'de 250 kg/m^3 yoğunluktaki UHB'nin yangın etkisi sonrası diğerlerine göre daha yüksek dayanıklılık sağladığı görülmektedir. Isıl iletkenliğin yoğunlukla olan ilişkisi ise yoğunluk azaldıkça ısıl iletkenliğin azalması şeklinde açıklanabilmektedir (Vilches vd., 2012).



Şekil 8. UHB'nin Yangın Etkisi Sonrası Görünümü (Vilches vd., 2012)

Şekil 9'da farklı sıcaklıkların etkisinde kalan UHB numunelerinin mikro yapı incelemeleri görülmektedir. Yapılan çalışmada PP lif, SD, senosfer içeren büzülmeyi önleyici katkı ve süper akışkanlaştırıcı kullanılan beton numuneler üzerinde 900 °C'ye kadar sıcaklığa karşı gösterdikleri etkiler incelenmiştir. Çalışmada kullanılan PP liflerin 400 °C'de (b) kaybolduğu görülmektedir. Böylece UHB'ler yüksek sıcaklıklarda patlamaya karşı dirençli olabilmektedir. Sıcaklığın artması ile çimento matrisinde büzülmeler oluşmaktadır. Araştırmacılar yapılan çalışmada kullanılan lifin cinsinin, miktarının önemli olduğuna dikkat çekmektedirler. Ayrıca kullanılan çelik liflerin yüksek sıcaklıklarda donatı olmaması halinde yangına karşı yeterince etkili olamayacağı da belirtilmiştir (Huang vd., 2018).



Şekil 9. Farklı sıcaklıklar etkisindeki UHB mikro yapı görüntüleri (Huang vd., 2018)

3.3.2 Donma-Çözülme Dayanıklılığı

Genleştirilmiş perlit agregası kullanılarak üretilen UHB çalışmasında hava sürükleyici beton katkısı da kullanılmıştır. Çalışmada donma-çözülme deneylerinde kütle kaybı %1-3,5 oranında değiştiği belirtilmekte ve kullanılan hava sürükleyici kimyasal katkının artması ile birim hacim ağırlığının azaldığı belirtilmektedir (Engin, 2018).

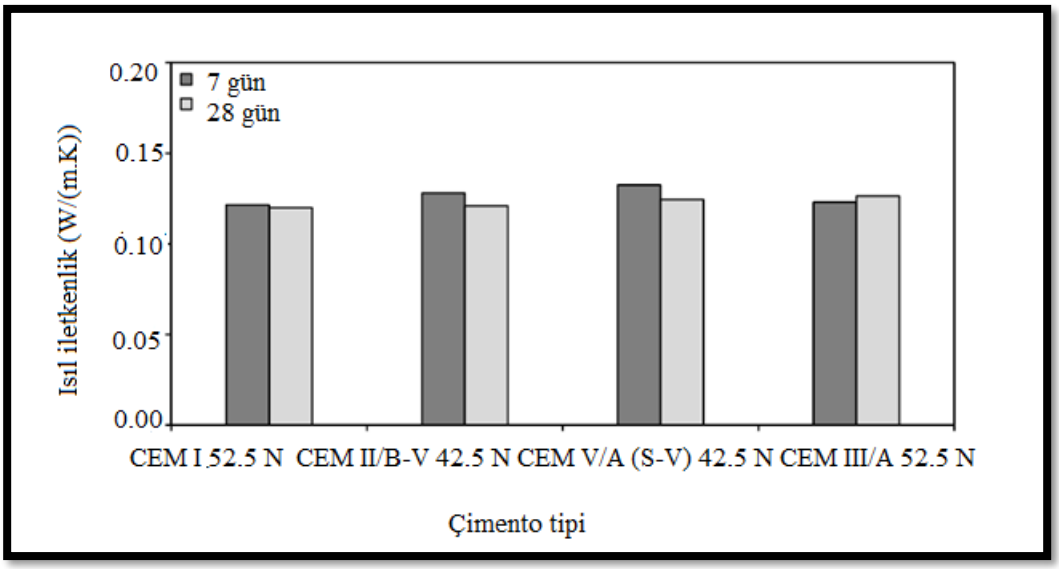
3.3.3 Sülfat Etkisi ve Klor Difüzyonu Dayanıklılığı

Islam vd. (2023) HB üretmek için %100 oranında atık kauçuk kullanmışlardır. Betonlara (28, 56, 90 ve 180. günlerde) su emme, büzülme, sülfat etkisi ve klorür difüzyonu deneylerini uygulamışlardır. Beton içerisindeki atık kauçuk miktarının artması ile sülfat

etkisine dayanıklılığının azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca kauçuk parçacık boyutlarının artması ile klor iyonlarının difüzyonun arttığı da belirlenmiştir (Islam vd., 2023).

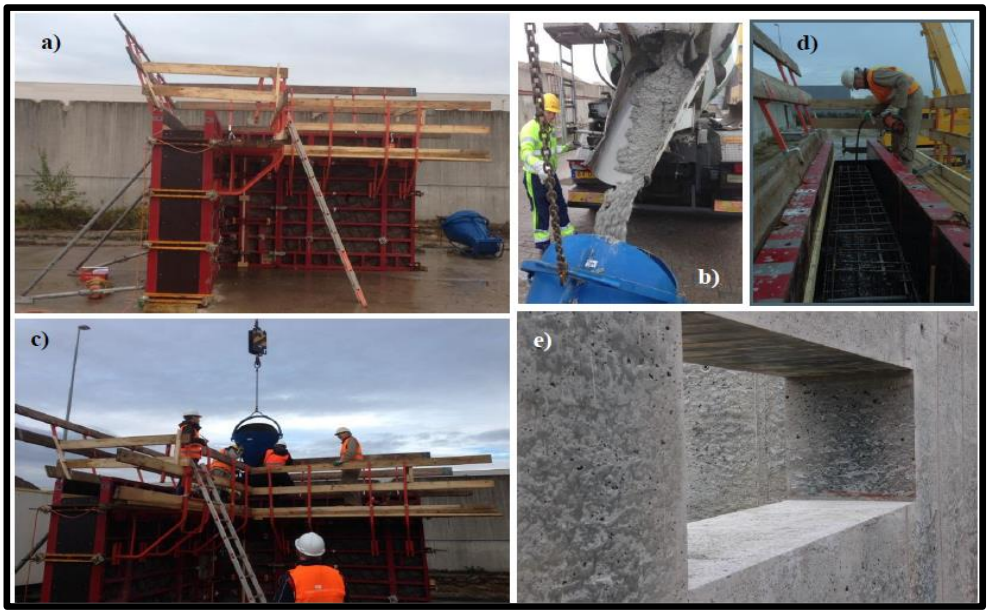
3.4 Isıl İletkenlik Özelliği

Yeni geliştirilmeye çalışılan UHB'ler, monolitik binalarda yalıtım katmanı gerektirmemekte, bu betonlar aynı zamanda hafifliğin dayanımdan daha önemli olduğu yapılarda sıklıkla kullanılmaktadır. İnşaat ve geri dönüşümü kolaylaştıracak, ayrıca mimarlara ve inşaat mühendislerine yeni fırsatlar sağlayacak ve uygulanacak şekilde geliştirilmektedir (Spiesz ve Hunger, 2017). Önceki araştırmalarda HA olarak genleştirilmiş cam ve farklı iki uzunlukta PP lifler kullanılarak mekanik özelikleri geliştirilmeye çalışılan ve lifsiz 750 kg/m^3'lük kuru yoğunluğa sahip UHB üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonunda özel bir cihazla ısıl iletkenlik (W/(m.K)) ölçülerek belirlenmiştir. Yu vd. (2015) çimento tipinin ve kür süresinin ısıl iletkenliğe etkisini araştırmışlardır. Isıl iletkenliklerinin 0,13- 0,14 W/(m.K) arasında olduğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 10). Yapılan başka bir araştırmada lif katkılı UHB üretilmiştir (Yu vd., 2016). Isıl iletkenlik sonuçlarının yaklaşık 0.165 W/(m.K) olduğu ve kullanılan liflerin miktarlar-boylarına göre değişimler gözlenmiştir (Yu vd., 2016). Wang ve Tsai, (2006) 800 ve 1500 kg/m^3 yoğunluğa sahip betonların termal iletkenliklerinin yaklaşık olarak 0.5 - 0.7 W/(m.K) arasında olduğunu gözlemlemişlerdir. Karakurt vd. (2010) zeolit katkılı HB'lerin ısıl iletkenliğinin yaklaşık olarak 0,19 W/(m.K) olduğunu gözlemlemişlerdir. Yapılan araştırmalarda UHB senosfer kullanılarak boşluklu yapının oluşması, yoğunluğun azalması ve etkin boşluk oluşturma ile ısıl iletkenliğin azalabileceği belirlenmiştir (Wu vd., 2015). Cuenca-Moyano vd. (2023) zeytin biyokütlesi taban külünü betonda kullanarak HB üretmişler, böylelikle ısıl iletkenlik değerinin %43 oranında azaltılabildiği ve yalıtım malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşmışlardır. Önceki araştırmalarda çimento esaslı malzemelerde dozajın 250' den 400'e artması ile ısıl iletkenliğin de 0.22'den 0.30 (W/(m.K))'a kadar artabileceği belirlenmiştir (Yu vd., 2015).



Şekil 10. UHB'lerde ısı iletkenliklerinin çimento tipine göre değişimi (Yu vd. 2015)

Önceki çalışmalarda UHB'lerde ısıl özellikleri ile kullanılan HA'ların boyutları arasındaki kullanılan HA'ların boyutları inceldikçe ısıl iletkenliğinin azaldığı belirlenmiştir (Yu vd., 2013). Şekil 11'de (a- kalıpların hazırlanması, b, c, d- beton dökümü, e- kalıplar çıkartıldıktan sonraki görünümü) UHB'nin sahadaki denemesi görülmektedir. Betonun birim ağırlığının 650-700 kg/m^3'e kadar düşürülüp dayanımın 10-12 MPa arasında olması sağlanmıştır. Yapılan çalışmada normal betona göre üretilmiş olan beton arasında yaklaşık 4 kat yoğunluk farkının olduğu görülmüştür. Bunun deprem esnasında binaya gelecek olan deprem kuvvetlerini oldukça aşağıya çekeceği tartışılmaz bir gerçektir. Çalışmada gerçekleştirilen UHB'nin ısıl iletkenliğinin yaklaşık 0.12 W/(m.K) değerinde olduğu görülmüştür (Yu, vd., 2015).



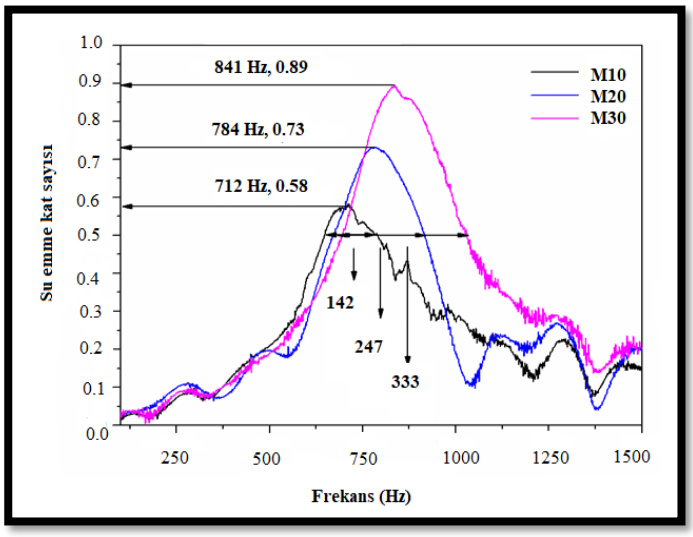
Şekil 11. UHB saha denemesi duvar yapımı (Spiesz ve Hunger, 2017)

3.5 Ses Emme Özelliği

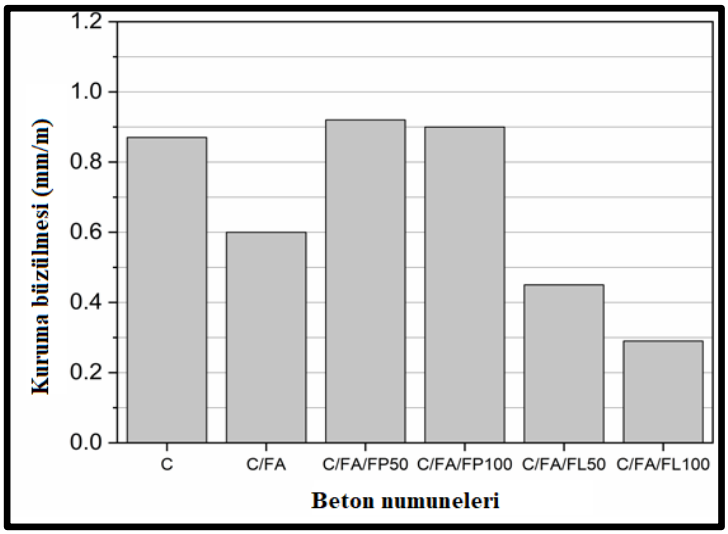
UHB'ler ses emme özelliklerini iyileştirmek amacıyla da kullanılabilmektedirler. Chen vd. (2020), gözenekli ve lifli yapısı, esnek olması ve ses yutucu özelliklerine sahip Miscanthus liflerini (ML), UHB'ye yeni özellikler kazandırmak amacıyla kullanılmışlardır. Yapılan çalışmada kullanılan ML'ler 0-2 mm ve 2-4 mm olmak üzere iki farklı boyutlarda kullanılmıştır. Araştırma sonucunda Miscanthus liflerinin 2-4 mm boyutlarının karışımda arttırılması akustik ses emme özelliğinin daha fazla artmasını sağladığı belirlenmiştir. Şekil 12'de ML'nin miktarının artması ile 0.5 kat sayısında ses emme bandının 333 Hz genişliğine ulaşabildiği görülmüştür (Chen vd., 2020).

3.6 Kuruma Rötresi

Graf-Kaufmann yöntemi kullanılarak UHB'nin 28 günlük kuruma rötre değerleri belirlenmiştir. Kullanılan HA'nın özelliği ve iri agreganın olmamasına bağlı olarak rötre değerlerinin değiştiği belirtilmektedir. Şekil 13'de UK, perlit ve genişletilmiş cam kullanılarak üretilen ultra hafif köpük betonun 28 günlük kuruma rötre sonuçları karşılaştırmaktadır. Genişletilmiş cam (Liaver) ve UK kullanılanımı kuruma rötresini (KB) önemli derecede azalttığı belirlenmiştir (Abd Elrahman, vd., 2019).



Şekil 12. UHB'nin Akustik Ses Emme Grafiği (Chen vd., 2020)



Şekil 13. KB' nin kuruma büzülmesi (Abd Elrahman vd., 2019)

3.7 Sürdürülebilirlik

UHB ve HB'lerle kapsamlı çalışmalar devam etmektedir. Günümüzde yapı malzemesi olarak yeni malzemeler beklenirken atıkların kullanılabilmesi ve sürdürülebilir çözümler göstermesi UHB'lere karşı ilgiyi arttırmakla beraber lider bir inşaat malzemesi haline gelmesi beklenmektedir (Junaid vd., 2022). UHB karışımına, genleştirilmiş, geri dönüştürülmüş özel işlevsel agregalar eklemek hem betonu daha ekolojik bir hale getirecek hem de doğayı, atıkların geri dönüştürülmesi açısından koruyacaktır. Örneğin; cam, mikro silika veya tahıl eklemede bu agregaların boyutları kum ve çakılların yerini alabilecek şekildedir. Karışımların sonucu ise normal betona yakın basınç sonuçları vermektedir. Endüstriyel atıklar gibi organik tarımsal atıklarında HA olarak kullanılabilecekleri görülmüştür. Ayçiçeği sapının HA olarak kullanıldığı ve tarım alanlarında bulunan binalarda (ahır, tahıl ambarı, vb.) kullanılması amaçlanan çalışmada birim ağırlıkları ve basınç dayanımları incelendiğinde çimento miktarına bağlı olarak %20-40 oranında kullanılmasının uygun olduğu belirtilmiştir. Ayrıca düşük ısıl iletkenliği nedeniyle yalıtım malzemesi olarak değerlendirilmesinin de uygun olabileceği belirtilmiştir (Şişman ve Alkaya, 2019).

4. Sonuçlar

Literatürdeki farklı yöntemlerle (HA kullanılarak, iri agreganın çıkartılması ile köpük ajanları kullanımı vb.) elde edilen UHB çalışmalarının olduğu, yapıyı etkileyebilecek avantaj ve dezavantajlarının bulunduğu gözlenmiştir. Çalışmadan çıkarılacak genel sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- UHB'ler birim ağırlıkları nedeniyle yapı yükü azaltılabilmektedir. Bu durumun deprem yüklerinin etkilerini azaltabileceği değerlendirilmiştir.
- UHB üretimi sırasında kullanılan atık HA'lar (uçucu kül, senosfer, genleştirilmiş cam vb.) enerjiden tasarruf sağlayabilmekte, sürdürülebilir ve çevreye karşı duyarlı olmaktadır.
- Kullanılan HA'ların E-modüllerinin düşük olması, UHB'lerin da E-modüllerinin düşük olmasına ve dayanımın düşmesine neden olmaktadır.
- Güncel araştırmalar incelendiğinde UHB'lerin bünyesini oluşturulan boşlukların oldukça yüksek olması nedeniyle basınç dayanımları düşüktür ancak dayanımı arttırmak amacı ile UHB çalışmalarının da yapıldığı görülmektedir.
- UHB'lerde çelik lif ilave edilmesi ve miktarının arttırılması ile mekanik dayanımın arttırılabileceği gözlenmiştir.
- Yapılan çalışmalar incelendiğinde düşük yoğunluk ve düşük ısıl iletkenlikleri nedeniyle UHB'lerin ısı yalıtım malzemesi olarak kullanımının uygun olduğu değerlendirilmiştir.
- Kullanılan malzemelerin ısıl iletkenlik değerlerine göre UHB'lerin ısıl iletkenlik değerlerinde değişkenlik gösterebileceği belirlenmiştir.
- UHB'ler de sünme ve rötrenin normal betonlara göre daha fazla olabileceği değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada mevcut literatür incelenerek ultra hafif betonlarla ilgili son gelişmeler araştırılmaya çalışılmıştır. Yapı yüklerinin azaltılması ile deprem yüklerinin olumsuz etkilerinin azaltılabileceği değerlendirilmiştir. Yapıya gelen deprem yüklerinin azaltılması ile de can ve mal güvenliği sağlanabilmektedir. Önceki araştırmalarda yoğunluğun 2000 kg/m^3'e kadar düşürülebildiği hafif betonların üretilebileceği gözlenmiştir. Ultra hafif betonlarda ise beton yoğunluğunun 700 kg/m^3'e kadar düşürülebileceği belirlenmiştir. Ancak, yoğunluğun yüksek oranda düşürülmesi betonun mekanik dayanımını yüksek oranda azaltmaktadır. Bu nedenle teknolojik (nano-teknoloji kullanılarak üretilen malzemeler, 3 boyutlu yazıcılar vb.) olanakların kullanılması ile UHB'lerin fiziksel, mekanik, mikroyapı ve durabilite özelliklerinin geliştirilmesi önerilmektedir. Ülkemizin hemen hemen tüm topraklarının deprem bölgesinde olduğu düşünüldüğünde, UHB'lerle ilgili daha fazla araştırmanın yapılması ülkemizin ekonomisi açısından büyük önem taşımaktadır.

Kaynaklar

Abd Elrahman, M., El Madawy, M.E., Chung, S.Y., Sikora, P., Stephan, D. (2019). Preparation and characterization of ultra-lightweight foamed concrete incorporating lightweight aggregates. Applied Sciences, 9(7), 1447. doi:10.3390/app9071447

Adhikary, S. K., Rudžionis, Ž., Vaičiukynienė, D. (2020). Development of flowable ultra-lightweight concrete using expanded glass aggregate, silica aerogel, and prefabricated plastic bubbles. Journal of Building Engineering, 31, 101399. doi:10.1016/j.jobe.2020.101399

Ahmmad, R., Jumaat, M.Z., Alengaram, U.J., Bahri, S., Rehman, M.A., Hashim, H.B. (2016). Performance evaluation of palm oil clinker as coarse aggregate in high strength lightweight concrete. J. Cleaner Prod., 112, 566-574. doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.043

Alexandre Bogas, J., Gomes, M. G., Real, S. (2014). Bonding of steel reinforcement in structural expanded clay lightweight aggregate concrete: The influence of failure mechanism and concrete composition. Construction and Building Materials 65, 350-359. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.122

Alshannag, M., Alshmalani, M., Alsaif, A., Higazey, M. (2023). Flexural performance of high-strength lightweight concrete beams made with hybrid fibers. Case Studies in Construction Materials, 18, e01861. doi:10.1016/j.cscm.2023.e01861

Bajare, D., Kazjonovs, J., Korjakins, A. (2013). Lightweight concrete with aggregates made by using industrial waste. J. Sustain. Archit. Civil Eng., 4 (5), 67-73. doi:10.5755/j01.sace.4.5.4188

Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Felekoğlu, K.T, Aydın, S., Yardımcı, M.Y., Topal, A., Öztürk, A.U., (2015). "Beton", Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, No: 334, s 825.

Boshra, A.E., Yoursy, B.S., A.T., El-boridy, A.T. Fayed, S. (2023). Ferrocement composite columns incorporating hollow core filled with lightweight concrete. Engineering Structures, 280, 115672. doi:10.1016/j.engstruct.2023.115672

Bubeník, J., Zach, J., Křížová, K., Novák, V., Sedlmajer, M., Žižková, N. (2023). Behavior and properties of ultra-lightweight concrete with foamed glass aggregate and cellulose fibres under high temperature loading. Journal of Building Engineering, 72, 106677.

BS EN 1992-1-1, Eurocode 2. (2004). Design of concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings, British Standards Institution, UK, London.

Chen, Y.X., Wu, F., Yu, Q., Brouwers, H.J.H. (2020). Bio-based ultra-lightweight concrete applying miscanthus fibers: Acoustic absorption and thermal insulation. Cement and Concrete Composites, 114, 103829. doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103829

Cuenca-Moyanoa, G.M., Cabreraa, M., López-Alonso, M., Martínez-Echevarría, M. J., Agrela, F., Rosales, J. (2023). Design of lightweight concrete with olive biomass bottom ash for use in buildings. Journal of Building Engineering, 69, 106289. doi:10.1016/j.jobe.2023.106289

Du, H. (2019). Properties of ultra-lightweight cement composites with nano-silica. Construction and Building Materials, 199, 696-704. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.225.

Eltaly, B. A., Shaheen, Y. B., EL-boridy, A. T., Fayed, S. (2023). Ferrocement composite columns incorporating hollow core filled with lightweight concrete. Engineering Structures 280, 115672. doi:10.1016/j.engstruct.2023.115672

Engin, C. (2018). Farklı tane boyutlu genleştirilmiş perlit agregası ile üretilen ultra hafif betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi. YL Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi FBE, Van.

Huang, Z., Padmaja, K., Li, S., Liew, J.R. (2018). Mechanical properties and microstructure of ultra-lightweight cement composites with fly ash cenospheres after exposure to high temperatures. Construction and Building Materials, 164, 760-774. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.009

https://theconstructor.org/concrete/ultra-lightweight-concrete-materials-properties-applications/566658, 03.06.2023.

Huang, Z., Zhang, T., Wen, Z. (2015). Proportioning and characterization of Portland cement-based ultra-lightweight foam concretes. Construction and Building Materials, 79, 390-396. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.01.051

Islam, M.M.U., Li, J., Roychand, R., Saberian, M (2023). Investigation of durability properties for structural lightweight concrete with discarded vehicle tire rubbers: A study for the complete replacement of conventional coarse aggregates. Construction and Building Materials 369, 130634. doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.130634

Junaid, M. F., ur Rehman, Z., Kuruc, M., Medveď, I., Bačinskas, D., Čurpek, J., Čekon, M., Ijaz, N., Ansari, W.S. (2022). Lightweight concrete from a perspective of sustainable reuse of waste byproducts. Construction and Building Materials, 319, 126061. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.126061

Karakurt, C., Kurama H., Topcu, I.B. (2010). Utilization of natural zeolite in aerated concrete production. Cement and Concrete Composites, 32(1):1-8.

Liu, H., Elchalakani, M., Karrech, A., Yehia, S., Yang, B. (2021). High strength flowable lightweight concrete incorporating low C_3A cement, silica fume, stalite and macro-polyfelin polymer fibres. Construction and Building Materials 281, 122410. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122410

Li, P., Wu, H., Liu, Y., Yang, J., Fang, Z., & Lin, B. (2019). Preparation and optimization of ultra-light and thermal insulative aerogel foam concrete. Construction and Building Materials, 205, 529-542.

Lo, T.Y., Tang, W.C., Cui, H.Z. (2007). The effects of aggregate properties on lightweight concrete. Building and Environment, 42(8), 3025-3029. doi:10.1016/j.buildenv.2005.06.031

Mohammed, J.H., Hamad, A.J. (2014). Materials, properties and application review of Lightweight concrete. Technical Review of the Faculty of Engineering University of Zulia, 37(2), 10-15.

MVarma, B., Hajare, M.B. (2015). Ferrocement: Composite material and its applications. Int. J. Pure Appl. Res. Eng. Technol., 3, 296-307.

Naaman, A. E. (2000). Ferrocement and Laminated Cementitious Composites; Techno Press 3000: An Arbor. USA.

Roberz, F., Loonen, R.C.G.M., Hoes, P., Hensen, J.L.M. (2017). Ultra-lightweight concrete: Energy and comfort performance evaluation in relation to buildings with low and high thermal mass. Energy and Buildings, 138, 432-442. doi:10.1016/j.enbuild.2016.12.049

Serelis, E., Vaitkevicius, V. (2022). Utilization of glass shards from municipal solid waste in aluminium-based ultra-lightweight concrete. Construction and Building Materials, 350, 128396.

Shi, J., Liu, Y., Xu, H., Peng, Y., Yuan, Q., Gao, J. (2022). The roles of cenosphere in ultra-lightweight foamed geopolymer concrete (UFGC). Ceramics International, 48(9), 12884-12896. doi:10.1016/j.ceramint.2022.01.161

Sifan, M., Nagaratnam, B., Thamboo, J., Poologanathan, K., Corradi, M. (2023) Development and prospectives of lightweight high strength concrete using lightweight aggregates, Construction and Building Materials 362, 129628. doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.129628

Sikora, P., Rucinska, T., Stephan, D., Chung, S. Y., & Abd Elrahman, M. (2020). Evaluating the effects of nanosilica on the material properties of lightweight and ultra-lightweight concrete using image-based approaches. Construction and Building Materials, 264, 120241.

Şişman, C.B., Alkaya, S. (2019). "Usability of Sunflower Stems As Lightweight Aggregate in Concrete Production". Fresenius Environ. Bull, 28, 9983-9990.

Sohel, K.M.A. Al-Jabri, K. Zhang, M.H., Liew, J.R.Y. (2018). Flexural fatigue behavior of ultra-lightweight cement composite and high strength lightweight aggregate concrete. Construction and Building Materials, 173, 90-100. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.276

Spiesz, P. R., Hunger, M. (2017). Structural ultra-lightweight concrete–from laboratory research to field trials. In Eleventh High Performance concrete (11th HPC), Tromsø 6-8 March 2017 (pp. 1-10).

Spiesz, P.R., Hunger, M. (2017). Structural ultra-lightweight concrete – from laboratory research to field trials. In H. Justnes, & H. Braarud (Eds.), Proceedings of the 11th High Performance Concrete conference, HPC Tromso 2017, 1-10).

Subaşı, S., Beycioğlu, A., Emiroğlu, M. (2009). Genleştirilmiş kil agregalı hafif betonlarda bulanık mantık yöntemiyle yarmada çekme dayanımı tahmin modeli geliştirilmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22(3), 157-166. Erişim:https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/320477

Topçu, İ.B., Hafif Beton Özeliklerinin Kompozit Malzeme Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Mart 1988, İstanbul, 126s.

Topçu, İ.B., Hafif Betonla Ferrocement Çadır Yapımı. İnşaat Müh. Gelişmeler. IV. Uluslararası Kongresi, 1-3 Kasım 2000, Doğu Akdeniz Üniv., Gazimagusa, KKTC, ss. 987-996

Topçu, İ.B., Hafif Betonla Ferrocement Kano Yapımı. X. Müh. Sempozyumu, İnşaat Mühendisliği'99, 2-3 Haziran 1999, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, ss. 351-359.

Topçu, İ.B., Işıkdağ, B. (2008). Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete. Journal of Materials Processing Technology, 204(1-3), 34-38. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.10.052

Topçu, İ.B., Uygunoğlu T., Yapı Malzemesi. Nobel Akademik Yayıncılık, Mart 2021, 424 s. ISBN: 978-625-406-964-2, E-ISBN: 978-625-406-965-9.

Topçu, İ.B., Uygunoğlu, T. (2007). Properties of autoclaved lightweight aggregate concrete. Building and Environment, 42(12), 4108-4116. doi:10.1016/j.buildenv.2006.11.024

Topçu, İ.B., Uygunoğlu, T. (2010). Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC). Construction and Building Materials, 24(7), 1286-1295. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.12.007

Topçu, İ.B., Volkanik Cürufların Hafif Beton Agregası Olarak Kullanılma Olanaklarının İncelenmesi. İMO X. Teknik Kongresi, Cilt 1, ss. 437-451, Ekim 1989, Ankara.

Topçu, İ.B., Volkanik Cüruflarla Üretilen Yarı Hafif Betonların Özelikleri. IX. Mühendislik Sempozyumu, 01-04.04.1996, Süleyman Demirel Üniversitesi, Müh.-Mim. Fak., Isparta, ss. 95-97.

Ultra-Lightweight Concrete for 3D printing technologies, https://cordis.europa.eu/project/id/841592, **doi:**10.3030/841592, 2021.

Ünal A, Uygunoğlu T, Yildiz A. (2007). Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation. Building and Environment, 42(2), 584-590.

Uygunoğlu, T., Gencel, O., Brostow, W., Topçu, İ.B., Production of Lightweight Polymer Concrete with Pumice. ASPIC 2012, 7th Asian Symposium on polymers in concrete, İstanbul-Turkey, 3-5 October 2012, pp. 669-677.

Vilches, J., Ramezani, M., Neitzert, T. (2012). Experimental investigation of the fire resistance of ultra-lightweight foam concrete. International Journal of Advanced Engineering Applications, 1(4), 15-22.

Wang, H.T., Wang, L.C. (2013). Experimental study on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete. Construction and Building Materials, 38, 1146-1151. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.09.016

Wang, H.Y., Tsai, K.C. (2006). Engineering properties of lightweight aggregate concrete made from dredged silt. Cement and Concrete Composites, 28(5), 481-485.

Wu, Y., Wang, J. Y., Monteiro, P. J., Zhang, M. H. (2015). Development of ultra-lightweight cement composites with low thermal conductivity and high specific strength for energy efficient buildings. Construction and Building Materials, 87, 100-112. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.04.004

Xie, Y., Li, J., Lu, Z., Jiang, J., Niu, Y. (2019). Preparation and properties of ultra-lightweight EPS concrete based on pre-saturated bentonite. Construction and Building Materials, 195, 505-514. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.091

Yasar, E., Atis, C. D., Kilic, A., Gulsen, H. (2003). Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash. Materials Letters, 57(15), 2267-2270. doi:10.1016/S0167577X(03)00146-0

Ye, Y., Liu, J., Zhang, Z., Wang, Z., Peng, Q. (2020). Experimental study of high-strength steel fiber lightweight aggregate concrete on mechanical properties and toughness index. Adv. Mater. Sci. Eng., 2020, 1-10. doi:10.1155/2020/5915034

Yıldırım, H., Özturan, T. (2013). Mechanical properties of lightweight concrete made with cold bonded fly ash pellets. Erişim:http://dspace.epoka.edu.al/bitstream/handle/1/1242/471-1303-1 PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Yu, Q. L., Spiesz, P., Brouwers, H. J. H. (2013). Development of cement-based lightweight composites–Part 1: mix design methodology and hardened properties. Cement and concrete composites, 44, 17-29. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.03.030

Yu, Q. L., Spiesz, P., Brouwers, H. J. H. (2015). Ultra-lightweight concrete: Conceptual design and performance evaluation. Cement and Concrete Composites, 61, 18-28. doi:10.1016/j.cemconcomp.2015.04.012

Yu, Q.L., Spiesz, P., Brouwers, H.J.H. (2015). Ultra-lightweight concrete: conceptual design and performance evaluation, Cement & Concrete Composites, 61, 18-28. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.012

Yu, R., Van Onna, D. V., Spiesz, P., Yu, Q. L., Brouwers, H. J. H. (2016). Development of ultra-lightweight fibre reinforced concrete applying expanded waste glass. Journal of Cleaner Production, 112, 690-701. doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.082

Zareef, M. A. M. E. (2010). Conceptual and structural design of buildings made of lightweight and infra-lightweight concrete. Ph.D., Thesis, Planen Bauen Umwelt der Technischen Universität, Berlin. doi:10.14279/depositonce-2415

Zhang, M. H., Li, L., Paramasivam, P. (2005). Shrinkage of high-strength lightweight aggregate concrete exposed to dry environment. Materials Journal, 102 (2), 86-92.

Zhang, M., Li, L., Paramasivam, P. (2004). Flexural toughness and impact resistance of steel-fibre-reinforced lightweight concrete. Magazine of Concrete Research, 56 (5), 251-262. doi:10.1680/macr.2004.56.5.251

Zhang, Y., Sun, Q., Xin, H., Liu, Y., Correia, J. A., Berto, F. (2022). Probabilistic flexural fatigue strength of ultra-lightweight cement concrete and high strength lightweight aggregate concrete. International Journal of Fatigue, 158, 106743. doi:10.1016/j.ijfatigue.2022.106743

Zhou, H., Brooks, A. L. (2019). Thermal and mechanical properties of structural lightweight concrete containing lightweight aggregates and fly-ash cenospheres. Construction and Building Materials, 512–526. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.074

Zhou, Y., Gong, G., Huang, Y., Chen, C., Huang, D., Chen, Z., Guo, M. (2021). Feasibility of incorporating recycled fine aggregate in high performance green lightweight engineered cementitious composites. Journal of Cleaner Production, 280(2), 124445. doi:10.1016/j.jclepro.2020.124445

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

UMAGD, (2023) 15(2), 704-713.

10.29137/umagd.1268055

Volume:15 Sayı/Issue:2 June 2023

Research Article

Forecasting Solar Radiation Based on Meteorological Data Using Machine Learning Techniques: A Case Study of Isparta Province

Buğra Güzel[1] *, Onur Sevli[2], Ersan Okatan[1]

[1] *Mehmet Akif Ersoy University, Gölhisar School of Applied Sciences, Department of Computer Technologies and Information Systems, 15400 Burdur, TÜRKİYE*

[2] *Mehmet Akif Ersoy University, Faculty of Engineering-Architecture, Department of Computer Engineering, 15030, Burdur, TÜRKİYE*

Received: *21/03/2023* ***Accepted***: *06/06/2023* ***Published Online:*** *30/06/2023*
Final Version: *30/06/2023*

Abstract

Solar energy systems which is one of the renewable energy sources takes more interest and gains prevalence day by day. A significant problem in solar energy systems as in other many renewable energy sources is the instability of the energy that the system will provide. Forecasting of the energy to be obtained is very important in this respect. In this study, solar radiation has been forecasted using meteorological data taken from the General Directorate of Meteorology for Isparta province. Random Forest (RF), k-Nearest Neighbor (k-NN), Artificial Neural Network (ANN) and Deep Learning (DL) methods have been used for forecasting. In addition, the results of dummy variable usage for time data have been examined with these different methods. According to the findings obtained, it is seen that the dummy variable usage increases performance for ANN and DL methods but decreases performance for RF and k-NN methods. Best results have been obtained with ANN and DL for the forecasting of the solar radiation.

Key Words

"Artificial neural networks, deep learning, dummy variable, random forest, solar radiation forecast"

***Corresponding Author:** bguzel@mehmetakif.edu.tr*

1. Introduction

Due to economic and environmental reasons, more and more investments are made in renewable energy systems and the interest is increasing (Al-Sbou and Alawasa, 2017). According to the report prepared by the International Renewable Energy Agency (IRENA), the energy capacity obtained from renewable energy sources reached 2799 GW at the end of 2020, 26% of which was solar energy systems. In 2020, there was an increase of 10.3% in renewable energy capacity all over the world, and 91% of this increase was provided by solar and wind energy (Anonymus, 2021). This data shows that solar and wind energy will rapidly exceed the rate of other systems in renewable energy systems. The fact that, unstable and discontinuous nature of the energy obtained from renewable energy systems is a disadvantage and causes significant technical problems. Forecasting the energy to be produced makes an important contribution to overcoming these technical problems like sustainability, stability and security of the energy source (Al-Sbou and Alawasa, 2017).

Several studies were made to forecast solar energy produced. In the study of Al-Rousan et al. (2021), the dataset was collected by using a designed sun tracking system. They examined the ML algorithms in 5 categories, and obtained the best results with M5rules, RF, Bagging, k-NN and Multilayer Perceptron (MLP) algorithms in each category. Among these algorithms, the best performance result was obtained with RF. Ozoegwu (2019) proposed an alternative hybrid ANN model to the Nonlinear Autoregressive (NAR) based ANN method in his study and obtained better results. Elsheikh et al. (2019) worked on the modeling of different systems using solar energy with ANN and examined different ANN models. Alomari et al. (2018) made an hourly solar power forecast one day ahead with the solar radiation and solar energy power values taken previously in their study. They obtained results with an R value of 0.99. Ayko and Bozkurt Keser (2021), on the other hand, compared 45 different ML algorithms in their study. They found that ensemble learning methods outperformed other ML algorithms. Erten and Aydilek (2022) compared 4 different regression models as Lasso, Ridge, Elastic and Linear in solar power prediction. In their study, Elastic Regression model outperformed other proposed models.

There is also a time series approach with Long Short-Term Memory Network in the literature for solar radiation forecast (Kara, 2019). Sanders et al. (2017) used weather forecast values together with actual weather data. In the results obtained, they reached 40.2% better average absolute error values in 24-hour forecast values and 7.6% better in 1-hour forecast values. Hamdan et al. (2017) reached Squared Correlation (R^2) values of 97% with Feed Forward and Elman, and 99% with Nonlinear Autoregressive Exogenous (NARX) from ANN models in order to forecast hourly solar radiation values. Ibrahim and Khatib (2017) used Firefly Algorithm (FFA) and RF algorithms together in their studies and they determined the ideal number of trees in the RF with FFA firstly. With this hybrid model they concluded that better performance results could be obtained than ANN, ANN-FFA and RF methods. In their study, Al-Sbou and Alawasa (2017) used hourly weather data to forecast solar radiation 24 hours in advance with the NARX method, and achieved the best performance by using all three of the temperature, wind and humidity values. Yadav et al. (2015) used meteorological data taken from 76 different points in their studies with different ANN methods and they concluded that the variables of temperature, altitude and sun hour are the most effective, while the variables of aperture index, extra-atmospheric solar radiation, latitude and longitude are less effective. Mohammed et al. (2013) used hourly meteorological data and reached the best results with the Marquardt–Levenberg algorithm made with the NARX model in their forecast. Demirtas et al. (2012) concluded that the forecasting results obtained by using k-NN are more successful than other methods such as ANN and Fuzzy in their study.

In his study, Şahin (2013) used month, latitude, longitude and surface temperature data and made forecasting with different ANN models for solar radiation. In another study, Şeker (2021) obtained high-accuracy values by using ANN and concluded that ANN can be used for solar radiation forecast. Şeker (2021) used minute, hour, day and month variables as independent variables in the ANN model. In addition, there are models that forecast solar power generation in the literature (Uğuz et al., 2019).

The use of other coding techniques for variables that do not have numerical superiority but are expressed numerically by nature may affect the performance in ML. For example; although the year expressions do not represent a numerical superiority, they are mentioned numerically (such as 2022, 2023). There are occasional contradictions in the use of variables in the models to be built with such data. Although there are various methods for coding such data, the most used method is the use of dummy variables (Jolly and Gupta, 2021). There are examples in the literature where time variables are used as dummy variables (Hong et al., 2010; Pardo et al.,2002).

The aim of this study is to create a successful 1-hour ahead solar radiation forecasting model for the Isparta province by using different ML algorithms. In addition, the effects of the use of time variables as numerical or dummy on the performance of the model was examined. Time variables (year, month, day and hour) were used as independent variables together with meteorological data.

This article is structured as follows. We introduce the dataset and brief theory of ML models in Section 2. In Section 3, we described the obtained results and discussion. Finally, some concluding remarks are given in Section 4.

2. Material and Methods

In recent years, thanks to numerous algorithms and increasing processor capacities, ML has proven its forecasting power in data science and has gained an important place in the big data world. It has been widely used in studies on forecasting solar radiation and continues to be used with new techniques. But the performance of the algorithm depends on the structure of the dataset; such as feature types, sample size. Models should be tested with the existing dataset to select the best algorithm.

In this section, analysis of the data set and ML methods used were given. The hourly total global solar radiation, wind speed, temperature, relative humidity and cloudiness data of Isparta province were received. The data set was compiled by putting these meteorological data and also year, month, day and time values into separate variables.

RF, k-NN, ANN and DL methods were tested in order to forecast the output of solar radiation with the input of hour, day, month, year, temperature, cloudiness, relative humidity and wind speed. Rapidminer ML software platform has been used to create and test all models. In addition to testing four different ML methods, the effect of using time variables (year, month, day, hour) as numerical or categorical on the model performance was examined. For this purpose, all the used integer time variables were converted into dummy variables and the models were reconstructed and the results have been compared.

2.1. Dataset

The hourly meteorological data covering the 2016- 2020 of Isparta province, which were taken separately from the General Directorate of Meteorology, were brought together with the help of unique codes created with time characteristics. The created data set contains 9 features including year, month, day, hour, temperature, cloudiness, relative humidity and wind speed as inputs and solar radiation as output. Also, the dataset has 40557 samples. The lowest, highest, average and standard deviation values of the meteorological features of the created data set are given in Table 1. Additionally, the correlation matrix of the meteorological features used is given in Table 2.

Table 1. Statistical Values of Dataset

Features	Minimum	Maximum	Mean	Standard Deviation
Solar Radiation (W/m2)	0	61251	11496.37	16800.92
Temperature (ºC)	-13.70	37.40	13.26	9.46
Cloudiness (Okta)	0	8	2.58	2.65
Relative Humidity (%)	7	99	60.93	22.10
Wind Speed (m/s)	0	20.90	1.67	1.27

Table 2. Correlation Matrix for Meteorological Data

Features	Solar Radiation	Temperature	Wind Speed	Relative Humidity	Cloudiness
Solar Radiation	1.00				
Temperature	0.50	1.00			
Wind Speed	0.29	0.19	1.00		
Relative Humidity	-0.56	-0.73	-0.34	1.00	
Cloudiness	-0.10	-0.19	0.30	0.28	1.00

2.2. Machine Learning Algorithms

Solar Radiation forecast could be made by using 4 different methods, which are physical, empirical, statistical and ML. Here, ML methods have been used because these models have higher accuracy and wider application compared to others (Zhou et al., 2021). In the study the total hourly global solar radiation value has been forecasted by using most powerful machine learning methods which are RF, k-NN, ANN and DL. These methods are briefly described in below.

2.2.1. Random Forest (RF)

Decision Tree (DT) is a ML algorithm that aims to forecast by defining rules in a certain order towards nodes or leaves. RF is a method created by bringing together more than one DT to produce more consistent results. In the RF method, the trees in the community are formed randomly, so less correlation occurs between the trees and the forecasting accuracy is higher (Korkmaz et al., 2018).

In some studies, the RF algorithm is used for the forecast of solar radiation. The RF has good accuracy compared to other ML techniques in most of the studies (Bamisile et al., 2022; Benali et al., 2019; Torres-Barrán et al., 2019; Zeng et al., 2020). Using the RF, interactions

between variables and feature selection naturally occurs while learning process. Also, variable importance measures and taking the ordering information into account are extreme features of RF over other ML methods (Sun et al., 2016). In addition, the RF has a few parameters and does not overfit (Ibrahim and Khatib, 2017). For this study the least square method was used and number of trees was 100 and also maximum tree node depth was used as 10.

2.2.2. K Nearest Neighbor (k-NN)

The k-NN algorithm is a ML algorithm that can be used in both regression and classification forecasting problems (Demolli et al., 2019). The k-NN algorithm have been rarely used in energy systems area (Marzouq et al., 2019; Yesilbudak and Ozcan, 2022). In this study, the k-NN is used because of it is power on forecast and for the purpose of comparison. The effect of using dummy variable on the k-NN model was examined and results are analyzed. For the k-NN model, k used as 5 and Euclidean distance measurement used to determine the nearest neighbors.

2.2.3. Artificial Neural Network (ANN)

The billions of nerve cells (neurons) in the human brain try to produce solutions to complex problems in interaction with each other, using the information they have previously learned. Neurons in an ANN algorithm are similarly imitating this, learning the input data in general terms and trying to produce consistent solutions to problems (Demirtas et al., 2012).

The neuron structure in ANN is mainly as in Figure 1, and consists of five main elements: input, weights, transfer function, activation function and output (Arslan et al., 2019).

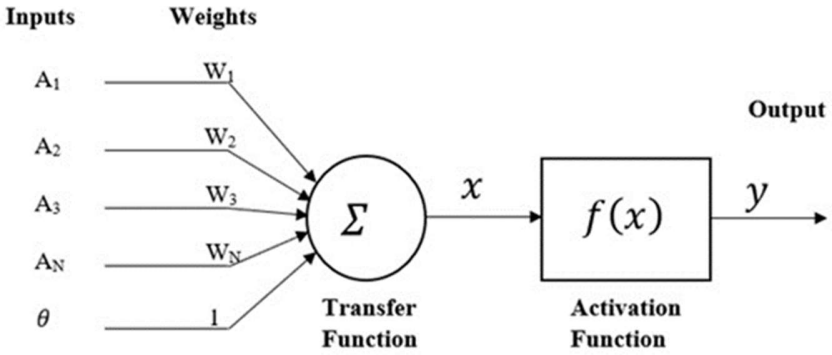


Figure 1. General Structure of a Neuron

In ANN models, a single hidden layer of feed forward back propagation structure is used. While the data flow in forward feeding is one-way without creating a loop between neurons, the error values in the back propagation are compared with real results and the weights at the input are updated (Gullu et al., 2011). The flow chart of the model formed for an ANN is given in Figure 2.

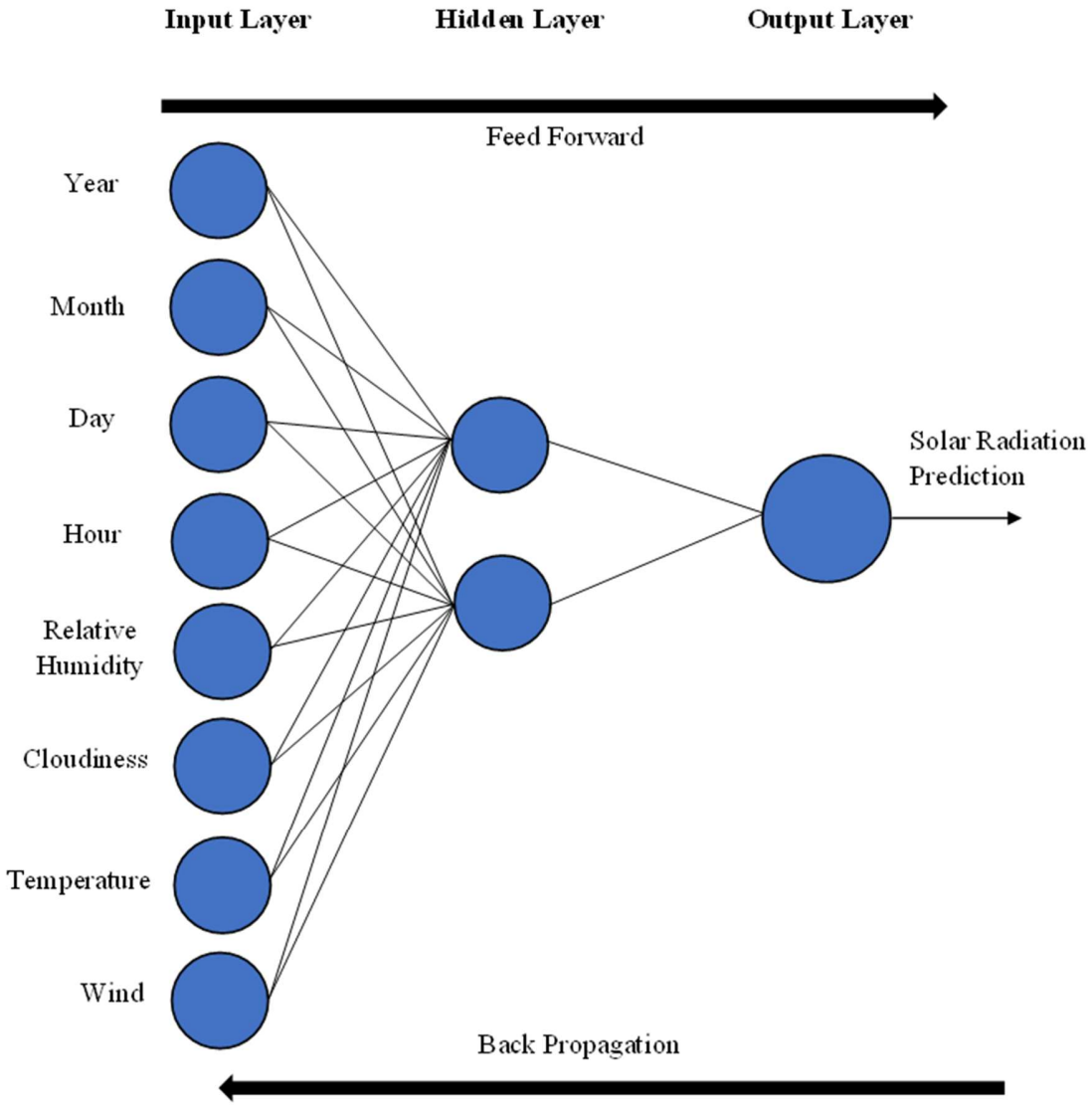


Figure 2. Created Feed Forward Back Propagation ANN Model

For ANN model in the study, Sigmoid function was used as an activation function.

2.2.4. Deep Learning (DL)

The DL algorithm is a subclass of ML based on ANN. In the DL, the entire process is carried out by the algorithm but in other ML algorithms the process needs to be modified manually in case of incorrect forecasting (Kayci, 2021). In this way, DL can better mimic the structure of learning and solving solutions to human learning algorithms compared to other ML algorithms. In addition, as shown in Figure 3, the increase in data in other ML methods supports the increase in performance up to a point, while the performance increase in DL continues with the amount of data (Döş and Uysal, 2019; Kraus et al., 2020).

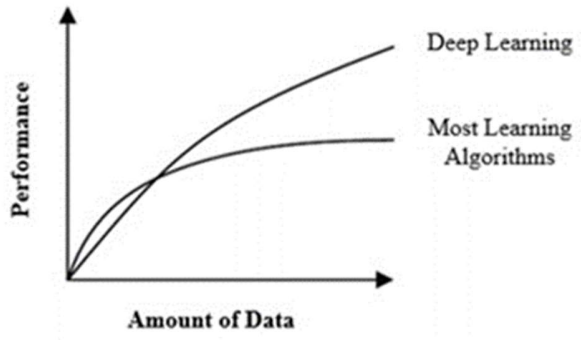


Figure 3. Performance Change According to the Amount of Data For DL And Other Learning Algorithms

In the DL model used, a structure consisting of a multi-layered feed forward backward propagation neural network was used with a stochastic gradient reduction. Also generated model has two hidden layers with 50 neurons in each hidden layer in addition to input and output layers. The generated model is given in Figure 4.

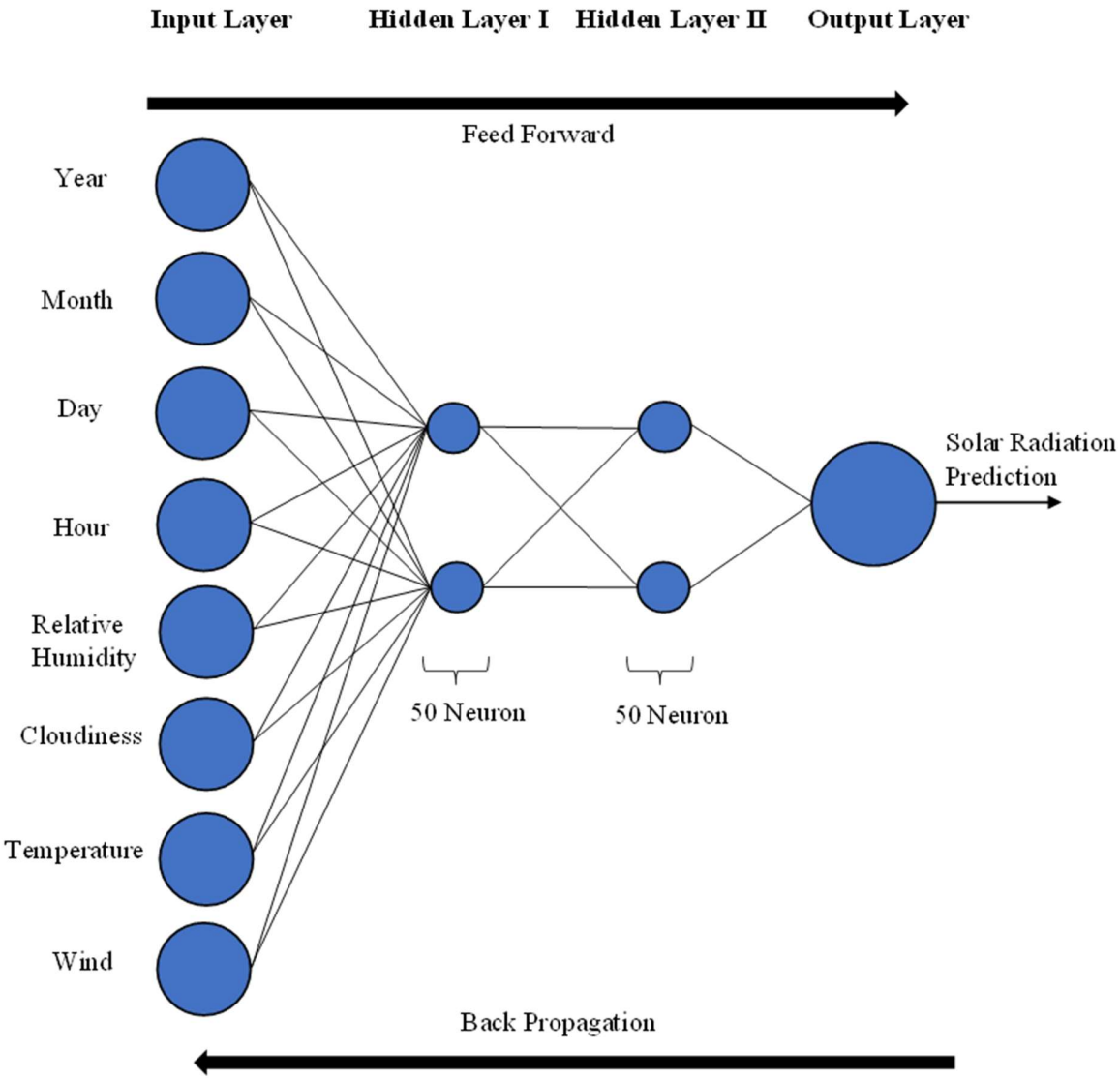


Figure 4. Designed DL model

For DL model in this study, Rectified Linear Unit (ReLU) was used as an activation function.

3. Results and Discussion

Eight different models were created for performance comparison by using dummy, numerical variables and four different algorithms. All models were tested with 5-fold cross validation. R-squared (R^2), The Root Mean Squared Error (RMSE) and Standard Deviation values obtained by cross validation are given in Table 3.

Table 3. Performance Results of the Models

Learning Algorithm	Time Variable Type	R^2	Standard Deviation	RMSE	Standard Deviation
RF	Numerical	0.929	0.004	4526.757	112.351
	Dummy Variable	0.801	0.002	9249.251	60.363
k-NN	Numerical	0.887	0.004	5655.029	80.441
	Dummy Variable	0.561	0.008	11145.828	86.704
ANN	Numerical	0.938	0.004	4266.399	115.200
	Dummy Variable	0.948	0.002	4024.826	153.142
DL	Numerical	0.942	0.003	4104.559	131.380
	Dummy Variable	0.947	0.003	3897.705	81.380

Accordingly, the most successful model in the RMSE value was the DL model with dummy variables. Right after, ANN model using dummy variables, comes next. The model with the worst performance values among all models was k-NN with dummy variables. Comparisons of the best and worst model's actual and forecasted values for a sample day (02.07.2018) are given in Figure 5. In addition, the effect of using dummy variables on the forecast of the same models is shown in Figure 5.

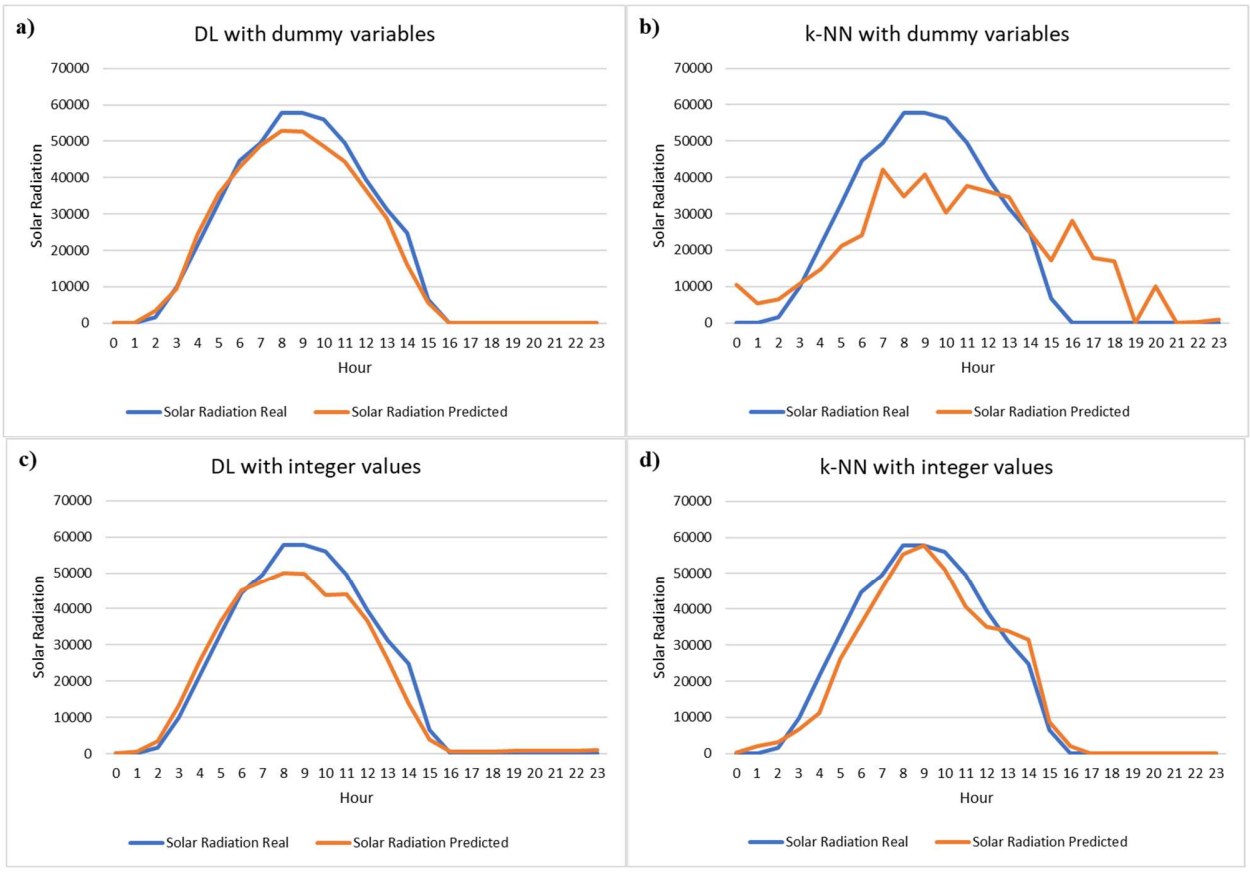


Figure 5. Comparison of the Actual and Forecasted Values For 02.07.2018. (a) DL with dummy variable, (b) k-NN with dummy variable, (c) DL with integer values, (d) k-NN with integer values.

The effect of using dummy variables on model performance is given in Table 4. Here, the RMSE variation describes the percentage change in the performance of the machine learning algorithm with the use of dummy variables. According to the performance results obtained, it was observed that the use of dummy variables decreased the success in the RF and k-NN models, while it increased the success in the ANN and DL models. The highest percentage performance increase occurred in the ANN model, and the highest performance loss occurred in the RF model. Enhancement on the performance of ANN and DL is notable. For ANN model 5.66% less RMSE value and 1% better accuracy has been obtained by using dummy coding.

Table 4. Effect of Dummy Variables on RMSE Values of the Models

Model	RMSE Variation (%)
ANN	-5.66
DL	-5.04
k-NN	97.10
RF	104.32

4. Conclusion

As the amount of electrical energy obtained from solar power plants increases, the forecasting of solar radiation gains importance day by day in order to ensure the balance of electricity production and consumption in the interconnected grid. For this reason, ML methods have become frequently used in this field. In the study, the data set collected from the meteorological data of Isparta province used and comparisons were made about the performance of ML algorithms in solar radiation forecast. In addition, the effect of using time variables as integer or dummy variables on the performance of the models was examined.

Among the models created in the study, the most successful model was the DL model using dummy variables with R^2=0.947 and RMSE=3897.705 (± 81.380) values. In addition, it was observed that the use of dummy variables decreased the performance in the RF and k-NN models and increased the performance in the ANN and DL models. The effect of using a dummy variable depends on the ML algorithm used.

In future studies, a more comprehensive model can be focused on by including data from different stations. In addition, different meteorological features can be added to the dataset, along with geographical parameters, and an increase in performance can be targeted with feature selection.

Acknowledgements

The authors thank the General Directorate of Meteorology for providing the data used in this study.

References

Alomari, M. H., Adeeb, J., & Younis, O. (2018). Solar Photovoltaic Power Forecasting in Jordan using Artificial Neural Networks. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 8(1), 497. https://doi.org/10.11591/ijece.v8i1.pp497-504

Al-Rousan, N., Al-Najjar, H., & Alomari, O. (2021). Assessment of predicting hourly global solar radiation in Jordan based on Rules, Trees, Meta, Lazy and Function prediction methods. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 44, 100923. https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100923

Al-Sbou, Y. A., & Alawasa, K. M. (2017). Nonlinear Autoregressive Recurrent Neural Network Model For Solar Radiation Prediction. 12(14), 10.

Anonymus. (2021). "Renewable capacity highlights", International Renewable Energy Agency (IRENA).

Arslan, G., Bayhan, B., & Yaman, K. (2019). Mersin / Türkiye için Ölçülen Global Güneş Işınımının Yapay Sinir Ağları ile Tahmin Edilmesi ve Yaygın Işınım Modelleri ile Karşılaştırılması. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 7(1), 80–96. https://doi.org/10.29109/gujsc.419473

Ayko, O. & Bozkurt Keser, S. (2021). A comparison of machine learning algorithms for forecasting solar irradiance in Eskişehir, Turkey . International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers , 9 (4) , 103-109. https://doi.org/10.18100/ijamec.995506

Bamisile, O., Oluwasanmi, A., Ejiyi, C., Yimen, N., Obiora, S., & Huang, Q. (2022). Comparison of machine learning and deep learning algorithms for hourly global/diffuse solar radiation predictions. International Journal of Energy Research, 46(8), 10052–10073. https://doi.org/10.1002/er.6529

Benali, L., Notton, G., Fouilloy, A., Voyant, C., & Dizene, R. (2019). Solar radiation forecasting using artificial neural network and random forest methods: Application to normal beam, horizontal diffuse and global components. Renewable Energy, 132, 871–884. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.044

Demirtas, M., Yesilbudak, M., Sagiroglu, S., & Colak, I. (2012). Prediction of solar radiation using meteorological data. 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 1–4. https://doi.org/10.1109/ICRERA.2012.6477329

Demolli, H., Ecemiş, A., Dokuz, A. Ş., & Gökçek, M. (2019). Makine Öğrenmesi Algoritmalarıyla Güneş Enerjisi Tahmini: Niğde İli Örneği.

Döş, M. E., & Uysal, M. (2019). Uzaktan algılama verilerinin derin öğrenme algoritmaları ile sınıflandırılması. Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi, 1(1), 28-34.

Elsheikh, A. H., Sharshir, S. W., Abd Elaziz, M., Kabeel, A. E., Guilan, W., & Haiou, Z. (2019). Modeling of solar energy systems using artificial neural network: A comprehensive review. Solar Energy, 180, 622–639. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.037

Erten, M. Y. & Aydilek, H. (2022). Solar Power Prediction using Regression Models . International Journal of Engineering Research and Development , Special Issue 2022 , 333-342. https://doi.org/10.29137/umagd.1100957

Gullu, M., Yilmaz, M., & Yilmaz, I. (2011). Application of back propagation artificial neural network for modelling local GPS/levelling geoid undulations: A comparative study. In FIG Working Week (pp. 18-22).

Hamdan, M. A., Abdelhafez, E., & Ghnaimat, O. (2017). Prediction of Hourly Solar Radiation in Amman-Jordan by Using Artificial Neural Networks. Int. J. of Thermal & Environmental Engineering, 14(2), 103-108.

Hong, T., Gui, M., Baran, M. E., & Willis, H. L. (2010, July). Modeling and forecasting hourly electric load by multiple linear regression with interactions. In Ieee pes general meeting (pp. 1-8). IEEE.

Ibrahim, I. A., & Khatib, T. (2017). A novel hybrid model for hourly global solar radiation prediction using random forests technique and firefly algorithm. Energy Conversion and Management, 138, 413–425.

Jolly, S., & Gupta, N. (2021). Understanding and implementing machine learning models with dummy variables with low variance. In International Conference on Innovative Computing and Communications: Proceedings of ICICC 2020, Volume 1 (pp. 477-487). Springer Singapore.

Kara, A. (2019). Uzun-Kısa Süreli Bellek Ağı Kullanarak Global Güneş Işınımı Zaman Serileri Tahmini . Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology , 7 (4) , 882-892 . https://doi.org/10.29109/gujsc.571831

KAYCI, B. (2021). Güneş Panellerinin Dört Rotorlu İha Kullanilarak Termografi Yöntemiyle Derin Öğrenme Tabanli Hata Tespit ve Teşhisi (Doctoral dissertation).

Korkmaz, D., Çelik, H. E., & Kapar, M. (2018). Sınıflandırma ve Regresyon Ağaçları ile Rastgele Orman Algoritması Kullanarak Botnet Tespiti: Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Örneği.

Kraus, M., Feuerriegel, S., & Oztekin, A. (2020). Deep learning in business analytics and operations research: Models, applications and managerial implications. European Journal of Operational Research, 281(3), 628–641. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.09.018

Marzouq, M., El Fadili, H., Lakhliai, Z., Mechaqrane, A., & Zenkouar, K. (2019). New distance weighted k Nearest Neighbor model for hourly global solar irradiation estimation. 2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), 1–5. https://doi.org/10.1109/WITS.2019.8723697

Mohammed, L. B., Hamdan, M. A., Abdelhafez, E. A., & Shaheen, W. (2013). Hourly Solar Radiation Prediction Based on Nonlinear Autoregressive Exogenous (Narx) Neural Network. 7(1), 8.

Ozoegwu, C. G. (2019). Artificial neural network forecast of monthly mean daily global solar radiation of selected locations based on time series and month number. Journal of Cleaner Production, 216, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.096

Pardo, A., Meneu, V., & Valor, E. (2002). Temperature and seasonality influences on Spanish electricity load. Energy Economics, 24(1), 55-70.

Sanders, S., Barrick, C., Maier, F., & Rasheed, K. (2017). Solar Radiation Prediction Improvement Using Weather Forecasts. 2017 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), 499–504. https://doi.org/10.1109/ICMLA.2017.0-112

Sun, H., Gui, D., Yan, B., Liu, Y., Liao, W., Zhu, Y., Lu, C., & Zhao, N. (2016). Assessing the potential of random forest method for estimating solar radiation using air pollution index. Energy Conversion and Management, 119, 121–129. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.051

Şahin, M. (2013). Comparison of modelling ANN and ELM to estimate solar radiation over Turkey using NOAA satellite data. International Journal of Remote Sensing, 34(21), 7508–7533. https://doi.org/10.1080/01431161.2013.822597

Şeker, M. (2021). Yapay Sinir Ağı (YSA) Kullanılarak Meteorolojik Verilere Dayalı Solar Radyasyon Tahmini Estimation of Solar Radiation Based on Meteorological Data Using Artificial Neural Network (ANN). 13.

Torres-Barrán, A., Alonso, Á., & Dorronsoro, J. R. (2019). Regression tree ensembles for wind energy and solar radiation prediction. Neurocomputing, 326–327, 151–160. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.05.104

Uğuz, S. , Oral, O. & Çağlayan, N. (2019). PV Güç Santrallerinden Elde Edilecek Enerjinin Makine Öğrenmesi Metotları Kullanılarak Tahmin Edilmesi . International Journal of Engineering Research and Development , Aralık 2019-Özel Sayı , 769-779 . https://doi.org/10.29137/umagd.514933

Yadav, A. K., Malik, H., & Chandel, S. S. (2015). Application of rapid miner in ANN based prediction of solar radiation for assessment of solar energy resource potential of 76 sites in Northwestern India. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 52, 1093–1106. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.156

Yesilbudak, M., & Ozcan, A. (2022). k-NN Classifier Applications in Wind and Solar Energy Systems. 2022 11th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), 480–484. https://doi.org/10.1109/ICRERA55966.2022.9922701

Zeng, Z., Wang, Z., Gui, K., Yan, X., Gao, M., Luo, M., Geng, H., Liao, T., Li, X., An, J., Liu, H., He, C., Ning, G., & Yang, Y. (2020). Daily Global Solar Radiation in China Estimated From High-Density Meteorological Observations: A Random Forest Model Framework. Earth and Space Science, 7(2), e2019EA001058. https://doi.org/10.1029/2019EA001058

Zhou, Y., Liu, Y., Wang, D., Liu, X., & Wang, Y. (2021). A review on global solar radiation prediction with machine learning models in a comprehensive perspective. Energy Conversion and Management, 235, 113960. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113960

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

UMAGD, (2023) 15(2), 714-721

10.29137/umagd.1255685

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Ferrorezonans Modellemesi ile Kaotik Durum Davranışının Analizi ve Gerilim İyileştirmesi

Chaotic State Analysis and Voltage Correction with Ferroresonance Modeling

Mehmet Taciddin Akçay[1], Aysel Ersoy [2]

[1]Haliç Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İstanbul, TÜRKİYE
[2]İstanbul-Cerrahpaşa Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İstanbul, TÜRKİYE

***Başvuru/Received**: 23/02/2023* ***Kabul / Accepted**: 07/06/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Öz

Transformatör sistemlerinde kısa devreler, yanmalar, patlamalar, çeşitli arızalar, tehlikeli olaylar ve ekipman kayıpları gibi bir çok istenmeyen riskli durumlar meydana gelebilmektedir. Bu tip arızalar dış kaynaklı hususlardan dolayı oluşabilirken bazı durumlarda ise devreye bağlı elektriksel yükün karakteristiğinden kaynaklanabilmektedir. Yük karakteristiğinden kaynaklı arızaların en önemli nedenlerinden biri de transformatör sistemlerinde gerçekleşen Ferrorezonans olayıdır. Ferrorezonans lineer olmayan rezonans olarak tanımlanmakta olup sistem için kritik seviyede tehlike oluşturabilmektedir. Bu çalışmada elektrik güç sistemlerinde kaos teorisi anlatılarak ferrorezonans devresi üzerinden uygulama yapılmıştır. Ferrorezonans devresinin analizi yapılarak matematiksel modeli verilmiştir. Nonlineer devre elmanları kullanılırken ilgili eşdeğer devre üzerinden sistem incelenmiştir. Nonlineer dinamik sisteme ait verilen matematiksel model ile ferrorezonans durumundaki koşulların ve gerilim kaynağının etkisi gösterilmiştir. Transformatör kayıplarının neden olduğu ferrorezonans durum davranışları incelenerek farklı durumlara ait benzetimler yapılmıştır. Bu durumlar normal durum, temel frekans ferrorezonans durumu, altharmonik ferrorezonans durumu ve kaotik durum ferrorezonans durumlarını içermektedir. Çalışmanın sonunda kaotik duruma ait yük tarafında meydana gelen gerilim osilasyonun düzeltilmesi için gerilim iyileştirici önerimi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler

"ferrorezonans, harmonik, kaos, kayıp, nonlineer"

Abstract

Many undesirable hazardous situations such as short circuits, burns, explosions, various malfunctions, dangerous events and equipment losses can occur in transformer systems. While such faults may occur due to external factors, in some cases, they may be caused by the characteristics of the electrical load connected to the circuit. One of the most important causes of faults arising from the load characteristics is the Ferroresonance phenomenon that occurs in transformer systems. Ferroresonance is defined as non-linear resonance and can pose a critical level of danger to the system. In this study, the theory of chaos in electrical power systems is explained and a solution is made over the ferroresonance circuit. The mathematical model of the ferroresonance circuit is given by analyzing it. While using nonlinear circuit elements, the system was analyzed over the related equivalent circuit. With the given mathematical model of the nonlinear dynamic system, the effects of the conditions in the ferroresonance state and the voltage source are shown. By examining the ferroresonance state behaviors caused by transformer losses, simulations of different states are made. These states include the normal state, the fundamental frequency ferroresonance state, the subharmonic ferroresonance state, and the chaotic state ferroresonance state. At the end of the study, voltage correction was made to correct the voltage oscillation occurring on the load side of the chaotic state.

Key Words

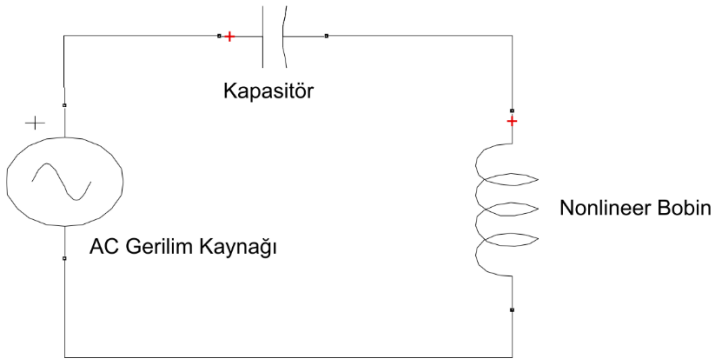
"chaos, ferroresonance, harmonic, loss, nonlineer"

***Sorumlu Yazar:** taciakcay@gmail.com*

1. Giriş

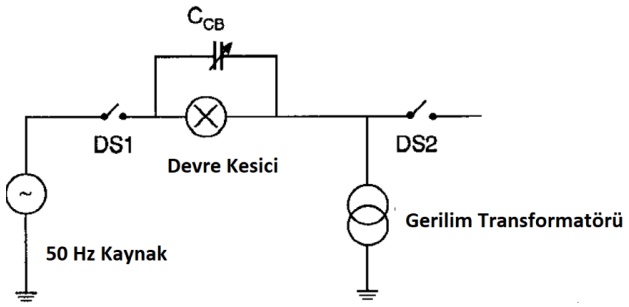
Elektrik sistemlerinde sisteme bağlı devre elemanlarının karakteristiğine bağlı olarak devrenin karakteristiği etkilenebilmektedir. Bu nedenle devrenin davranışının analizi devre elemanlarının doğru analiz edilmesi ile mümkün olmaktadır (AI Zahawi vd., 1998; Mork & Stuehm, 1994; Mozaffari vd., 1995). Elektrik güç sistemlerinde devrede bulunan lineer olmayan elemanlardan dolayı bir takım istenmeyen tehlike durumlar meydana gelebilmektedir. Bunlardan bir tanesi de ferrorezonans olayıdır. Ferrorezonans olayı aşırı gerilim, aşırı akım durumlarında ortaya çıkmaktadır. Bu durum özellikle nonlineer davranan devre elemanlarının sisteme bağlı oluşundan dolayı nonlineer durumların oluştuğu zamanlarda oluşmaktadır. Nonlineer gerilim transformatörleri, kapasitörler bu etkileri oluşturabilmektedir. Kararlı hal durumu sistem parametrelerine ve başlangıç koşullarına bağlı olarak sağlanmaktadır (Bashar vd., 2001; Araujo vd., 1993; Stojkovska vd., 2001; Huawei & Yu, 2007). 1980'lerin sonlarından itibaren kaosun elektronikte gerçek bir fenomen olduğu tespit edilmiştir (Lei vd., 2005). Bu durumun ilerleyen zamanlarda elektronik cihazların performanslarını etkileyen bir husus olduğu gözlemlenmeye başlanmıştır. Doğrusal olmama durumunun etkisini azaltmak için çeşitli önerilen teknikler geliştirilmiştir (Crotti vd., 2021). Bu olayın dağıtım sistemlerinde sık görülmesinin nedeni transformatörlerin doyumu ve hatlardaki kapasitif etkilerdir (Valverde vd., 2013). Enerji kalitesini bozucu ekipmanların varlığı ile bozulma seviyelerinin sürekli artması modern güç sistemlerinde harmonik ölçümünü çok önemli hale getirmektedir (Cataliotti vd., 2018). Çeşitli nonlineer ekipmanların sistemde kullanılması enerji kalitesi problemlerini doğurabilmektedir. Güç elektroniğinin yaygın kullanımı güç kalitesi için ciddi sonuçlar doğurmaktadır (Toscani vd., 2020). Tüm bu durumlar sonucunda doğrusal olmayan çekirdek kayıpları sistemin davranışını değiştirmeye başlayarak sistem ve davranışı tamamen kaotik bölgelere gidebilir (Radmanesh vd., 2012). Ekipmanların kapasitif ve endüktif elemanlarında depolanan enerji, uzun süre devam edebilen düşük frekanslı aperiodik karakterde geçici olaylar üretir (Jałmuzny, 2013).

Ferrorezonans devresinin en basit elektriksel gösterimi gerilim kaynağı, seri kapasitör ve nonlineer bir bobin olarak Şekil 1 ile gösterilmektedir. Doğrusal olmayan bir direnç, doğrusal olmayan bir indüktör ve karışık frekanslı gerilime tabi doğrusal olmayan bir kapasitörden oluşan bir RLC serisi devrenin doğrusal olmayan parametrik salınımlarını incelemek için, bir doğrusal olmayan adi diferansiyel denklemler sınıfı üretilir (Kpomahou vd., 2018). Milicevic ve arkadaşları (2011) ferrorezonansın başlamasının ne ölçüde başlangıç koşullarına ve faz kaymasına bağlı olduğunu belirlemek için bir ferrorezonans devresi üzerinde yürütülen deneysel ve sayısal bir araştırma sunmuştur. Ferrorezonansın meydana gelmesini önlemek için, dc reaktör tabanlı koruma cihazları kullanılabilmektedir (Heidary vd., 2020).



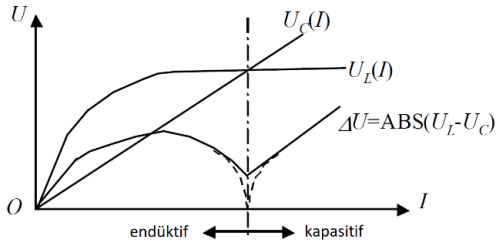
Şekil 1 . Temel Ferrorezonans Devresi

Ferrorezonans olayında sistem 4 farklı durumda incelenmektedir. Bunlar normal durum, temel frekans ferrorezonans durumu, altharmonik ferrorezonans durumu ve kaotik durum ferrorezonans durumlarıdır. Elektrik güç sistemlerinde kaos teoremi genel olarak düzensizliğin düzeni olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2 ile daha gelişmiş bir ferrorezonans devresi verilmektedir.



Şekil 2. Gelişmiş Ferrorezonans Devresi (AI Zahawi vd., 1998)

Şekilde görüldüğü üzere gelişmiş ferrorezonans devresi gerilim kaynağı, iki adet ayırıcı, devre kesici, parallel kapasitör ve gerilim transformatöründen oluşmaktadır. Bu devrede ferrorezonans olayı gerilim kaynağına yakın ayırıcı ve devre kesici kapalı pozisyondayken meydana gelmektedir. Şekil 3'de nonlineer negatif direncin doygun durumdaki gerilim-akım değişimi verilmektedir.



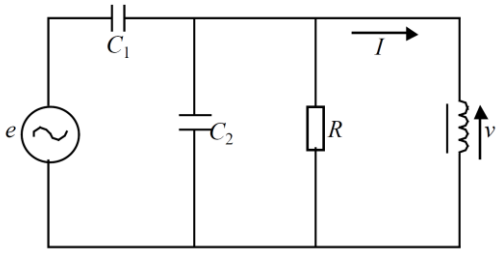
Şekil 3. Doygun Durumda Nonlineer Negatif Direnç

Elektrik güç sistemlerinde kaotik durumların oluşabilmesi için sistemde nonlineer negatif dirençlerin bulunması gerekmektedir. Negatif direnç literatürde akım ve gerilimin birbiriyle ters orantılı olarak davranış gösterdiği devre elemanları olarak tanımlanmaktadır (Shiming vd., 2022). Negatif endüktans fiziksel olarak olmasa da empedans yakınsama tekniği ile gerçekleştirilebilir. Kaos olayı için nonlineer negatif direnç çok önemlidir. Elektrik güç sistemlerinde transformatörde doymuş manyetik çekirdek endüktif gerilim U_L ile kapasitif gerilim U_C'nin birbirine eşit olmasına neden olur. Bu eşitlik noktası ise rezonans noktası olarak adlandırılmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Ferrorezonan devresi nonlinear bobin, kapasiör ve direnç elemanlarından oluşmaktadır. Nonlineer karakteristiğe sahip yük burada ferrorezonans olayına neden olmaktadır.

Modellemesi ve benzetimi yapılan ferrorezonans devresine ait model şekil 4 ile verilmekte olup nonlineer devre elemanının olduğu bölgeye ait akım ve gerilim belirtilmiştir. Bu devre gerilim kaynağı, kapasitör, direnç ve endüktanstan oluşmaktadır.



Şekil 4. Ferrorezonans Devresinin Modeli

Modellenen devre seri kapasitör, parallel kapasitör, gerilim kaynağı, parallel direnç ve parallel nonlineer devre elemanından oluşmaktadır. Devrenin çalışma frekansı 50 Hz'dir. Nonlineer devre elemanına ait akım ve gerilim değeri (1) ve (2) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$V = \frac{d\varphi}{dt}$$ (Bashar vd., 2001) (1)

$$I = a\varphi + b\varphi^7$$ ((Bashar vd., 2001) (2)

φ Nonlineer elemanın akı değeri olup, akım hesabı yedinci dereceden polinom ile yapılmaktadır. A ile b ilgili katsayılar olup bu çalışmada a 3.42 b ise 0.41 alınmıştır.

$$\frac{1}{w} \cdot \frac{\mathrm{dV}}{dt} + \frac{1}{q} \mathrm{V} + \frac{a\varphi + \mathrm{b}\varphi^7}{w(C_1+C_2)} = \mathrm{g} \cdot \cos \mathrm{wt}$$ (AI Zahawi vd., 1998) (3)

(3) eşitliğinde açısal frekans (w) 3.14 alınmıştır. G sürücü genliği ve 1/q ise sönümleme faktörüdür. G'nin ve 1/q'nun açılımları (4) ve (5) denklemleri ile verilmektedir.

$$g = \sqrt{2}E\frac{C_1}{(C_1+C_2)}$$ (AI Zahawi vd., 1998) (4)

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{Rw(C_1+C_2)}$$ (AI Zahawi vd., 1998) (5)

Yukarıdaki eşitliklerle en son ferrorezonans devresine ait metamatiksel model (5) ifadesi ile elde edilmektedir.

$$\frac{1}{W}.\varphi^{\cdot\cdot} + \frac{1}{q}\varphi^{\cdot} + \frac{R}{q}(a\varphi + b\varphi^7) = g.\cos wt$$ (AI Zahawi vd., 1998) (6)

Benzetim için Matlab/Simulink programı kullanılmıştır. Benzetim için dört farklı ferrorezonans durumlarına ait veriler kullanılmıştır. Bu veriler Tablo 1 ile verilmektedir. Ferrorezonans devresinin davranışı bu başlangıç koşullarına ait verilere bağlı olarak değişmektedir.

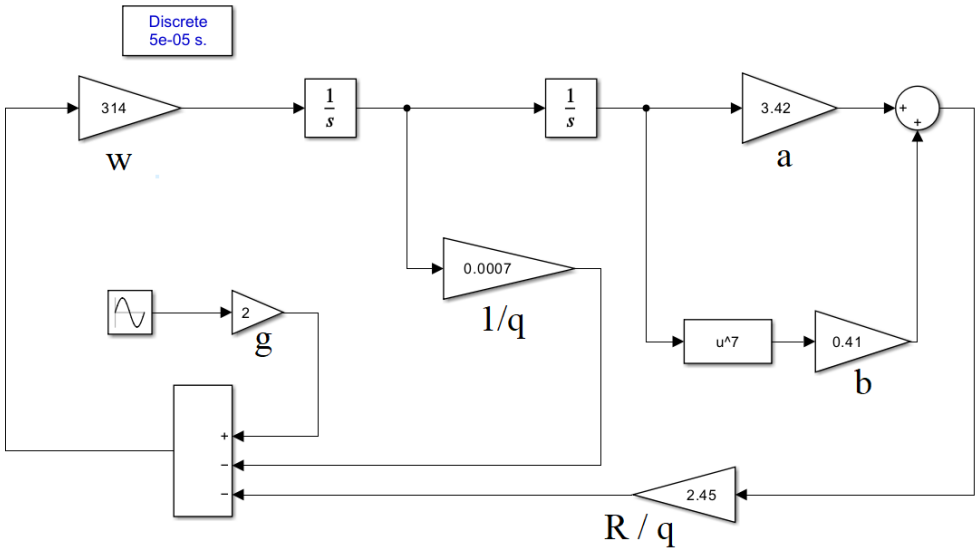
Tablo 1. Dört Farklı Ferrorezonans Durumlarına ait Veriler

R	g	1/q	Transformatör Akı Yoğunluğu	Durumlar
125 MΩ	2	8	Kapalı Periyot Yörünge	Normal Durum
200 MΩ	2	1	Bozuk Periyot Yörünge	Temel Frekans Ferrorezonans
270 MΩ	2	0.006	Çok yörüngeli Periyot Çatallanma	Altharmonik Ferrorezonans
4083 MΩ	2	0.0006	Kaotik Osilasyon	Kaotik Ferrorezonans

Devreye ait direnç, genlik, sönümleme faktörü parametrelerinin değişimine göre transformatör akı yoğunluğunun gerilime bağlı değişim karakteristiği ortaya çıkmaktadır. Birinci durum normal duruma ait parametreleri ifade ederken ikinci durum temel frekans durumuna ait parametreleri ifade etmektedir. Üçüncü ve dördüncü durumlarda ise altharmonik ve kaotik duruma ait parametrelere yer verilmiştir.

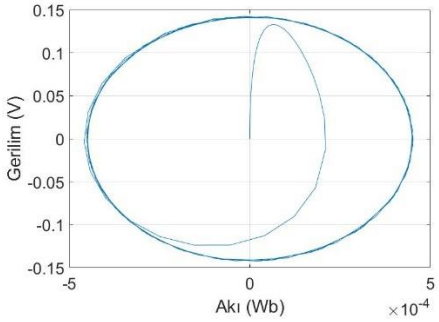
3. Bulgular

Benzetim yardımıyla normal duruma ait ferrorezonans durumu, temel frekans ferrorezonans durumu, altharmonik ferrorezonans durumu ve kaotik duruma ait ferrorezonans durumu analiz edilmiştir. Şekil 5 ile benzetim ekranına ait Simulink blok diyagramı verilmektedir. Örnekleme zamanı için yeterince hassas bir frekans seçilirken integratör için başlangıç koşulları sıfır kabul edilmiştir. Benzetim süresi için ise grafiklerin oluşturulması için optimum süreler dikkate alınmıştır.



Şekil. 5: Benzetim Modeline ait Simulink Diyagramı

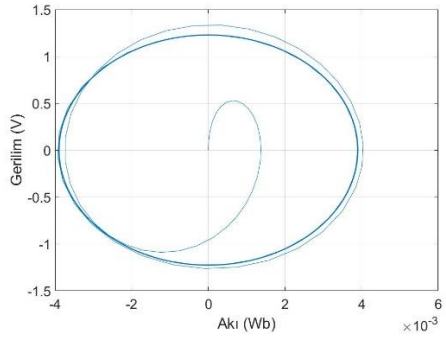
Normal durum ferrorezonans durumunun benzetim sonucuna ait grafik şekil 6 ile gösterilmektedir. Bu grafik ile φ – V karakteristiği verilmektedir. Bu benzerimde kapalı periyotlu bir yörünge şeklinde bir karakteristik ortaya çıkmıştır. Yaklaşık olarak periyodu belirlenebilen ve ilgili kısımlarda gerilim akı değişiminin nasıl bir yol izleyeceği net bir şekilde gözlemlenebilmektedir.



Şekil. 6: Normal Durum Ferrorezonans

Kapalı periyotta bir yörüngeye sahip olması aslında davranışın kestirilebileceği bir durumu ifade etmektedir. Düzensizliğe bir geçiş durumu bu aşamada henüz gözlemlenmemiştir. Akı ve gerilim matematiksel olarak bir çember denklemi oluşturacak biçimde birbiriyle bağlantılı bir değişim izlerken akının -5e-4 Wb ile 5e-4 Wb değişimlerine karşı gerilim -0.15 V ile 0.15 V aralıklarında değişim göstermiştir.

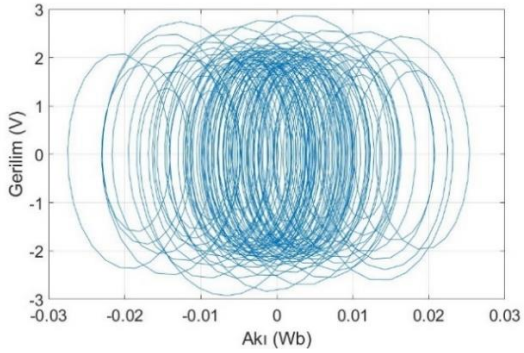
Şekil 7 ile temel frekans ferrorezonans durumuna ait durumun φ – V karakteristiği oluşturulmuştur. Bu durumda birinci duruma göre daha bozuk bir periyodik yörüngeye sahip bir durum elde edilmiştir. Akı ve gerilim matematiksel olarak birden fazla çember denklemi oluşturacak şekilde birbiriyle ilintili bir değişim oluşturuken akının -4e-3 Wb ile 4e-4 Wb değişimlerine karşı gerilim -1.5 V ile 1.5 V aralıklarında değişim göstermiştir.



Şekil. 7: Temel Frekans Ferrorezonans Durumu

Bu durum gerçekleşen bozuk periyotlu yörüngeye aslında düzensizliğe bir geçiş durumunu ifade etmektedir. Tam bir kaotik durumu ifade etmese de normal periyodik yörünge durumunun dışına çıkıldığı net bir şekilde anlaşılmaktadır.

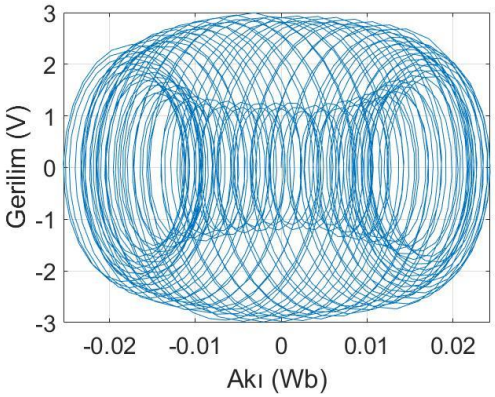
Altharmonik ferrorezonans durumuna ait analiz sonuçları ise şekil 8'de gösterilmektedir. Bu durumda çok fazla ve birbirinden bağımsız periyodik çatallanmalar gözlemlenmiştir. Kaotik durumu tam olarak ifade etmese de ciddi seviyede düzensizlik olduğu şekilde net bir şekilde görülmektedir.



Şekil. 8: Altharmonik Ferrorezonans Durumu

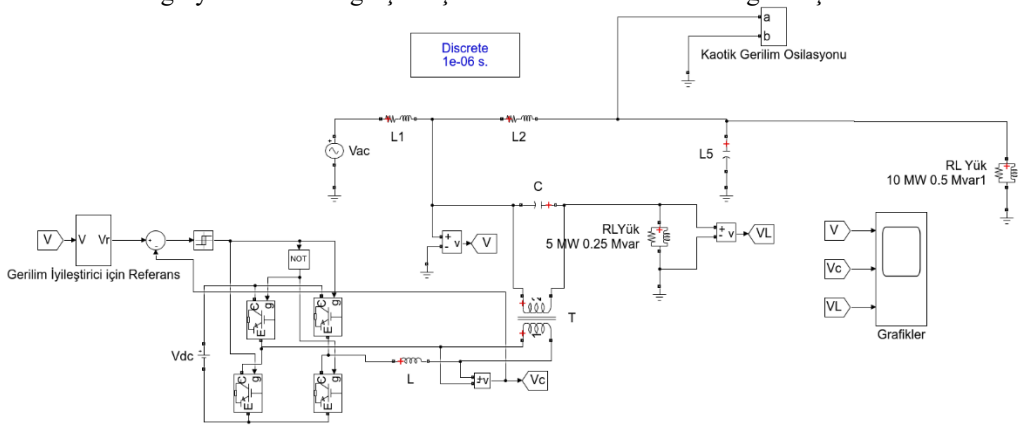
Çok yörüngeli çatallanmalardan dolayı akıya bağlı olarak gerilim değişimi için bir karakteristiğin belirlenmesinde güçlükler yaşanabilmektedir. -0.01 ile 0.01 aralığında dalgalar daha yoğun bir kümeyi oluştursa da ilgili yörüngeler -0.03 ile 0.03 arasında değişen aralıkta yerini almıştır.

Kaotik ferrorezonans durumuna ait sonuç şekil 9 ile gösterilmektedir. Bu durumda kaotik osilasyon durumu tespit edilmiş olup yörüngelerin genişleyen daralan sonra tekrar genişleyen ölçekte bir periyoda göre dağıldığı gözlemlenmiştir.



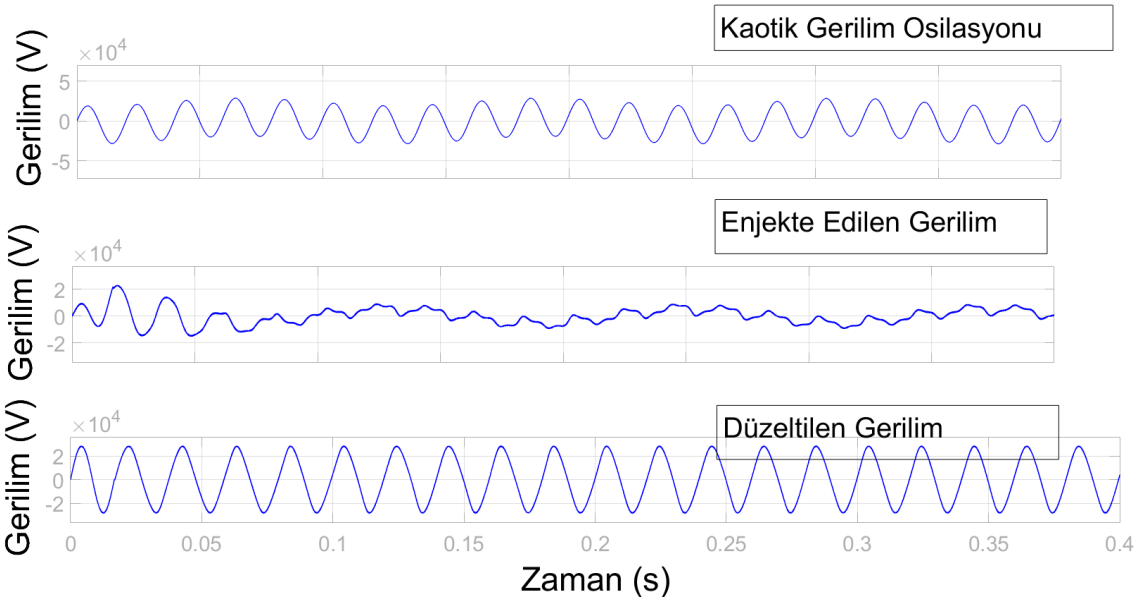
Şekil. 9: Kaotik Ferrorezonans Durumu

Bu durumda görüldüğü üzere düzensizliğin düzeni şeklinde kaotik osilasyonların olduğu bir durum ortaya çıkmaktadır. Genişleme ve daralma bölgelerinin daha sonra tersi bir durumda bu eğilimlerini ortaya çıkardığı gözlemlenmiştir. Kaotik ferrorezonans durumunda ilgili yörüngeler -0.02 ile 0.02 aralıklarında öbeklenmiş şekilde ortaya çıkmaktadır. Şekil 10 ile kaotik durumla ilgili ferrorezonans osilasyonunun trafo merkezine bağlı yük tarafında gerçekleşmesi durumuna ait devre bağlantı şeması verilmektedir.



Şekil. 10: Kaotik Ferrorezonans Durumu için Gerilim İyileştirici Devre Modeli

Faz-faz 34.5 kV üç faz şebekenin bir fazına ait bölüme bağlı yükler tarafında gerçekleşen kaotik ferrorezonans durumuna ait inceleme yapılmıştır. Şekilde 11 ile gerilim iyileştirici devresinin sisteme bağlanması sonucunda elde edilen gerilim ölçümleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere gerilim düzeltici devre paralel devre bağlantısı üzerinden sisteme bağlanarak gerçekleşen kaotik ferrorezonans osilasyon eğrisinin yük tarafındaki etkisi sönümlendirilmiştir.



Şekil. 11: Kaotik Ferrorezonans Durumu için Gerilim İyileştirici Sonrası Grafikler

Tablo 2 ile gerilim iyileştirici sonrası yük tarafında ölçülen gerilime ve kaotik osilasyonlu gerilime ait RMS değerleri verilmektedir. Tabloda görüldüğü üzere gerilim iyileştirici ile şebeke gerilimi ile elde edilen gerilim arasındaki fark % 13'den %2'ye yükseltilmiştir.

Tablo 2. Gerilim İyileştirici Sonrası Elde Edilen Gerilim Değerleri

Ölçüm Noktaları	RMS Gerilim Değeri (kV)	Şebeke Gerilimi Arasındaki Yüzdesel Fark
Osilasyonlu Gerilim	17.34 kV	% 13
Gerilim İyileştirici Sonrası	19.74 kV	% 2

4. Sonuç

Bu çalışmada kaos teoremi anlatılarak, ferrorezonans devrelerinin davranışları incelenmiştir. Ferrorezonans devresi matematiksel ifadeleri ile verilerek dört farklı duruma ait benzetim yapılmıştır. Normal duruma ait ferrorezonans, temel frekans durumunda ferrorezonans, altharmonik ferrorezonans ve kaotik durumda ferrorezonans durumları ayrı ayrı incelenmiştir. Normal durumda düzenli yörüngeye sahip bir eğri ortaya çıkmakta olup temel frekans durumunda daha düzensiz yörünge oluşmaktadır. Altharmoik durumunda ise çok yörüngeli çatallanmaların oluştuğu bir durum ortaya çıkmaktadır. En kritik durum ise kaotik durumda ortaya çıkan ferrorezonans durumu olmaktadır. Bu durumda düzensizliğin düzeni şeklinde bir yapı ortaya çıkmakta olup kaotik osilasyonların meydana geldiği görülmektedir. Farklı parametrelere ait değerler tabloda verilerek bu durumun oluşturduğu etkilerin benzetimi yapılarak ortaya çıkan gerilim-akı değişimi grafikler üzerinden anlatılmıştır.

Elektik güç sistemlerinde kaotik durum devrede bulunan nonlineer devre elemanlarının davranışlarından oluşmakta olup sistem için çok tehlikeli bir durumdur. Bu nedenle sistem tasarlanırken devre elemanlarının analizi ve alınacak tedbirler öncesinde araştırılarak ve hesaplanarak gerekli tedbirler alınmalıdır. Bu duruma ait bir kaotik gerilim osilasyonu meydana gediğinde sisteme olan etkilerin azaltılması için bu çalışmada gerilim iyileştirici önerilmiştir. Gerilim iyileştirici ile şebeke gerilimi ile elde edilen gerilim arasındaki fark % 13'den %2'ye yükseltilerek yüksek performans elde edilmiştir. Gerilim iyileştirici yüksek frekanslı anahtarlama elemanlarından oluştuğu için gerçek zamanlı olarak sisteme paralel bağlantı yoluyla gerilim enjekte ederek gerilim düzeltmesi sağlamaktadır. Nonlineer yük davranışı sistemde istenmeyen elektriksel etkiler yaratacağı için bu etkilerin giderilmesi için çeşitli güç elektroniği ekipmanları, anahtarlama elemanları çeşitli yazılımlar ve filtreleme devreleri kullanılmakta olup bu tasarımların sistemin ihtiyacına yanıt verecek şekilde kullanılması, sisteme verimli bir şekilde kazandırılması büyük önem arz etmektedir.

Referanslar

AI Zahawi , B. A. T., Emin, Z. & Tong, Y. K. (1998). Chaos in ferroresonant wound voltage transformers: effect of core losses and universal circuit behaviour. IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., 145 (1), 39-43.

Araujo, A. E. A., SOUDACK, A. C. & Marti. (1993). Ferroresonance in power systems: chaotic behaviour. IEE PROCEEDINGS-C, 140 (3), 237-240.

Bashar, Z. E., AL Zahawi, A. T., TONG, Y., K. & UGUR, M. (2001). Quantification of the Chaotic Behavior of Ferroresonant Voltage Transformer Circuits. IEEE , Transactions On Circuits And Systems—I: Fundamental Theory And Applications, 48 (6), 757-760.

Cataliotti, A., Cosentiono, V., Crotti, G., Delle Femine, A., Di Cara, D., Gallo, D., Giordano, D., Landi, C., Luiso, M. & Modarres, M. et al. (2018). Compensation of Nonlinearity of Voltage and Current Instrument Transformers. IEEE Trans. Instrum. Meas., 68, 1322–1332.

Crotti, G., D'Avanzo, G., Giordano, D., Letizia, P.S. & Luiso, M. (2021.) Extended SINDICOMP: Characterizing MV Voltage Transformers with Sine Waves. Energies, 14, 1715

Heidary, A., Rouzbehi, K., Radmanesh, H. & Pou, J. (2020). Voltage Transformer Ferroresonance: An Inhibitor Device. IEEE Transactions on Power Delivery, 35(6), 2731-2733.

Huawei, L. & Yu, F. (2007). Impact of Breaker Operations on Ferroresonance in Power Systems. 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, Xi'an, China, 3, 680-682.

Jałmuzny, W. (2013). Analysis of the properties of HV voltage transformers in abnormal operating conditions with particular consideration ˙ of ferroresonance oscillations. Zesz. Naukowe. Rozpr. Nauk./Politech. Łódzka, 454, 1–185.

Kpomahou, Y., Miwadinou, C. & Hinvi, L. (2018). Mathematical modelling and parametric resonances of a nonlinear RLC series circuit. Int. J. Nonlinear Dyn. Cont., 1, 133–153.

Lei, Z. M., Liu, Z. J., Sun, H. X. & Liu, H., X. (2005). Control And Application Of Chaos In Electrical System. International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou, China, 3, 1477-1481.

Milicevic, K., Vinko, D. & Emin, Z. (2011). Identifying ferroresonance initiation for a range of initial conditions and parameters. Nonlinear Dyn., 66, 755–762

Mork, B. A. & Stuehm, D. L. (1994). Application Of Nonlinear Dynamics And Chaos To Ferroresonance In Distribution Systems. IEEE Transactions on Power Delivery, 9(2), 1009-1017.

Mozaffari, S., Henschel, S. & Soudack, A. C. (1995) Chaotic ferroresonance in power transformers. IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., 42(3), 247-250.

Radmanesh, H., Rostami, M. & Khalilpour, J. (2012). Ferroresonance in Voltage Transformer Considering Linear and Nonlinear Core Losses Effect. Int. J. Comput. Electr. Eng., 4, 789–793.

Stojkovska, B., Stefanovska, A., & Golob, R. (2001). Time-delay feedback control of ferroresonant chaotic oscillations. IEEE Porto Power Tech Proceedings, Porto, Portugal, 2, 1-6.

Toscani, S., Faifer, M., Ferrero, A., Laurano, C., Ottoboni, R. & Zanoni, M. (2020). Compensating Nonlinearities in Voltage Transformers for Enhanced Harmonic Measurements: The Simplified Volterra Approach. IEEE Trans. Power Deliv., 36, 362–370.

Valverde, V., Mazón, A. J., & Zamora, I. (2013). Buigues, G. Ferroresonance in Voltage Transformers: Analysis and Simulations. In Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Bilbao, Spain, 20–22 March, 1 (5), 465-471.

Shiming, X. , Yao, S., Jianheng, L. , Xing, L., Yonglu, L.,Wenjing, X. & Mei, S,, (2022). Stabilized Negative Resistance Emulating Control for Grid-Connected Inverter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 69(8), 8599-8603

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development
UMAGD, (2023) 15(2), 722-730.
10.29137/umagd.1294990
Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023
Araştırma Makalesi / Research Article

Eşme/Uşak Alkali Kaynağının Elektroporselen Bünyede Kullanılmasının Araştırılması

Investigation of the Use of Eşme/Uşak Alkali Source in Electroporcelain Body

Aliosman Tiryaki[1], Ceyda Ayça Avcı [1], Ceren Karakaya [1], Aysun Yıldız [1], Baran Tarhan[2] *

[1]Ankara Seramik A.Ş, Ar-Ge Merkezi, 1. 0.S.B. Osmanlı Caddesi No:15, Posta 06930 Sincan, Ankara
[2]Uşak Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Seramik Bölümü, Ankara İzmir Yolu 8. km Bir Eylül Kampüsü, 64200 Uşak

***Başvuru/Received**: 15/05/2023 **Kabul / Accepted**: 08/06/2023 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Öz
Elektroporselen üretiminde çoğunlukla potasyum feldspat türevli ergitici hammaddeler kullanılmaktadır. Potasyum feldspatın tüketimi, sektörde yaşanan gelişmeye bağlantılı olarak giderek artmaktadır. Bunun sonucunda kaynaklar azalmaya başlamış; kalite ve maliyetlerde yaşanan sıkıntılar şirketleri ithalata yöneltmiştir. Ülkemizde seramik üretimi yapan çoğu fabrika yurtdışı kaynaklı potasyum feldspat kullanmaktadır. Yurtdışından seramik hammaddelerinin taşınmasında gemi, konteyner, gümrük, navlun gibi bedellerin varlığı ile nakliye maliyetlerinin yüksek olması sektörün bölgesel ve uluslararası rekabet gücünü olumsuz yönde etkilemektedir. Bununla beraber oluşan karbon emisyonları sebebiyle çevresel etkileri de çok fazladır. Bundan dolayı yerli hammaddelerin kullanılması firmalara yarar sağlamaktadır. Yapılan bu çalışmada Eşme/Uşak bölgesi alkali kaynaklarının Hindistan Bölgesi feldspat kaynakları ile birlikte kullanılarak elektroporselen bünyelerinin teknik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ankara Seramik standart elektroporselen bünye kompozisyonunda Hindistan'dan temin edilen potasyum feldspat oranı kademeli olarak azaltılmış ve yerine Eşme/Uşak alkali kaynağı ilave edilerek bünye reçeteleri geliştirilerek teknik özellikleri incelenmiştir. Elektroporselen bünyelerinde Eşme/Uşak alkali kaynağının kullanımının artan oranlarının deformasyonu artırdığı görülmüştür. Bünyelerde standart potasyum feldspat ile birlikte Eşme/Uşak alkali kaynağının kullanılması porozite ve su emme değerlerinde düşüşe yol açarken pişme küçülmesi ve bulk yoğunluğu arttırmıştır. Sonuç olarak elektroporselen bünyelerinde, bünye kompozisyonunda bazı optimizasyonların yapılmasıyla Eşme/Uşak alkali kaynağının kullanılmasının uygun olacağı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler
"Elektroporselen, potasyum feldspat, Sinterleme"

Abstract
In the production of electroporcelain, mostly potassium feldspar are used. Most factories producing ceramics in Turkey use potassium feldspar from abroad. The presence of costs such as ships, containers, customs and freight in the transportation of ceramic raw materials from abroad and the high costs negatively affect the regional and international competitiveness of the sector. Therefore, the use of domestic raw materials provides advantages to companies. In this study, the effects of alkaline sources of Eşme/Uşak region on the technical properties of electroporcelain bodies were investigated by using feldspar sources from the Indian region. In the standard electroporcelain body composition of Ankara Seramik, the proportion of potassium feldspar supplied from the Indian region was gradually reduced and replaced by Eşme/Uşak alkaline source and examining its technical properties. It has been observed that increasing rates of the Eşme/Uşak alkaline source in electroporcelain structures increase the deformation. The use of Eşme/Uşak alkaline source together with standard potassium feldspar in the ingredients caused a decrease in porosity and water absorption values, while firing shrinkage and bulk density increased. As a result, it was determined that the Eşme/Uşak alkaline source would be appropriate to use in electroporcelain bodies, by making some optimizations in the body composition.

Key Words
Electroporcelain, potassium feldspar, sintering

Sorumlu Yazar: baran.tarhan@usak.edu.tr

1. Giriş

Elektrik enerjisi üretiminde kullanılmak üzere yüksek elektrik direnci özelliklerinden dolayı yalıtım malzemesi olarak kullanılan seramik malzemelere elektroporselen denilmektedir. Toprağa karşı elektriksel yalıtımı sağlamak için kullanılan porselen malzemelere izolatör adı verilmektedir (Yavuz, S.Y.,1994). Porselen, seramik izolatör üretiminde en çok kullanılan malzemedir. Elektroporselen üretiminde, diğer seramik ürünlerinde kullanılan hammaddeler kullanılsa da son ürünün sağlaması beklenen teknik ve karakteristik özellikler açısından son derece özel ürünlerdir(Tiryaki A.,ve ark. 2022).

Elektroporselen bünye reçetelerinde kullanılan seramik hammaddeler; sert(özsüz) hammaddeler (kuvars ve feldspat grubu) ve özlü hammaddeler (kil ve kaolen grubu) olmak üzere temelde iki gruba ayrılır. Killer, porselen bünyeye plastik özellik kazandırıp, mukavemet sağlamak için kullanılırlar. Feldspatlar ise kullanıldıkları bünyede ergitici olarak görev yapıp düşük sıcaklılarda ötektik oluşturarak sinterleme sıcaklıklarını düşürürler (Tarhan M ve Tarhan B.,2019). Elektroporselen bünyeleri ergiticilerin tipine (sodyum veya potasyum), kimyasal kompozisyonları ve oranlarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Elektroporselen bünyelerde potasyum feldspat (K-feldspat: $K_2O.Al_2O_3.6SiO_2$) yaygın olarak kullanılmaktadır. Potasyum feldspat %9-11 oranında K_2O içeren bir ergiticidir (Tiryaki A.,ve ark. 2022).

Seramik sektöründe kullanılan ham maddelerin çoğu üretimin yapıldığı yerlerde bulunmamaktadır. Çok yüksek oranla kullanılan ham maddeler yurt içi veya yurt dışından temin edilip fabrikalara taşınmaktadır. Ülkemizde hammaddelerin nakliyesinde maliyetler epey yüksektir. Bu yüzden bölgesel ham madde kaynaklarını kullanmak seramik üreticileri için üretim maliyetlerini azaltmada büyük pay sahibi olacaktır (Tarhan M ve Tarhan B.,2019).

Ülkemizde porselen üreten seramik fabrikaları feldspatı genellikle Hindistan Bölgesi'nden tedarik etmektedir. Yurtdışı kaynaklı feldspatlar haricinde ülkemizde Eşme / Uşak bölgesinde de endüstriyel alanda kullanılabilecek alkali kaynağı bulunmaktadır. Bu alkali kaynağı sahasının jeolojik ve sondaj çalışmaları tamamlanmıştır (Tarhan M ve Tarhan B.,2019). Seramik malzeme üreten fabrikaların kendilerine yakın olan yerel hammadde kaynağı kullanmalarının nakliye ve diğer maliyetleri düşürmesinin yanı sıra karbon emisyonları açısından değerlendirildiğinde de daha az karayolu taşımacılığı olacağı için karbon ayak izi de azalacaktır. Böylelikle daha çevreci ürünler üretilebilecektir.

Sırlı porselen üretiminde alternatif ham madde olarak Uşak/Eşme Feldspatı kullanılmıştır. Yapılan reçete çalışmalarıyla potasyum feldspat oranı azaltılarak yerine Uşak/Eşme feldspatı kullanılmıştır. Sinterleme özellikleri iyileşmesine rağmen renk özellikleri hammaddenin Fe_2O_3 içerinden dolayı kötüleştiği belirlenmiştir (Tarhan M ve Tarhan B.,2019).

İş gücü gereksinimi yüksek olan seramik üretiminde ham madde, enerji ve işçilik maliyetlerinin fazla olması sektörde alternatif ham madde arayışlarını hızlandırmaktadır. Yapılan çalışmalarda feldspatik hammaddeler ve ikameleri değerlendirilmiştir. Giderek artan kullanımla ilgili ham madde tedariği ve pazar dinamikleri hakkında detaylı değerlendirmeler yapılmıştır. Nefelin siyenit ve sodyum feldspatın porselen üretiminde alternatif ergiticiler olarak çok önemli bir yerinin olduğu belirtilerek mevcut tüketimle kısa süre içinde bu ham maddelerin hızlı bir şekilde tüketileceği öngörülmüştür (Dondi M., 2018). Tarhan B. ve ark. 2022, Yaptığı çalışmada alümina porselen bünyelerinde lityum kaynağı olarak spodümen ilavesi araştırılmış, ilave miktarı ile sinterleşmenin kolaylaştığı ve müllit oluşumunun arttığı belirlenmiştir.

Vitrifiye üretiminde sodyum feldspata alternatif olarak nefelin siyenit ham maddesinin vitrifiye massesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada farklı K_2O/Na_2O oranları ve sodyum feldspat yerine %40 oranında nefelin siyenit kullanımı ile sinterleme sıcaklığı düşmüş, mevcut bünyeye kıyasla sinterleme zamanının ve piroplastik deformasyonun azaldığı ve mekanik özelliklerin iyileştiği belirlenmiştir (Kunduraci N. ve ark.,2016, Kunduraci, N. ve Aydın, T.,2015). Yapılan diğer bir çalışmada ise Çanakkale alkali kaynağının seramik sağlık gereçleri bünyelerinde kullanılması araştırılmıştır. Bu çalışmaya göre Çanakkale bölgesi alkali kaynağının sodyum feldspat yerine kullanılabileceği belirlenmiştir (Tarhan B.,ve Tarhan M. 2019). Sodyum feldspat yerine alternatif ergitici olarak perlit ham maddesi kullanılmıştır. Yapılan çalışmada sodyum feldspat yerine perlit kullanılmasıyla %15 oranına kadar deformasyonun azaldığı belirlenmiştir(Tarhan B. ve Tarhan M. 2022). Vitrifiye pişmiş kırıkları porselen karo bünyesinde sodyum feldspat yerine kullanımı araştırılmıştır. Termal genleşme katsayısının ve deformasyonun azaldığı belirlenmiş ve %5 oranına kadar sodyum feldspat yerine kullanılabileceği belirlenmiştir (Tarhan B. ve ark., 2017).

Bu çalışmada elektroporselen bünyelerinde Hindistan feldspatı ile Uşak/Eşme alkali kaynağının kullanımı ve bünye teknik özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

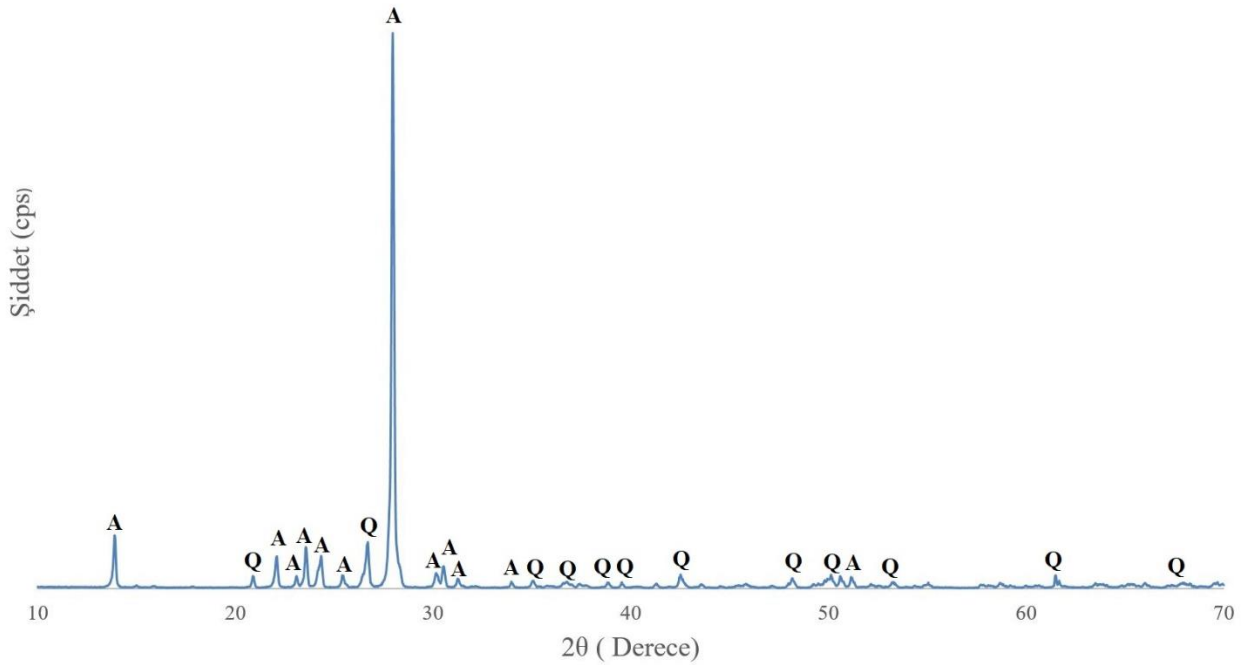
2.1. Kullanılan Hammaddeler

Porselen bünye reçete çalışmalarında farklı tip kaolen, kil, kuvars, potasyum feldspat ve Uşak/Eşme alkali kaynağı kullanılmıştır. Reçetelerde kullanılan ham maddelerden potasyum feldspat Hindistan'dan, Uşak/Eşme alkali kaynağı Eda Madencilik A.Ş 'den temin edilmiştir. Alkali kaynağı hammaddelerinin kimyasal analizleri Çizelge 1'de verilmiştir. Eşme alkali kaynağının XRD grafiği Şekil 1'de verilmiştir. Reçeteler hazırlanırken kullanılan hammaddelere ait kimyasal analizler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Alkali kaynağı hammaddelerin kimyasal bileşimleri (% ağ.)

Hammaddeler	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	K.K
Potasyum Feldspat	68,79	16,9	0,14	0,04	0,38	0,06	2,23	11,06	0,32
Eşme Feldspat	66,03	19,5	0,94	0,64	0,56	0,92	10,3	0,61	0,50

K.K. : Kızdırma Kaybı



Şekil 1. Uşak/Eşme alkali kaynağına ait XRD analizi (Q: Kuvars, A:Albit)

Çizelge 2. Hazırlanan reçetelerde kullanılan hammaddelerin kimyasal bileşimleri (% ağırlıkça)

Hammaddeler	$SiO_2+Al_2O_3$	$Fe_2O_3+TiO_2$	CaO+MgO	Na_2O+K_2O	K.K.
Kuvars	99,45	0,03	0,05	0,31	0,16
Kil 1	84,01	4,09	0,62	2,05	9,23
Kil 2	82,32	3,65	0,75	2,56	10,72
Kaolen 1	81,31	3,03	0,59	3,78	11,29
Kaolen 2	83,01	3,03	0,32	3,22	10,42
Kaolen 3	85,02	1,45	0,23	0,14	13,16

K.K. : Kızdırma Kaybı

2.2. Deneysel Çalışmalar ve Bünye Geliştirme Çalışmaları

Deneysel çalışmalar Ankara Seramik Ar-Ge Merkezinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma için elektroporselen bünyesinde kullanılan potasyum feldspat yerine farklı oranlarda Eşme/Uşak alkali kaynağı kullanılmıştır. Testler için beşer numune hazırlanmış ve sonuçların ortalaması alınarak değerler belirlenmiştir.

Ankara Seramik bünyesinde kullanılmakta olan standart elektroporselen izolatör reçetesi standart reçete(STD) olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada elektroporselen izolatör bünye reçetesinde kullanılmakta olan potasyum feldspat kademeli olarak azaltılarak yerine aynı oranlarda (%6, 10, 14 oranlarında) Eşme/Uşak alkali kaynağı reçeteye ilave edilmiştir ve E1, E2, E3 olarak kodlandırılmıştır. Oluşturulan bünye reçetelerinin oksit oranları Çizelge 3'de verilmiştir.

Standart ve oluşturulan reçeteler doğrultusunda rutubet değerleri ile beraber hesaplanan ham maddeler tartılmıştır. Ham madde karışımları su ilavesi ile birlikte laboratuvar tipi bilyalı değirmenlerde d(50):9-9,2 µm tane boyutuna gelene kadar öğütülmüştür. Ardından hazırlanan masseler 63 µm açıklığındaki elekten elenmiştir. Ortalama 1310 g/lt litre ağırlığındaki masseler, filter preste 13 bar basınçta ortalama % 20 nem olacak şekilde sıkıştırılıp kekler hazırlanmıştır. Uşak Eşme alkali kaynağının reoloji üzrine olumsuz bir etkisi olmamıştır. Kekler 9 devir/dk hızla dönen vakum presten geçirilerek homojenleştirilmesi sağlanmıştır. Vakum pres çıkışı 30 mm çapındaki çubukların rutubeti % 18 ve sıcaklığı 34 °C' dir. Kurutma işlemi ise 110 °C sıcaklığa sahip kurutma fırınında, rutubeti %0,8'in altına inene kadar gerçekleştirilmiştir. Mukavemet çubukları 0,3 m^3 hacme sahip doğalgazlı üretim fırınında standart sinterleme rejimi programında maksimum sıcaklığı 1205°C olacak şekilde sinterlenmiştir.

Hazırlanan numunelerin fiziksel özellikleri (% su emme, görünür (açık) gözeneklilik, pişme mukavemeti, % pişme küçülmesi) TS11237 EN 60672-2 standardına göre yapılmıştır. Görünür(açık) gözeneklilik ve % su emme deneyleri Arşimet prensibi doğrultusunda yapılmıştır. Oluşturulan reçetelerin deformasyon ölçümleri için hazırlanan elektroporselen masseleri ile özel şekilli alçı kalıplarda döküm metoduyla tabletler hazırlanmıştır. Hazırlanan tabletler iki mesnet arasına yerleştirilerek doğalgazlı pilot üretim fırınında sinterlenmiştir. Deformasyon tabletlerindeki sıcaklıkla meydana gelen değişim mm cinsinden ölçülmüştür. Zwick/Roell Z020 marka model cihazla 3 nokta eğme testi uygulanarak ekstrüzyon çıkışı silindirik numunelerin pişme mukavemet testleri yapılmıştır. Potasyum ve Eşme feldspat ham maddelerinin ve hazırlanan deneme reçetelerinin faz analizleri uygun metot ile hazırlanan Rigaku marka Miniflex 600 model XRD cihazı ile 5°-70° aralığında ölçümü yapılmıştır. Standart ve geliştirilen bünyelerin kimyasal analizleri XRF yöntemi ile Panalytical Axios marka cihaz ile yapılmıştır. Bünyelerin mikroyapı incelemeleri Zeiss Supra 50 VP markalı taramalı elektron mikroskobunda(SEM) yapılmıştır. SEM numuneleri asit çözeltisinde dağlanarak hazırlanmıştır. Standart ve çalışılan bünyelere ait ısıl genleşme katsayıları Netzch marka 402 PC model dilatometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bünyelerin renk ölçümleri Precision Colorimeter NR 110 marka model cihazla ölçülmüştür.

Çizelge 3. Standart ve geliştirilen bünye reçetelerinin oksit oranları(%)

Reçeteler	SiO_2 +Al_2O_3	Fe_2O_3 +TiO_2	CaO+MgO	Na_2O	K_2O	K.K.	Toplam Alkali
STD	88,32	1,36	0,42	0,90	4,34	4,63	5,24
E1	88,27	1,44	0,48	1,38	3,75	4,64	5,13
E2	88,25	1,5	0,52	1,69	3,35	4,65	5,04
E3	88,23	1,55	0,57	2,01	2,95	4,66	4,96

SiO_2+Al_2O_3 toplam miktarı hemen hemen bütün reçetelerde sabit kalmıştır. Eşme/Uşak alkali kaynağı ve potasyum feldspat kimyasal olarak değerlendirildiğinde; standart elektroporselen bünyesinde kullanılan potasyum feldspat %11,06 K_2O ve %2,23 Na_2O içerirken, Eşme/Uşak alkali kaynağının K_2O oranı %0,61 ve Na_2O oranı %10,3'tür(Çizelge 1). Bundan dolayı bünye kompozisyonlarında Eşme/Uşak alkali kaynağı artmasıyla Na_2O miktarı artmakta, K_2O miktarı azalmaktadır. Bünyelerde toprak alkali oksit miktarı 0,42'den 0,57 değerine yükselmiştir. Porselen bünyelerde alkali ve toprak alkali oksitlerin varlığı daha az viskoz bir sıvı fazın gelişimini teşvik eder ve bu da, yoğunlaştırma kinetiğini geliştirir(Ozturk B.Z.,ve Ay N.(2012). Bünye kompozisyonlarında potasyum feldspat yerine Eşme/Uşak alkali kaynağı kullanılması toplam alkali oksit miktarını da azaltmıştır. Eşme/Uşak alkali kaynağındaki alkali miktarı potasyum feldspattan daha az olduğu için toplam alkali miktarı da 5,24'den 4,96'ya azalmıştır. Bununla beraber Eşme/Uşak alkali kaynağı miktarı yükseldikçe Fe_2O_3 +TiO_2 miktarı yükselmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Fiziksel ve Optik Özellikler

Standart (STD) ve geliştirilen bünyelere ait fiziksel özellikler Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Elektroporselen izolatör bünyelerinin fiziksel özellikleri

	STD	E1	E2	E3
Pişme Küçülmesi (%)	9,15	9,26	9,38	9,48
Deformasyon (mm)	13	14	16	19
Görünür Katı Yoğunluğu (gr/cm³)	2,35	2,37	2,37	2,37
Su Emme (%)	0,03	0,03	0,02	0,02
Porozite (%)	0,03	0,02	0,01	0,0
Pişme Mukavemeti (kg/cm²)	1180	1186	1186	1189

Standart elektroporselen izolatör bünyesinde potasyum feldspat oranının azaltılması ve yerine Eşme/Uşak alkali kaynağı kullanımıyla geliştirilen bünyelerin su emme değerlerinde gözle görülür bir fark gözlenmemiştir. Eşme/Uşak alkali kaynağı artan oranları ile pişme küçülme değerlerinde %1 lik bir atış bir artış gözlemlenmiştir. Bulk yoğunluk değeri Eşme/Uşak alkali kaynağı ile birlikte çok az miktarda artmıştır. Porozite miktarının düşmesi ve su emme değerlerinin hemen hemen aynı kalması kapalı por miktarının azaldığı sonucuyla değerlendirilmiştir. Eşme/Uşak alkali kaynağının potasyum feldspat yerine kullanımı ile geliştirilen bünyelerin daha fazla sinterlendiği belirlenmiştir. Alkali oksit(Na_2O, K_2O) miktarı seramik porselen bünyelerinde sinterlemeyi etkileyen ana parametrelerden bir tanesidir. Bünyelerde kullanılan alkali kaynağı miktarı arttıkça bünyelerin sinterlenmesi de hızlanmaktadır (Becker, C.R.ve ark ,2000, Tarhan B. ve ark., 2017, Sanchez, E. Ve ark ,2001, Tarhan, M, 2010). Bunun yanında bünyede bulunan serbest demir oksit de sinterlemeyi etkilemektedir. Demir oksit, ötektik sıcaklıkları düşürerek ergitmeye yardımcı olmaktadır (Vieira, C.M.F. ve Monteiro, S.N., 2007. Cengiz Ö., 2011). Eşme/Uşak alkali kaynağı potasyum feldspata oranla daha yüksek Fe_2O_3 içermektedir. Bu nedenle Eşme/Uşak alkali kaynağı kullanılarak oluşturulan bünyelerde toplam alkali miktarı düşerken, Na_2O ve Fe_2O_3 oranında artış meydana gelmiştir. Sinterlenmede de artış gerçekleşmiş, bununla orantılı olarak pişme küçülme değerleri artmıştır.

Pişirim esnasında yüksek sıcaklıklarda amorf faz içeriğinin yüksek olmasından ötürü bünyenin kendi ağırlığını kaldıramayarak şekil bozukluğuna uğramasına piroplastik deformasyon denir. Piroplastik deformasyon elektroporselen üretiminde önemli bir parametredir. Elektroporselenlerin sinterlenmeden sonra deforme olmadan kendini askıya alabilmiş olmaları beklenir. Özellikle askıda pişirilen ürünlerde deformasyon fazla olursa ürünün gövdesinde birtakım sünme-uzama davranışlarına neden olabilmektedir. Büyük hacimli yüksek gerilim izolatörlerinin, sinterleme sırasında kendi ağırlıklarını kaldıramayarak askıya alamaması neticesinde ürünler zayiat olarak ayrılmaktadır (Tiryaki A.,ve ark. 2022). Eşme feldspatı miktarı arttıkça deformasyon değerleri de artmıştır. Deformasyonda bu artış iki şekilde açıklanabilir; potasyum oksit miktarının azalması ile sodyum oksit miktarı artmış ve Na/K oranı değişmiştir. SiO_2 camına alkali ve toprak alkali oksitlerin eklenmesi, daha fazla köprü oluşturmayan oksijen bölgesi nedeniyle amorf faz viskozitesinde bir azalmaya neden olur (Tarhan, M, 2010, Eppler, R. A. ve Eppler, D. R. 2000, Aydın T., 2006., Aydın T., 2006). Karışık alkali etkisi, camsı bir ağa iki tür alkali iyonu sokar. Bir alkali camdaki bir tür alkali iyonu kademeli olarak bir başkasıyla değiştirildiğinde, birçok fiziksel ve yapısal özellikte doğrusal olmayan değişimlere neden olur. Farklı alkali iyonlarının aynı anda bulunduğu karışık alkali etkisi, viskozitede düşüşe sebep olur (Tarhan B. ve ark., 2017, Eppler, R. A. ve Eppler, D. R. 2000). Bu viskozite düşüşünün deformasyon artışının sebebi olduğu değerlendirilmektedir. Potasyum feldspat ve silika ile doğru oranlarda kullanıldığında camsı fazın gelişmesine destek olmaktadır (Viola, C., ve Kovic, B.T., 1994). Potasyum feldspat ile sodyum feldspatın oluşturdukları peritektik sıcaklık 990 °C, ötektik sıcaklık 1050 °C'dir (Becker, C.R.ve ark ,2000). Sodyum feldspat potasyum feldspata göre daha yüksek sıcaklıklarda peritektik oluşturur. Böylelikle sodyum feldspatlı kompozisyonlar potasyum feldspatlı bünyelere göre düşük sıcaklıklarda yüksek yoğunluğa ulaşır. Bunun asıl sebebi oluşan eriyik haldeki camsı fazın viskozitesinin potasyum feldspat içeren kompozisyonlarda sodyum feldspat içeren kompozisyonlara göre daha yüksek olmasıdır (Tarhan B. ve Tarhan M. 2019, Tarhan, M, 2010, Viola, C., ve Kovic, B.T., 1994). Na/K oranı değiştikçe yani Eşme/Uşak alkali kaynağı miktarının yükselmesiyle oluşan amorf fazın viskozitesi düşmektedir. Bu yüzden deformasyon da yükselmektedir. Benzer şekilde Fe_2O_3, ötektik sıcaklıkları düşürerek düşük sıcaklıkta düşük viskoziteli amorf faz gelişimine yardımcı olmaktadır. Demir oksit miktarının Eşme/Uşak alkali kaynağı miktarı ile artmasıyla deformasyonun yükselmesine yardımcı olmuştur. (Tarhan M. ve Tarhan B., 2019, Cengiz Ö., 2011, Vieira, C.M.F. ve Monteiro, S.N., 2007).
Pişme mukavemeti değerlerinde gözle görülür bir yükseliş olmamıştır.

Çizelge 5. Elektroporselen izolatör bünyelerinin renk ölçümü değerleri

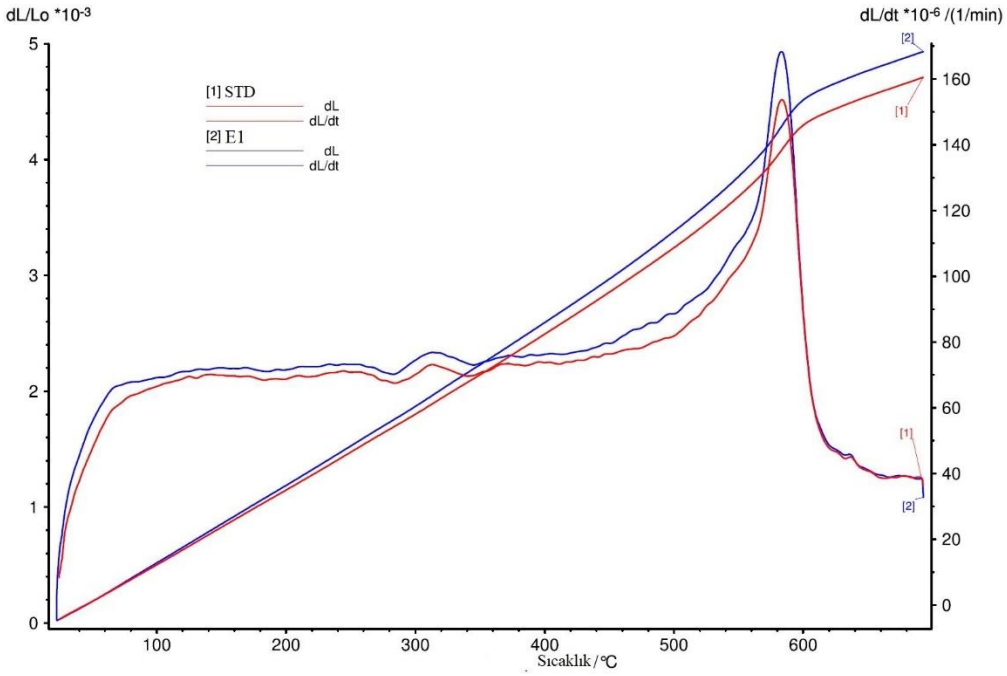
	STD	**E1**	**E2**	**E3**
L*	59,23	56,88	54,25	53,18
a*	3,44	3,95	4,38	4,12
b*	14,49	15,19	15,83	15,21

Standart ve geliştirilen bünyelere ait renk ölçüm değerleri Çizelge 5'de verilmiştir. Eşme/Uşak alkali kaynağı miktarı yükseldikçe beyazlık oranı düşerek, kırmızılık oranı yükselmektedir. Seramik bünyeleri üretiminde kullanılan ham maddelerdeki TiO_2 ve Fe_2O_3 gibi oksitler bünye rengine etki eden oksitlerdir. Ham madde içindeki miktarlarına göre yeşilden griye doğru bünye rengini değiştirmektedirler (Cengiz Ö., 2011, Rado P., 1999, Tarhan, M., 2019, Tarhan M., 2019). Çizelge 1'de verilen Eşme alkali kaynağı ve potasyum feldspata ait kimyasal analizler incelendiğinde Eşme alkali kaynağının daha yüksek oranda Fe_2O_3 ve TiO_2 içerdiği görülmektedir. Bu da renk değerlerindeki değişiklikleri doğrulamaktadır. Porselen üretiminde çoğu ürün kahverengi sır ile sırlanmaktadır. Dolayısıyla bünye rengindeki koyulaşma nihai ürün kalitesini etkilememektedir.

Çizelge 6. Geliştirilen bünyelerin termal genleşme katsayıları

	STD	**E1**	**E2**	**E3**
α **300x10^{-7}**	64,2	65,3	66,9	67,6
α **400x10^{-7}**	65,6	67,1	68,4	69,9
α **500x10^{-7}**	67,5	68,6	70,6	72,0
α **600x10^{-7}**	74,2	76,4	78,1	79,9

Çizelge 6'da geliştirilen bünyelerin termal genleşme katsayıları vardır. Eşme feldspatı miktarı arttıkça termal genleşme katsayısı da artmaktadır.

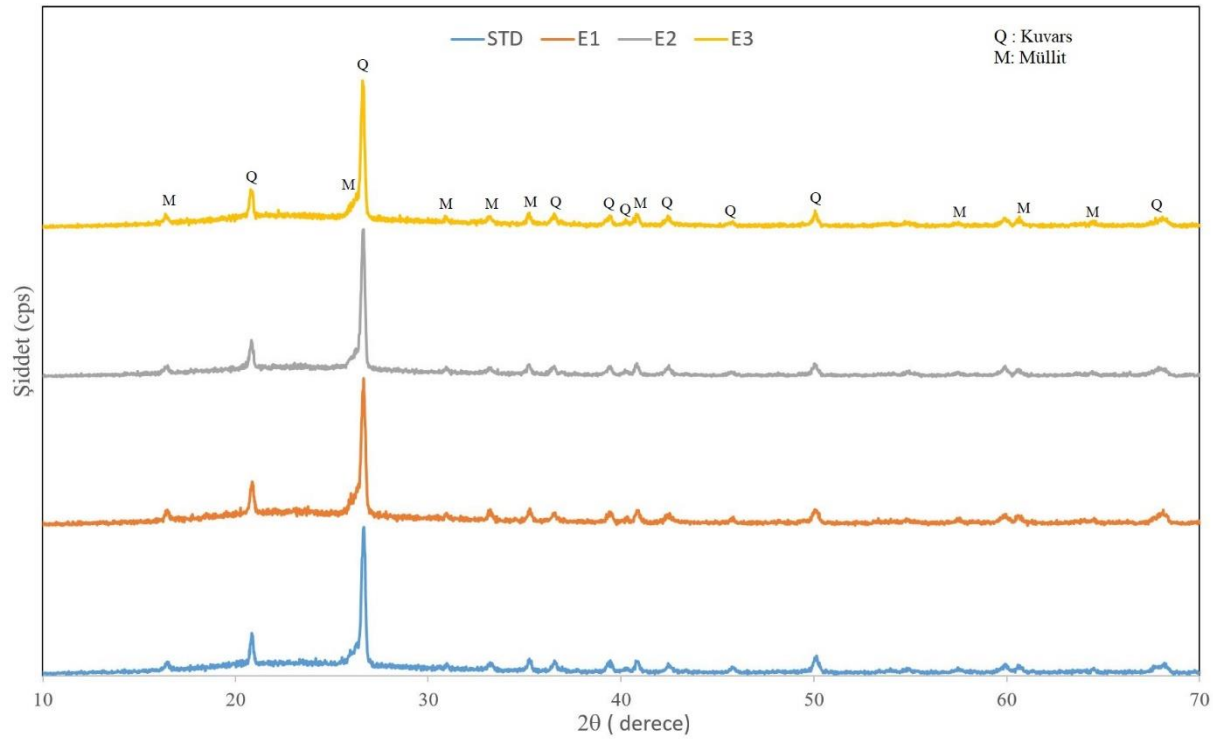


Şekil 2. STD ve E1 reçetelerinin termal genleşme grafikleri

Şekil 2'de STD ve E1 reçetelerine ait termal genleşme katsayısı grafiği vardır. Porselen bünyelerde termal genleşme katsayısını etkileyen en önemli parametrelerden birisi de sinterleme sonrasında bünyede ergimeden kalan kalıntı kristal kuvarstır. Bünyelerde kristal kuvarsın artması bünyelerin termal genleşme katsayısını artırmaktadır (Eppler, R. A. ve Eppler, D. R., 2000, Kingery, W.D., Bowen, H.K., Uhlmann, D.R.,1976, Tarhan B.,2019). Grafikten de anlaşılacağı gibi E1 reçetesinde kalıntı kuvars miktarı STD kompozisyonunda daha fazladır. Eşme/Uşak alkali kaynağındaki serbest kuvars miktarı potasyum feldspat hammaddesinden daha fazla olduğu değerlendirilmiştir. Bu yüzden termal genleşme katsayısı Eşme/Uşak alkali kaynağı miktarının artmasıyla artmaktadır.

3.2 Faz Analizi

Geliştiren bünyelere ait X ışınları difraktometresi(XRD) grafikleri Şekil 3'te verilmiştir.

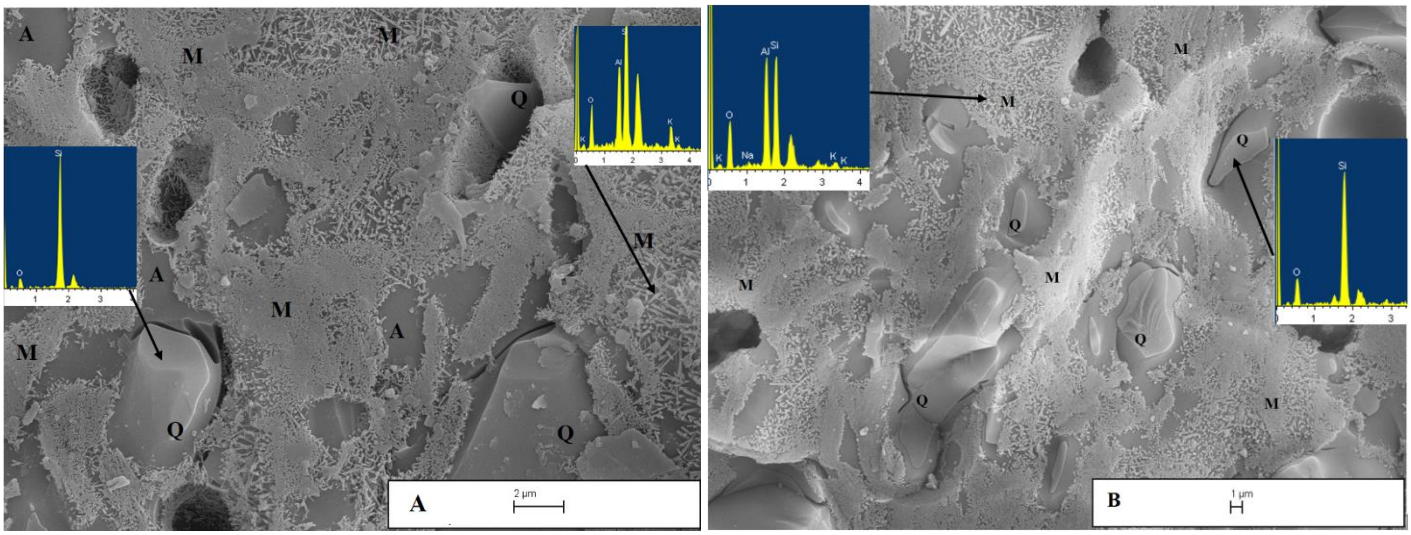


Şekil 3. Standart(STD) ve geliştirilen kompozisyonlara ait XRD analizleri.

Standart ve geliştirilen pişmiş bünyelere ait XRD grafikleri değerlendirildiğinde ana faz olarak bütün bünyelerde kuvars ve müllit fazları tespit edilmiştir. Analiz sonucuna göre bütün bünyelerde kalıntı kuvars belirlenmiştir. Eşme/Uşak alkali kaynağı miktarı arttıkça kuvars pikinde bir miktar yükselme olduğu değerlendirilmiştir. Bünyede kullanılan tüm alkaliler erimiştir ve erimemiş olarak kalan bir alkali kaynağı belirlenmemiştir.

3.2 Mikroyapı Analizi

Şekil 4'te Standart(STD) ve E1 kodlu reçeteye ait SEM analizleri vardır. Her iki numune de dağlanarak ikincil elektron görüntüleri alınmıştır.



Şekil 4. STD(A) ve E1(B) bünyelerine ait dağlanmış SEM görüntüleri ve EDX analizleri(Q: Kuvars, M: Müllit, A: Amorf(camsı)faz)

Her iki bünyede de kuvars, müllit ve amorf (camsı) faz belirlenmiştir. Yapılan nokta EDX analizlerinde müllit ve kuvars fazları oklar ile belirtilmiştir. STD ve E1 kompozisyonlarında müllit faz miktarlarında ise gözle görülür bir fark gözlenmemiştir. Porselen bünyelerde camsı faz oluşumu sınırı müllit oluşum faz bölgesindedir, bundan dolayı yapıdaki fazla alümina camsı yapıdan müllit olarak kristalleşerek yer alır. Porselen bünyelerdeki müllit gelişimi birincil ve ikincil müllit olmak üzere iki çeşittir. Önce birincil müllit iyi kristallenmiş kaolinden(yüksek kaolinitik faza sahip kaolen) müllit çekirdeklerinin birikerek kristalleşmesiyle oluşur. Silikanın 1200ºC'den sonra çözünmesinin bitmesiyle yapı doygun hale gelir. 1200ºC'nin üzerinde ikincil müllit kristalleri eriyik içinde çözünüp tekrar kristallenir ve kristaller prizmatik şekilde büyürler(Tunçel, D.Y. ve Özel, E., 2012, Manfredini, T. Ve ark.1995, Iqbal, Y., ve ark.2000, Carbajal, L. ve ark. 2007).

4. Genel Sonuçlar

Uşak/Eşme bölgesi alkali kaynağının elektroporselen bünyelerinin teknik özellikleri üzerine olan etkileri incelenmiş, standart elektroporselen bünye reçetesinde kullanılan potasyum feldspat yerine kompozisyonlarda kullanımı araştırılmıştır. Elektroporselen kompozisyonlarında potasyum feldspat ile birlikte Uşak/Eşme alkali kaynağının kullanımı içerdiği yüksek Na_2O ve Fe_2O_3 nedeni ile bünyelerin sinterlenmesini artırarak pişme küçülmesini artırmaktadır. Bünyelerde artan sinterleme ile bünyelerin pişme mukavemet değerleri artmıştır. Bunun yanında Uşak/Eşme alkali kaynağının kullanımının artan oranlarında artan demir oksit oranı bünye rengini koyulaştırmaktadır. Uşak/Eşme alkali kaynağının kullanımı kahverengi ile sırlanan ürünlerde(rengin önemli olmadığı) pişirim sürelerinin kısaltılması ve/veya pişirim sıcaklıklarının daha aşağı düşürülmesi mümkün olabilecektir. Enerji yoğun bir sektör olan seramik sektöründe enerji tasarrufunun sağlanarak maliyetlerin düşürülmesi gibi avantajları sağlayabilecektir. Geliştirilen bünyelerde Uşak/Eşme alkali kaynağının kompozisyonlarda artan oranlarda kullanımıyla bünye termal genleşme katsayısının arttığı belirlenmiştir. Elektroporselen ürünlerinde fırın çıkışı deformasyon değerleri önemli bir parametredir. Artan Uşak/Eşme alkali kaynağı miktarıyla deformasyon değerleri de yükselmiştir. Düşük oranlarda Uşak/Eşme alkali kaynağının kullanımı bu kapsamda değerlendirildiğinde sorunsuz şekilde üretimde kullanılabilecektir. Potasyum feldispat yerine Uşak/Eşme alkali kaynağının %6 oranında kullanılmasıyla ürün maliyetlerin %5,7 oranında azalacağı hesaplanmıştır.

Tüm teknik özellikler değerlendirildiğinde, elektroporselen bünyelerinde potasyum feldspat oranının azaltılarak yerine Uşak/Eşme alkali kaynağının kullanımının işletme şartlarında ve/veya bünye reçetelerinde yapılacak geliştirme/optimizsayon çalışmaları ile mümkün olacağı sonucuna varılmıştır.

5. Kaynaklar

Aydın T., (2006). Alümina Esaslı Elektroporselen Bünyelerin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı

Becker, C.R., Misture, S.T. and Carty, W.M., (2000). The role of flux choice in triaxial whiteware bodies, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 21, 15-29.

Carbajal, L., Rubio-Marcos, F., Bengochea, M.A., Fernandez, J.F., (2007). Properties related phase evolution in porcelain ceramics, Journal of the European Ceramic Society, 27, 4065-4069

Cengiz Ö., (2011). Monoporoza (monoporosa) duvar karolarının pişirim koşullarının geliştirilmesi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 165.

Dondi M., (2018). Feldspathic Fluxes for Ceramics: Sources, Production Trends and Technological Value, Resources, Conservation & Recycling, 133 191–205.

Eppler, R. A. ve Eppler, D. R. (2000), Glazes and glass coatings, The American Ceramic Society, Westerville, Ohio.

Iqbal, Y., Messer, P.F., Lee, W.E. (2000), Microstructural evolution in triaxial porcelain, Journal of the American Ceramic Society, 83, 3121–3127.

Kingery, W.D., Bowen, H.K., Uhlmann, D.R. (1976), Introduction to Ceramics, John Wiley & Sons., Inc., Canada.

Kunduraci, N. ve Aydın, T., (2015). The Effect of Nepheline Syenite Addition on Sanitaryware Body, International Journal of Engineering Researh and Development, Vol.7, No.2.

Kunduraci, N., Aydın, T. ve Akbay, A., (2016). The Effect of Nepheline Syenite Addition on the Sintering Behaviour of Sanitaryware Bodies, Journal of The Australian Ceramic Society, Volume 52, 82 – 86.

Manfredini, T., Pellacani, G.C. and Romagnoli, M., (1995). Porcelainized stoneware tile, American Ceramic Society Bulletin, 74,76-79

Rado P., An Introduction to the Technology of Pottery, Second edition, Pergamon Press, The Worecester Royal Porcelain Company Ltd., 1999.

Sanchez, E., Orts, M.J., Garcia-Ten, K. and Cantavella, V., (2001). Porcelain tile composition effect on phase formation and end product, American Ceramic Society Bulletin, 80, 43-49.

Tarhan B., (2019). Usage of fired wall tile wastes into fireclay sanitaryware products, Journal of the Australian Ceramic Society, 1-10,https://doi.org/10.1007/s41779-018-0285-1

Tarhan B. ve Tarhan M. (2019)., Çanakkale bölgesi alkali kaynağının seramik sağlık gereçleri bünyesi ısıl ve mikroyapı özellikleri üzerine etkisi, DÜMF Mühendislik Dergisi 10:2: 675-687

Tarhan M., Tarhan B., (2019).Sırlı Porselen Karo Üretimi için Alternatif Hammadde Olarak Eşme/Uşak Feldspatı, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 025702 (429-438).

Tarhan M., (2019). Porselen Karo Üretimlerinde Konya Kili Kullanımı,Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 11(2), 705-712.

Tarhan, B., Tarhan, M.(2022) Utilization of perlite as an alternative raw material in the production of ceramic sanitaryware. J Therm Anal Calorim 147, 3509–3518.

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.(2019), Whiteness improvement of porcelain tiles incorporated with anorthite and diopside phases. J Therm Anal Calorim 138, 929–936.

Tarhan B., Tarhan M.,(2022) Investigation of the Effect of Spodumene Addition on Technical Properties in Alumina Porcelain Bodies, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 14(1), 262-270.

Tiryaki A., Avcı C. C., Karakaya C., Tarhan B., Farklı Tane Boyutlarındaki Kuvarsın Elektroporselen Bünyeye Etkisinin İncelenmesi, (2022). Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, Cilt/Volume:14 Sayı/Issue:2.

Tunçel, D.Y. ve Özel, E.,(2012).Evaluation of pyroplastic deformation in sanitaryware porcelain bodies, Ceramic International,38 doi:10.1016/j.ceramint.2011.09.19.

Vieira, C.M.F. and Monteiro, S.N., (2007). Evaluation of a plastic clay from the state of Rio de Janeiro as a component of porcelain tile body. Revista Materia, 12, 1-7.

Viola, C., ve Kovic, B.T., (1994).Vitrified stoneware or porcelain? Development and improvements in the ceramic technology of the high sintering floor tiles, Fine porcelain stoneware tiles technology, production, marketing,

Yavuz, S.Y., (1994). İzolatör üretimi, Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Eskişehir.

Z.Bayer Ozturk, N.Ay, (2012) An investigation of the effect of alkaline oxides on porcelain tiles using factorial design, Journal of Ceramic Processing Research, Vol. 13, No. 5, pp. 635~640

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

UMAGD, (2023) 15(2), 731-735.

10.29137/umagd.1279737

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Kombucha Ekstraktının *Agarıcus bisporus* ve *Pleurotus ostreatus* Misel Gelişimlerine Etkileri

Effects of Kombucha Extract on Mycelial Growth of *Agaricus bisporus* and *Pleurotus ostreatus*

Fatih Kutluer[1]

[1]*Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, 71450 Yahşihan/Kırıkkale, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 09/04/2023* ***Kabul / Accepted**: 08/06/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Öz

Bu çalışmada kombucha mantar ekstraktının *Agaricus bisporus* ve *Pleurotus ostreatus* misel gelişimlerine etkileri incelenmiştir. Kombucha mantarı genellikle siyah çayı fermente etmektedir. Maya ve asetik asit bakterilerinin simbiyotik birleşimleri neticesinde oluşmuştur. Manchurian mantarı olarak ta adlandırılır. Kombucha Mantar ekstraktının *Agarıcus bısporus* ve *Pleurotus ostreatus* misel gelişimlerine etkisi bu çalışmanın konusunu oluşturmuştur. Kombu mantarının ekstraktının elde edilmesi için 1 lt suya 60 gr şeker ve siyah çay ilave edilmiş 14 gün direk güneş ışığı almayacak şekilde fermantasyonu sağlanmıştır. Fermantasyon işlemi sonrasında elde edilen ekstrakt 50cc, 75cc, 100cc ve kontrol grubu olmak üzere 4 ayrı gruba ayrılmıştır. Bu gruplar daha sonra Patetes dektroz agar besiyerine ilave edilmiştir. Hazırlanan besiyerlerine *Agarıcus bısporus* ve *Pleurotus ostreatus* miselyal agar diskleri inoküle edilmiştir. 10 gün boyunca zon çapları ölçülerek miselyal gelişimleri izlenmiştir. Kontrol grubu ve ekstre ilave edilen besiyerlerinin tamamında misel gelişmesi gözlemlenmiştir.10 günlük inkübasyon sonrasında kontrol grubuna oranla kombu ekstraktı ilave edilen besiyerlerinde gelişimlerin daha iyi tespit edilmiştir

Anahtar Kelimeler

" Agarıcus bısporus , Pleurotus ostreatus ,Kombucha, Fungus Misel gelişimi, Fermantasyon"

Abstract

İn this study, the effects of kombucha mushroom extract on the growth of *Agaricus bisporus* and *Pleurotus ostreatus* mycelium were investigated. Kombucha mushrooms usually ferment black tea. It is formed as a result of the symbiotic combination of yeast and acetic acid bacteria. Also called Manchurian mushroom. The effect of Kombucha Mushroom extract on the growth of *Agaricus bisporus* and *Pleurotus ostreatus* mycelium was the subject of this study. In order to obtain the extract of kombucha, 60 g of sugar and black tea were added to 1 liter of water and it was fermented for 14 days without direct sunlight. The extract obtained after the fermentation process was divided into 4 different groups as 50cc, 75cc, 100cc and control groups. These groups were then added to the Patetes dextrose agar medium. *Agaricus bisporus* and *Pleurotus ostreatus* mycelial agar discs were inoculated into the prepared media. Mycelial growth was monitored by measuring zone diameters for 10 days. Mycelial growth was observed in the control group and in all the media to which the extract was added. After 10 days of incubation, the growth was better detected in the media with kombu extract compared to the control group.

Key Words

"Agarıcus bısporus, Pleurotus ostreatus, Kombucha, Fungus Mycelial growth,Fermantation"

***Sorumlu Yazar:** fatihkutluer@kku.edu.tr*

1. Giriş

Kombu mantarının yüzyıllardır tanınmakla birlikte simbiyotik bir birliktelik olarak bilinir. Kombucha mantarı asetik asit bakterileri ile bazı mayalar ile simbiyotik birliktelik oluşturur (*Saccharomyces sp*., *Zygosaccharomyces kombuchaensis*, *Torulopsis sp*., P*ichia sp*. ve *Brettanomyces sp*.) (Greenwalt et al.,1998). Kombucha mantarı kültür ortamında bulunan şekeri asimile ederek fermantasyon işlemini gerçekleştirir (D.A. Balentine et al.,1997).Fermantasyon işlemi neticesinde ortamda laktik asit, glukronik asit ve asetik asitin oluştuğu yapılan çalışmalarda rapor edilmiştir K.E. Steiger and E. Steinegger,1957) Açığa çıkan bu maddelerden asetik asitin antimikrobiyal etkisinin olduğu, glukronik asitin ise karaciğer fonksiyonlarını ve değerlerini düzenlediği rapor edilmiştir(S. C. Chu, and C. Chen,2005). Ayrıca vitamin ve aminoasit bakımından da zengin bir içerik olduğu bilinmektedir (I. Došenović,2004). Yapılan çalışmalarda kombucha mantarının birçok rahatsızlığa iyi geldiği rapor edilmiştir (D. Cvetković,2008).Kombucha mantarı kültürünün hazırlanmasında çoğunlukla siyah çay kullanıldığı için bir çok isimle bilinmekle birlikte daha çok kombucha çayı olarak bilinmektedir(I. Jankovic and M. Stajanossvic).Ülkemizde çok fazla tanınmamakla birlikte uzak doğu ülkelerinde besin olarak tüketilmekte, alternatif tıp ve kozmetik alanlarında kullanılmaktadır(G. W. Frank et al.,1995).Ülkemizde gelişmekte olan mantar yetiştiriciliğinde en çok yetiştirilen türlerden olan Bu çalışmamızda Avrupa ülkelerinde kitler halinde satışa sunulan birçok rahatsızlığa iyi geldiği yapılan çalışmalarla kanıtlanmış ve antioksidan özelliği bilinen kombucha mantarının *Agarıcus bisporus* ve *Pleurotus ostreatus* misel gelişimlerine etkileri incelenmiş ve bu sayede yapılacak olan yayınlara katkı sağlamak hedeflenmiştir.

2. Materyal Ve Metod

2.1. Kombucha Eksraktının Hazırlanması

Kombu çayının hazırlanmasında 1litre içme suyu, sakaroz kayağı olarak şeker kullanılmıştır. Kaynamaya başladıktan sonra içerisine 60 gr şeker ilave edilmiş ve 10 dakika kadar daha kaynatılmıştır. Kaynama işleminden sonra demlik poşet çay ile oluşan şekerli su 20 dakika kadar demlenmeye bırakılıp oda sıcaklığına(25 ^{0}C) geldikten sonra Temiz steril cam kavanoza alınıp Kırıkkale Üniversitesi Kırıkkale Meslek Yüksekokulu Bitkisel ve Hayvansal Üretim Laboratuvarında korunan kombucha örnekleri çay içeriğine ilave edilmiş ve üzeri steril bez ile kapatılarak 14 gün süre ile anaerobik koşullarda fermente edilmiştir. Örneklerin kontamine olma riskine karşılık 3 tekerrür olarak gerçekleştirilmiştir,

2.2. Besi Ortamı

Çalışmamızda patetes dektroz agar (PDA) kullanıldı.14 günlük fermantasyon sonrasında elde edilen kombucha ekstrakktı 50cc, 75cc,100cc olacak şekilde 3 farklı gruba kontamine riskine karşılık 3 tekerrür olacak şekilde besi ortamına ilave edildi. Ayrıca kombucha ekstraktı ilave edilmeyen besi ortamı kontrol grubu olarak değerlendirildi.

2.3. *Agaricus bisporus* Sporlarının Alınması

Kırıkkale üniversitesi Kırıkkale Meslek Yüksekokulu Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü Mantarcılık programında yetiştirilen *Agaricus bisporus* türünden alınan sporlardan elde eddilen ve PDA ortamında geliştirilen örnekler kullanılmıştır.

2.4. *Pleurotus ostreatus* Sporlarının Alınması

Kırıkkale üniversitesi Kırıkkale Meslek Yüksekokulu Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü Mantarcılık programında yetiştirilen *Pleurotus ostreatus* türünden alınan sporlardan elde edilen ve PDA ortamında geliştirilen örnekler kullanılmıştır.

2.5. Misel Transferi Ve Zon Çaplarının Ölçülmesi

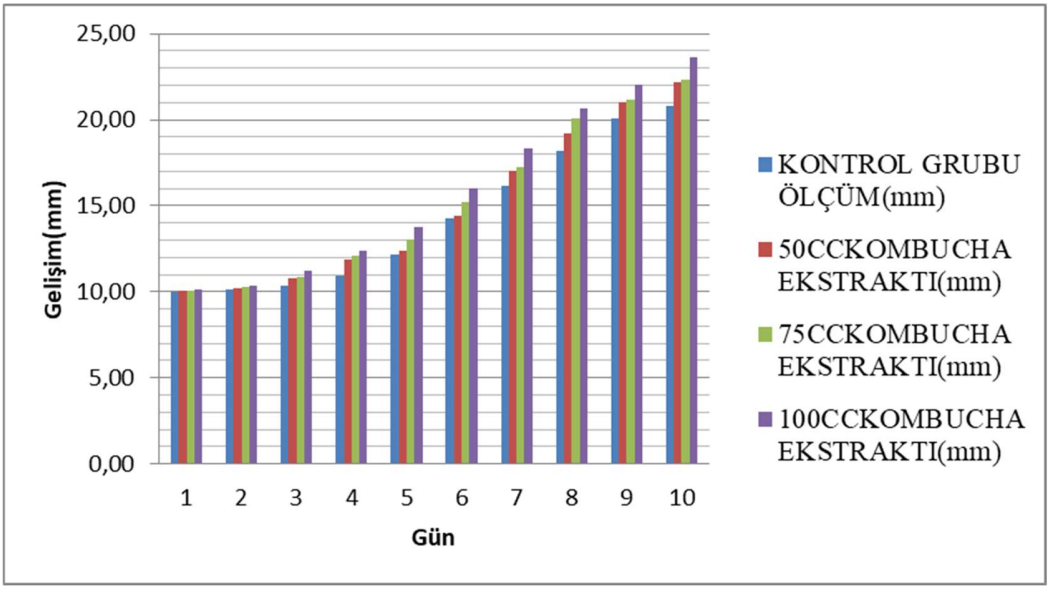
Hazırlanan besi ortamlarına *Agaricus bisporus* ve *Pleurotus ostreatus* 'un 8mm çapındaki miselyal agar diskleri besi ortamının merkezine inoküle edildi. *Agaricus bisporus* örnekleri 23^{0}C de 10 gün süre ile geliştirilerek misel gelişimleri incelendi. *Pleurotus ostreatus* örnekleri ise 21^{0}C de 10 gün süre ile geliştirilerek misel gelişimleri incelendi Radyal büyüme hızları 24 saat aralıklarla ölçüldü.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Kombucha ekstraktının ilave edildiği besi ortamlarında radyal büyüme hızları dikkate alındığında kombucha ekstraktı ilave edilmeyen kontrol grubuna göre gelişmelerin daha hızlı olduğu tespit edildi. En iyi gelişme 100 cc kombucha ilave edilen grupta olduğu tespit edilmiştir. Kombucha ilave edilmeyen ve kontrol grubu olarak değerlendirilen ve kombucha ekstarktı ilave edilen grupların hiç birinde pigmentasyona rastlanmadı.

Tablo 1. Kombucha ekstraktının *Agaricus bisporus* misel gelişimine etkisi

Gün	Kontrol (mm)	50 cc (mm)	75cc (mm)	100cc (mm)
1.gün	10,02	10,06	10,09	10,13
2.gün	10,17	10,21	10,28	10,32
3.gün	10,34	10,76	10,84	11,21
4.gün	10,96	11,85	12,06	12,39
5.gün	12,18	12,39	13,01	13,74
6.gün	14,24	14,43	15,21	15,98
7.gün	16,13	17,05	17,26	18,34
8.gün	18,21	19,23	20,04	20,63
9.gün	20,05	21,01	21,19	22,01
10.gün	20,82	22,16	22,33	23,65

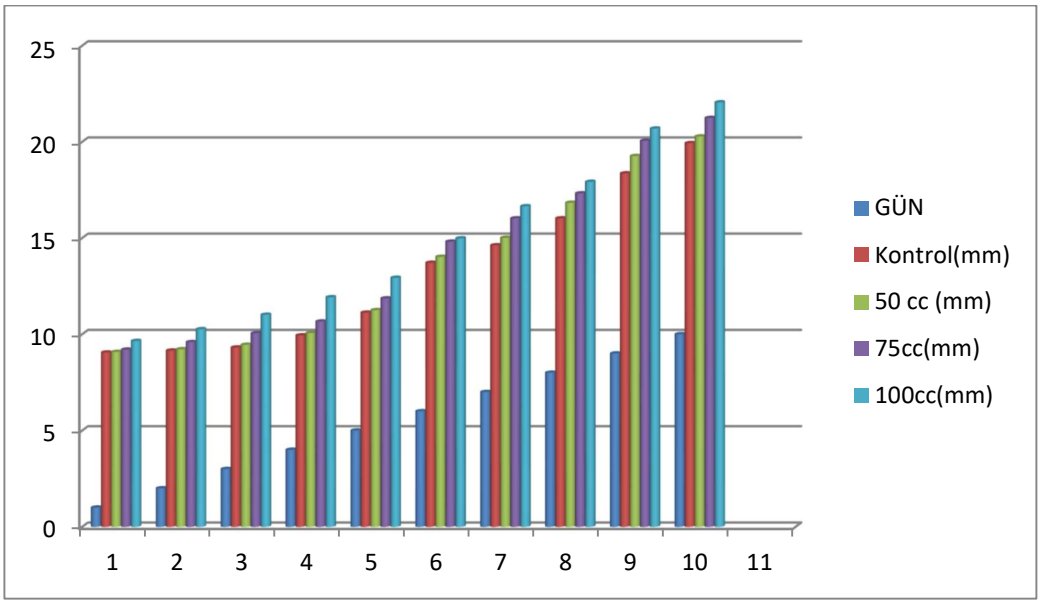


Şekil 1. Kombucha ekstraktının *Agaricus bisporus* misel gelişimine etkisi

Tablo 1 ve Şekil 1' de kombucha ekstarktının *Agaricus bisporus* misel gelişimlerine etkisi verilmiştir. Kombucha ekstarktı ilave edilen grupların kombucha ekstraktı ilave edilmeyen ve kontrol grubu olarak değerlendirilen gruba göre fungus misel gelişimlerinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Kontrol grubunda 10 günlük inkübasyon sonucunda 20,82 mm zon çapı ölçülmüştür. Kombucha ekstraktı ilave edilen grupların kontrol grubuna göre fungus misel gelişimini olumlu önde etkilediği ve en yüksek gelişimin 23,65 mm ile 100 cc kombucha ilave edilen grupta olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 2. Kombucha ekstraktının Pleurotus ostreatus misel gelişimine etkisi

Gün	Kontrol (mm)	50 cc (mm)	75cc (mm)	100cc (mm)
1.gün	9,05	9,08	9,2	9,65
2.gün	9,15	9,22	9,59	10,26
3.gün	9,31	9,45	10,05	11,01
4.gün	9,94	10,06	10,66	11,92
5.gün	11,12	11,25	11,86	12,93
6.gün	13,71	14,02	14,81	14,98
7.gün	14,62	15,01	16,02	16,65
8.gün	16,02	16,83	17,32	17,92
9.gün	18,36	19,26	20,05	20,69
10.gün	19,93	20,28	21,24	22,05



Şekil 2. Kombucha ekstraktının Pleurotus ostreatus misel gelişimine etkisi

Tablo 2 ve Şekil 2' de kombucha ekstarktının *Pleurotus ostreatus* misel gelişimlerine etkisi verilmiştir. Kombucha ekstarktı ilave edilen grupların kombucha ekstraktı ilave edilmeyen ve kontrol grubu olarak değerlendirilen gruba göre fungus misel gelişimlerinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Kontrol grubunda 10 günlük inkübasyon sonucunda 19,93 mm zon çapı ölçülmüştür. Kombucha ekstraktı ilave edilen grupların kontrol grubuna göre fungus misel gelişimini olumlu yönde etkilediği ve en yüksek gelişimin 22,05 mm ile 100 cc kombucha ilave edilen grupta olduğu tespit edilmiştir

4. SONUÇ

Çalışmada *Agaricus bisporus* ve *Pleurotus ostreatus* misellerinin inkübasyonu sonucunda alınan verilerde en iyi gelişmenin 100 cc kombucha ilave edilen PDA besiyerinde olduğu tespit edilmiştir. Ülkemizde en çok yetiştirciliği yapılan *Agaricus bisporus* ve *Pleurotus ostreatus* türlerinin (Atilla Günay,1995) özellikle tohumluk misel safhasında kombucha ekstarktı ilave edilmesi gelişimlerine olumlu yönde etki edecek ve hastalıklardan arındırılmış mukavim hatların kullanılmasına fayda sağlayacaktır. Mantar hastalık ve zararlılarından korunmak mantar yetiştiriciliğinde oldukça önem arz etmektedir. Ülkemizde henüz mantar yetiştriciliğinde hastalık ve zararlılardan korunmak amacı ile kullanılan bir kaç kimyasal madde dışında kullanılan kimyasal bulunmamaktadır. Zirai mücadelede kullanılan kimyasal maddeler kullanılmakta ve hastalık ve zararlılarla mücadele de tam anlamıyla etkili olmamaktadır. *Agaricus bisporus* ve *Pleurotus ostreatus* tohumluk misellerinin hazırlanması aşamasında PDA besiyerlerine kombucha ilave edilmesi misel oluşumunu hızlandırıp oluşabilecek hastalık ve zararlılarla mücadeleyi

kolaylaştıracaktır. *Agaricus bisporus* ve *Pleurotus ostreatus* yetiştiriciliğinde en önemli sorunların başında hastalık ve zararlılar ile mücadele gelmektedir. Yapılan bu çalışma ile bu sorunun önemli oranda önüne geçmekle beraber kombucha mantarının ülkemizde tanınması sağlanacaktır. Yapılan bu çalışma daha sonra kombucha ekstraktı ile yapılacak olan çalışmalara öncülük edecektir.

Referanslar

C.J.Greenwalt, R.A.Ledford and K.H. Steinkraus, Lebensmittel Wissenchaft und Technologie, 31, 291-296., (1998)

D.A. Balentine, S.A. Wiseman and L.C. Bouwens, Critical Review in Food Science and Nutrition 37, 693-704, (1997).

K.E. Steiger and E. Steinegger, Pharmaceutica Acta Helvetica, 32, 133-154, (1957)

S. C. Chu, and C. Chen, Food Chemistry, 98,3, 502-507,(2005)

I. Došenović, Development of Methods for Biotin Determination in Molasse,(2004)

D. Cvetković, S. Markov, M. Djurić, D. Savić and A.Velićansk., Journal of Food Engineering, 85, 3, 387-392, (2008)

I. Jankovic and M. Stajanossvic, Mikrobiologija, 33, 25-34, (1994).

G. W. Frank, Wilhelm Ennsthaler, Kombucha: Healthy Beverage and Natural Remedy from the Far East 1995.

Atilla Günay, Mantar Yetiştirciliği, ilke yayın evi 1995

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development
UMAGD, (2023) 15(2), 736-748.
10.29137/umagd.1297344
Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023
Araştırma Makalesi / Research Article

Gabion Duvarların Çeşitli Patlama Enerjilerine Göre Koruma Duvarı Olarak Kullanılması

Use of Gabion Walls as Protection Walls According to Various Explosion Energies

İrem Ersalman[1], Baran Toprak [1*]

1Kırıkkale Üniversitesi, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE
2Kırıkkale Üniversitesi, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

***Başvuru/Received**: 15/05/2023* ***Kabul / Accepted**: 09/06/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Öz
Gabion duvarlar genellikle, eğimli arazilerde hafif dayanma yapısı alternatifi olarak kullanılmaktadır. Göreceli olarak ucuz maliyeti, esnek yapısı, ana malzemesinin kolay şekilde nakledilebilmesi ve esnek yapısı nedeniyle birçok avantaj taşımaktadır. Boyutları, gelen yanal yüklere göre kolay ayarlanabilmekte ve ekstra maliyetler içermemektedir. İşçilik bakımından kısa sürede inşa edilebilmekte ve bünyesinde doğal bir malzeme olan kırma taş kullanılmaktadır. Ülkemizde, patlamaya karşı koruma duvarı olarak genellikle betonarme koruma duvarları kullanılmaktadır. Bu alışagelmiş kullanım beraberinde temin etmesi bazı bölgelerde zor olan inşa malzemelerini de içermektedir. Artan maliyetler, betonarme koruma duvarlarını neredeyse yapılamaz hale getirmiştir. Bu çalışmada, Gabion Koruma Duvarlarının değişik patlama kuvvetleri altında reaksiyonu incelenmiştir. Standart bir şekilde ve standart bir zeminde tasarlanan gabion duvara çeşitli patlayıcıların patlama kuvvetlerinin etkimesi sonucu meydana gelen direnç kuvvetleri; dönme ve devrilmeye karşı davranışı Geo 5 Geoteknik tasarım programı ile modellenmiş ve incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler
"Gabion duvar, Patlama kuvveti, Geo 5, Koruma duvarı"

Abstract
Gabion walls are generally used as a lightweight support structure alternative on sloping lands. It has many advantages due to its relatively cheap cost, flexible structure, easy transportation of the main material and flexible structure. Its dimensions can be easily adjusted according to the incoming lateral loads and do not include extra costs. It can be built in a short time in terms of workmanship and crushed stone, which is a natural material, is used. In our country, reinforced concrete protection walls are generally used as explosion protection walls. This customary use also includes building materials that are difficult to obtain in some regions. Rising costs have made reinforced concrete retaining walls virtually unbuildable. In this study, the reaction of Gabion Protection Walls under different explosion forces was investigated. The resistance forces that occur as a result of the impact of the explosion forces of various explosives on the gabion wall designed in a standard way and on a standard ground; Its behavior against rolling and overturning was modeled and analyzed with the Geo 5 Geotechnical design program.

Key Words
"Gabion wall, Bursting force, Geo 5, Protection wall"

***Sorumlu Yazar:** baran@kku.edu.tr*

1. Giriş

Gabion duvarlar toprak, taş gibi doğal yapı malzemelerinin taşıyıcı çelik tellerin içerisine doldurulmasıyla elde edilir. Yapısı gereği mühendislik projeleri, peyzaj alanları ve askeri alanlarda da çokça kullanılmaktadır. Gabion duvarların birçok alanda kullanılmasının sebepleri arasında ekonomikliği, imalat kolaylığı ve dayanıklılığı yer almaktadır. Tüm bu sebepler doğrultusunda askeri alanda Gabion duvar kullanımı günümüzde artış göstermektedir. Askeri alanlarda mühimmat korunması, olası bir mühimmat patlamasında can ve mal kaybının önlenmesi, yeşillendirilmeye açık olması sebebiyle cephane saklanması gibi kalemlerde kullanılması gabion duvarların kullanımını ve talep ürünü olmasını ortaya çıkarmıştır. Dünyada ve ülkemizde artış gösteren terör olayları, Gabion duvarların bu yönde kullanımının vereceği faydayı ön plana taşımaktadır. Yapılan bu çalışmada Gabion duvarlara 4 farklı patlayıcı çeşidi kullanılarak 4 farklı patlama kuvveti etki ettirilmiş ve bu kuvvetler karşısında duvar basınç dağılımları, oturma analizleri ve güvenlik katsayılarına ulaşılmış; şev stabilite analizi yapılmış ve tüm bu analizler sonucunda Gabion duvarların dayanıklılığı test edilmiştir.

2. Gabion Duvarlar

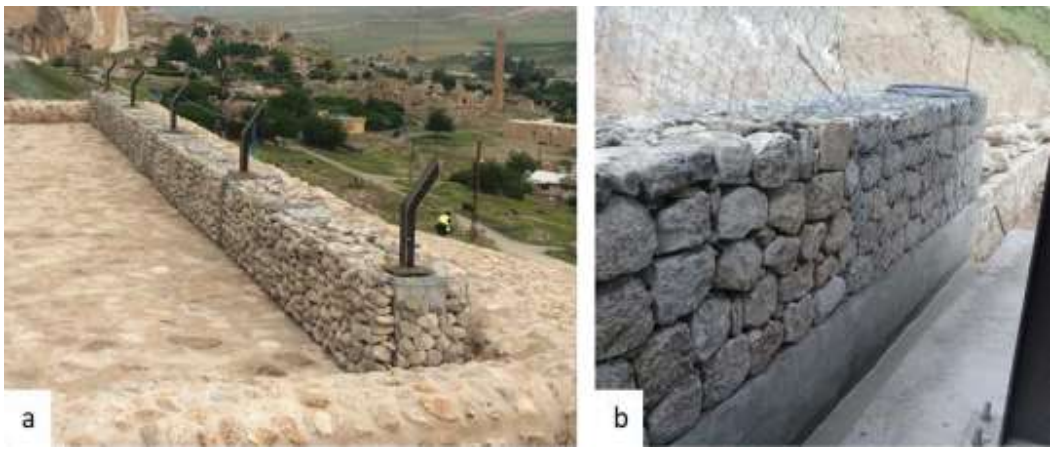
Gabion duvarlar doğal yapı malzemelerinin çeşitli şekillerdeki çelik tellerin içine yerleştirilmesi ile oluşurlar. Yaklaşık 7000 yıl öncesinde Mısırlılar tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Eski Mısırda Nil Nehrinin kıyılarını korumak ve yamaçların stabilitesini sağlamak amacıyla oluşturulmuş gabion duvarlar sonrasında kolay ve hızlı konuşlandırılması nedeniyle birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır (Uray, 2014). Gabion duvarlar zamanla askeri teçhizat ve personeli koruması, çeşitli terör olaylarında oluşacak tahribatı azaltması ve taşıma kolaylığı sebebiyle yaygın şekilde kullanılmakta ve bu sebeplerle patlama duvarları olarak da kullanılmaktadır. Gabion duvarlar patlama duvarı olarak kullanıldığı zaman patlama kuvvetini dağıtır ve duvar arkası basınç dağılımını azaltarak kuvveti soğurur.

2.1.Gabion Duvar Çeşitleri

Gabion duvarlar 3 çeşitten oluşmaktadır. Bunlar; Gabion sepet, Gabion şilte ve Gabion torbadır.

2.1.1.Gabion sepet

Gabion sepetler çift burgulu altıgen çelik tel örgü kafesler olup içerisine doğal yapı malzemesi doldurularak oluşturulurlar. Ülkemizde ve dünyada en çok kullanılan Gabion duvar çeşididir. Gabion sepet duvarlar içerisine doldurulacak doğal yapı malzemesinin kolay tedarik edileceği yerlerde oldukça ekonomiktir. Gabion duvara ait örnekler Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. (a) Hasankeyf Yamaç Külliyesi Gabion Sepetlerle Oluşturulan Duvar ; (**b)** Hasankeyf Yamaç Külliyesi Cami Bölümü Gabion Sepetlerle Oluşturulan Duvar (Eliüşük, 2020)

2.1.2. Gabion şilte

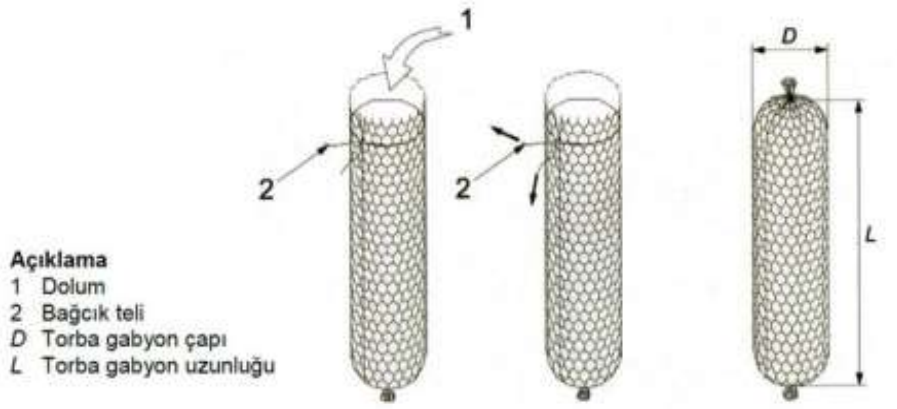
Gabion şilteler genellikle hidrolik çalışmalarda ve erozyon riski olan bölgelerde projelendirilerek kullanılmaktadırlar. Altıgen tel ağlarının çift bükümlü olarak örülmesiyle elde edilirler. Erozyon riski olan dere yataklarında, kanal kaplamalarında kıyı koruması amacıyla kullanılırlar. Proje alanında kolayca monte edilir, içine doğal yapı malzemesi doldurulup kapalı şekilde teslim edilirler. Gabion şilteye ait örnek Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. DSİ 9. Bölge Müdürlüğü Elazığ Palu İlçe Merkezinin Murat Nehri Taşkınlarından Korunması İşi

2.1.3. Gabion torba

Gabion torbalar yine altıgen çift burgulu tellerden ve doğal yapı malzemelerinden oluşmaktadırlar. Gabion çuval veya sucuk Gabion olarak da bilinirler. Torba veya silindir şeklinde yapılan özel gabionlardır. Marina yapımında ve nehir kenarlarında kıyı koruması amacıyla kullanılırlar. Gabion torbalar taşkın veya sel gibi acil durumlarda da kullanıma çok uygundur. Gabion torbaya ait örnek Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. Örnek Gabion Torba Uygulaması (DSİ Taşkın Kontrol Duvarları Genel Teknik Şartnamesi, 2018)

3. Patlayıcı Maddeler

Patlayıcı maddeler; darbe, ısı veya sürtünmeye maruz kaldığında hızlı bir şekilde bozunarak değişikliğe uğrayan ve sonucunda yüksek derecede ısı ve yüksek hacimde gaz ortaya çıkaran tüm kimyasal karışım ve bileşimlerdir. Patlayıcı maddelerin şok veya reaksiyon etkisiyle ateşlenmesi sonucu hava içinde aniden yayılmasına ise patlama adı verilir. Patlayıcı maddeler kullanım yerlerine göre ikiye ayrılırlar. Bunlar; askeri savunma amaçlı ve sivil kullanım amaçlı patlayıcılardır. Makalede askeri savunma amaçlı patlayıcılardan bahsedilmiş ve bu patlayıcıların gabion duvar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yüksek patlayıcılardan makalede kullanılacak olanlar şunlardır; TNT (Trinitrotoluen) , RDX (siklotrimetilen-trinitramin) , C-4 (composition), FOX-12'dir.

3.1. Patlayıcı Çeşitleri

3.1.1. TNT

1863 yılında Alman kimyager Joseph Wilbrand tarafından sentezlenen TNT ilk başta bir patlayıcı olarak keşfedilmemiş boyar madde olarak kullanılmıştır (wikipedia). Sonraki yıllarda 1902 yılında Almanlar tarafından patlayıcı özelliği keşfedilmiş ve Alman askeri sanayisinde çokça kullanılmıştır. TNT'nin her iki dünya savaşında da etkin kullanılması günümüzde de TNT kullanımının en üst seviyede olmasına yol açmaktadır. Bu kadar yaygın kullanılması yapılacak hesaplamalarda diğer patlayıcıların hesaplanması için TNT eşdeğerliği kavramını ortaya çıkarmıştır.

3.1.2. RDX

RDX, günümüzde kullanılan en yüksek tahrip gücüne sahip patlayıcılardandır. Yaygın olarak kullanılan birçok askeri patlayıcının temel bileşenlerinden biri olan RDX yüksek patlayıcı gücünü yoğunluğundan ve yüksek infilak hızından alır. Mayınların ve el bombalarının yapımında kullanılmaktadır. Askeri alanda kullanılan bazı yüksek patlayıcıların bileşimleri Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Askeri Alanda Kullanılan Bazı Yüksek Patlayıcıların Bileşimleri (Karabayır, 2020)

İsim	Bileşim
Karışım A	%83 RDX, %11.7 enerjik olmayan plastikleştiriciler
Karışım B	%60 RDX, %39 TNT, %1 bağlayıcı (wax)
Karışım C4	%90 RDX, %10 poli-isobutilen
Oktol	%75 HMX, %25 RDX
Torpex[a]	%42 RDX, %40 TNT, %18 alüminyum
PBXN-109	%64 RDX, %20 alüminyum, %16 bağlayıcı
OKFOL	%96.5 HMX, %3.5 wax

3.1.3. C-4

C grubu plastik patlayıcılar İkinci dünya savaşı sonrasında üretilmiştir. Diğer kullanılan ve popüler olan patlayıcı türlerine nazaran daha kolay şekil verilebilmesi sebebiyle popülerliğini kazanmıştır. C-4 tipi patlayıcılar kolay şekil alırlar ancak çok kararlı bir yapıda olması nedeniyle fiziksel şoka karşı duyarsızlardır. Patlamanın başlayabilmesi için aşırı ısı ve şok dalgasına ihtiyaç vardır. Askeri mühendisler tarafından kullanılan C tipi plastik patlayıcı örneği Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Askeri Mühendisler Tarafından Kullanılan C Tipi Plastik Patlayıcı Örneği

3.1.4. FOX-12

FOX-12 İsveç savunma ajansından kimyager N. Latypov tarafından geliştirilmiş ve sentezlenmiş enerjik materyaldir (Karabayır, 2020). Bu bileşik RDX ile kıyaslanmış ve RDX patlayıcısına göre daha hassas olduğu görülmüştür. Duyarlı olmayan mühimmat özelliği taşımaktadır. Bu çalışmada TNT eşdeğerliği kavramı bakımından diğer patlayıcılara nazaran farklı bir değer vermektedir. FOX-12 Patlayıcı performansının RDX ile karşılaştırılması Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 2. FOX-12 Patlayıcı Performansının RDX İle Karşılaştırılması (Karabayır, 2020)

Parametreler	FOX-7	FOX-12	RDX
Patlama basıncı (kbar, p_{C-J})	340	260	347
Patlama Hızı ($m.s^{-1}$, D)	8870	7900	8750
Etki Duyarlılığı (J)	25	>90	7.5
Sürtünme duyarılığı (N)	>350	>352	120
ESD (J)	4.5	>3	0.2

3.2. Patlayıcı Maddelerde TNT Eşdeğerlik Yöntemi

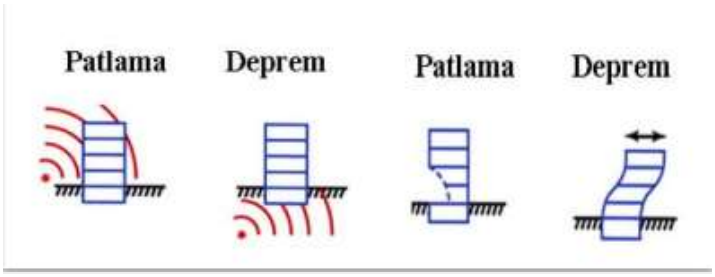
Farklı fiziksel ve kimyasal yapılara, özgül enerjilere ve patlama hızlarına sahip olan patlayıcıların çalışma yapılırken karşılaştırılması gerekmektedir. Tüm bu farklı özellikler sebebiyle doğru şekilde bir kıyaslama yapılamadığı için kolaylık sağlaması amacıyla TNT eşdeğerliği kavramı ortaya çıkmıştır. Bu kıyaslama yöntemi için TNT patlayıcısı referans patlayıcı madde seçilmiştir. Bunun sebebi ise en yaygın kullanılan patlayıcı türünün TNT patlayıcısı olmasıdır. Patlayıcıların dönüştürülmesi için kullanılan bu yöntem, belirli bir miktarda patlayıcı maddenin oluşturduğu enerjiye, aynı miktardaki TNT patlayıcısının oluşturduğu enerji kıyaslanarak yapılır. RDX, C-4 ve TNT eşdeğerlikleri önceden hesaplanmış ancak FOX-12'nin TNT eşdeğerliği RDX ile yapılan karşılaştırma değerlerine oranlanarak bulunmuş ve tabloya eklenmiştir. Çalışmada kullanılacak patlayıcıların TNT eşdeğerlik tablosu, Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Çalışmada Kullanılacak Patlayıcıların TNT Eşdeğerlik Tablosu

Patlayıcı türü	TNT eşdeğerliği
TNT	1
RDX	1,185
C-4	1,27
FOX12	0,887

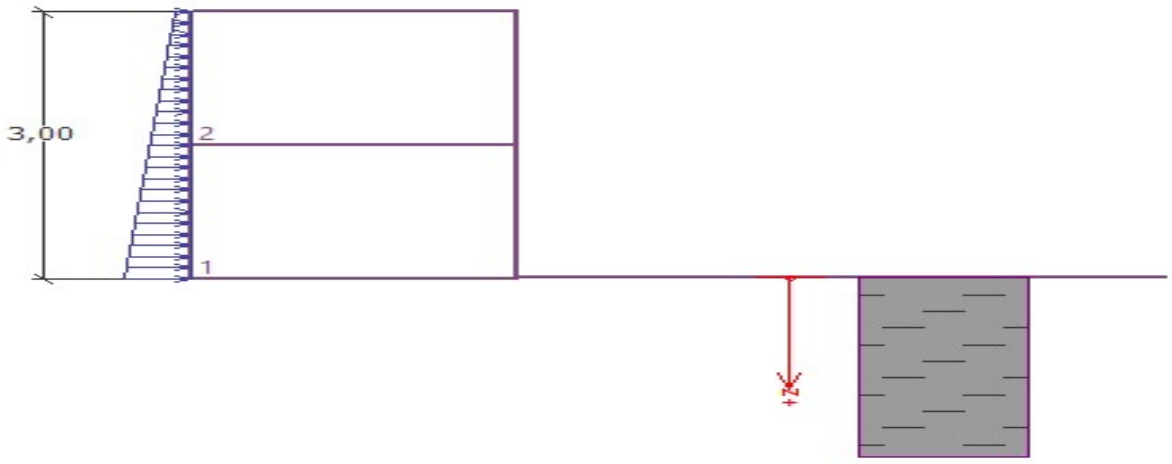
4. Gabion Duvarların Patlama Karşısındaki Davranışı

Gabion duvarlar gerek ekonomikliği gerekse imalat kolaylığı sebebiyle ülkemizde çokça kullanılmaktadır. Her yönden avantajlı sonuçlar veren Gabion duvarlar, aynı zamanda çok keşfedilmemiş olsa da savunma sanayisinde de kullanıldığı takdirde önemli derecede maliyet azaltan ve istenilen duraylılığı sağlayan duvarlardır. Ülkemizde artan terör olayları ve kaza ile meydana gelen patlamalar sonucunda oluşan tahribatların büyüklüğü sebebiyle çeşitli koruyucu duvarlar inşa edilme ihtiyacı duyulmuştur. Bu koruma duvarları olarak istinat duvarları tercih edilmektedir. İstinat duvarları istenilen duraylılığı sağlamakta ancak ekonomik olarak yüksek maliyetler oluşturmakta ve imalat açısından uzun süre gerektirmektedir. İstinat duvarlarının bu olumsuz yönlerine karşılık hem ekonomik hem de hızlı imal edilen Gabion duvarların kullanılması büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Gabion duvarların çeşitli patlayıcılar tarafından yaşanacak patlamalar karşısındaki davranışları detaylı olarak GEO5 programı dahilinde incelenmiştir. Çalışma yapılırken patlama olayının diğer ani oluşabilecek, deprem gibi, olaylardan farklı olması nedeniyle oluşan patlama kuvveti duvarın zeminle temas ettiği nokta ile tepe noktasında farklı değer alınmıştır. Tasarımda patlama kuvvetinin etki ettiği noktaların baz alınması Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Patlama ve Deprem Etkisi (Karabayır, 2020)

Herhangi bir patlama olayında duvarın zeminle temas ettiği noktaya etki eden kuvvet daha fazla olurken duvarın basınç dağılımı gereğince tepe noktasında azalmış bir kuvvet vardır. Patlama oluştuktan sonra duvarın tepe noktasındaki basınç değerine Q_1, duvarın zeminle temas ettiği noktadaki basınç değerine ise Q_2 adı verilmiştir.



Şekil 6. GEO5 Programında Örnek Gabion Duvar Basınç Dağılımı

Patlama ve deprem etkisi Şekil 6'da, TNT eşdeğerliklerine göre hesaplanmış patlama kuvvetleri ise Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. TNT Eşdeğerliklerine Göre Hesaplanmış Patlama Kuvvetleri

Patlayıcı türü	TNT eşdeğerliği	Q1	Q2
TNT	1	50	200
RDX	1,185	59,25	237
C-4	1,27	63,5	254
FOX12	0,887	44,35	177,4

5. Gabion Duvarların Patlama Karşısındaki Davranışının GEO5 Programı ile İncelenmesi

GEO5 programı ile Gabion duvarların patlamaya karşı dayanıklılığı, oluşan güvenlik katsayısı, dönme ve kayma tahkikleri yapılmıştır. Gabion duvar parametreleri, çalışmada kullanılacak Gabion sepet türü için piyasadan değerler alınmış ve sabit tutulmuştur. Her bir patlayıcının TNT eşdeğerlikleri yardımıyla duvara etki edecek patlama kuvveti bulunmuş ve tüm patlayıcı türleri için tahkikler yapılmıştır.

5.1. GEO5 Programı Duvar ve Patlayıcı Parametreleri

Gabion duvarın yerşeştirildiği zeminin özellikleri Tablo 5'te, projede kullanılan tel örgü parametreleri Tablo 6'da gösterilmektedir.

Tablo 5. Projede Kullanılmış Dolgu ve Dolgu Zemin Özellikleri

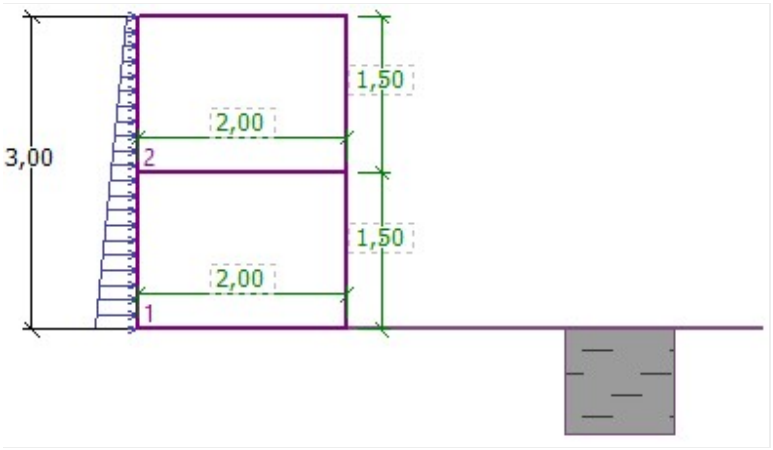
Dolgu ve dolgu zemin özellikleri

Kaya malzemesi birim hacim ağırlık	26 KN/m³
Kohezyon (c)	0,56 Mpa
İçsel sürtünme açısı	44,8
Young modülü	1,470 Kpa
Poisson oranı	0,27
Doğal çakıl maximum kuru yoğunluk	18,3 KN/m³
Doğal çakıl minimum kuru yoğunluk	14,9 KN/m³

Tablo 6. Projede Kullanılmış Tel Örgü Parametreleri

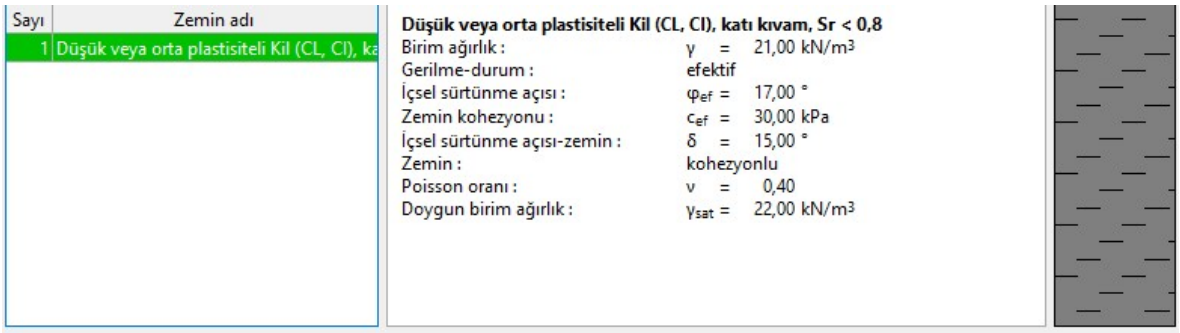
Tel örgü parametreleri	
Gabion teli gerilme direnci	386 Mpa
Çap	3 mm
Young modülü	210 Gpa
Poisson oranı	0,3
Standart tel 6x8 cm	Çap 60 mm
8x10 cm tel	Çap 80 mm
Standart tel ağ çekme mukavemeti	55 KN/m³
8x10 cm tel ağ çekme mukavemeti	50-60 KN/m³

Tüm bu erişilen parametreler dahilinde proje kapsamında öncelikle Gabion duvarın geometrisi oluşturulmuştur. Genişliği 2 metre, yüksekliği 1,5 metre ve göreli konumsuz iki blok üst üste getirilerek genişliği 2 metre ve yüksekliği 3 metre olan bir Gabion duvar oluşturulmuştur. Şekil 7'de çalışmada kullanılan örnek Gabion duvar geometrisi gösterilmiştir.



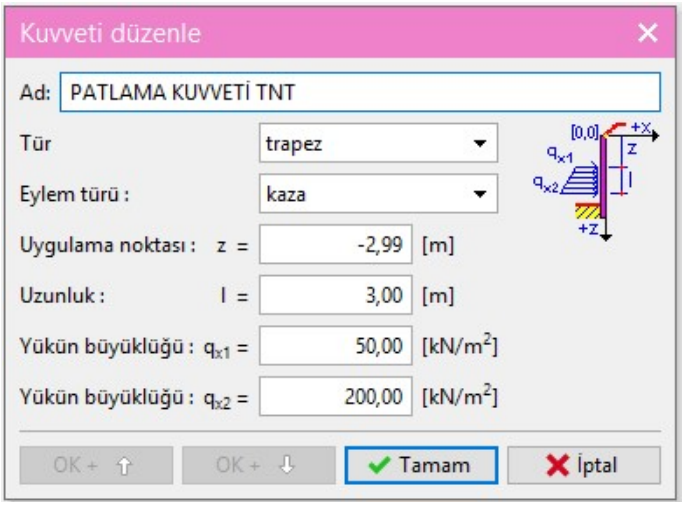
Şekil 7. GEO5 Programı Örnek Çalışma Gabion Duvar Geometrisi

Gabion duvarın altında bulunan zeminin özellikleri programdan otomatik seçilebilmekte veya proje verilerine göre girilebilmektedir. Çalışmada kullanılacak zemin tipi olarak düşük veya orta plastisiteli kil seçilmiştir. Şekil 8'de programda kullanılan zemin parametreleri gösterilmektedir.

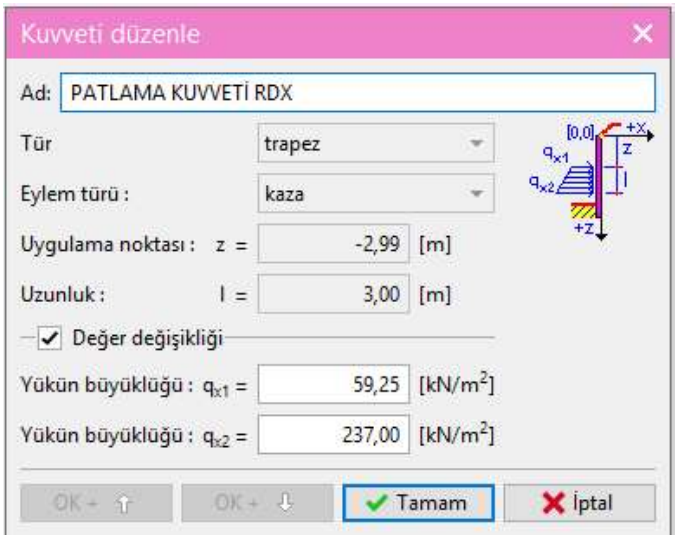


Şekil 8. GEO5 Programı İçin Zemin Parametreleri

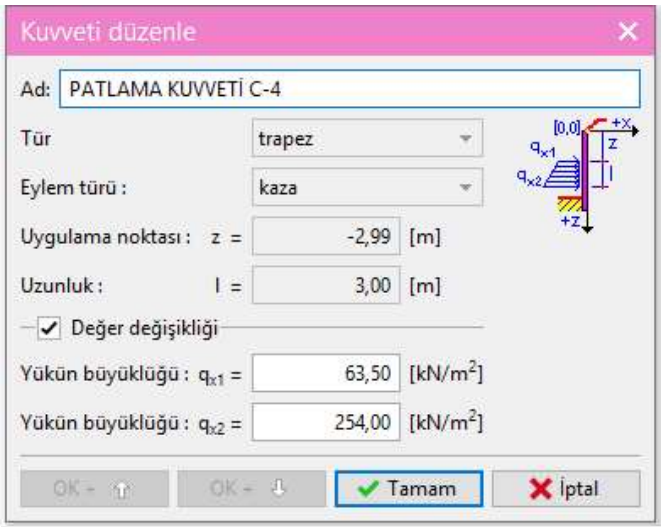
Çalışmada seçilen zemin parametreleri atanır ve çalışma için gerekli arazi tipleri, sürşarj yükleri ve varsa arazideki su durumu atanır. Uygulanan kuvvetler her bir patlayıcı türü için Tablo 4'te hesaplanmış değerler sisteme girilmiştir. Şekil 8, Şekil 9, Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12'de her bir patlayıcı türünün programa işlenmiş patlama kuvveti değerleri ve uygulama noktaları gösterilmektedir.



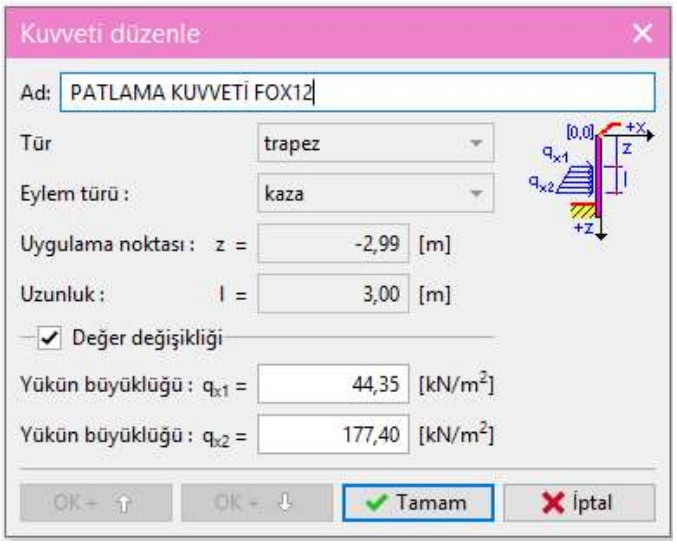
Şekil 9. TNT Patlayıcısı İçin Patlama Kuvveti ve Uygulanma Noktasının Tayini



Şekil 10. RDX Patlayıcısı İçin Patlama Kuvveti ve Uygulanma Noktasının Tayini



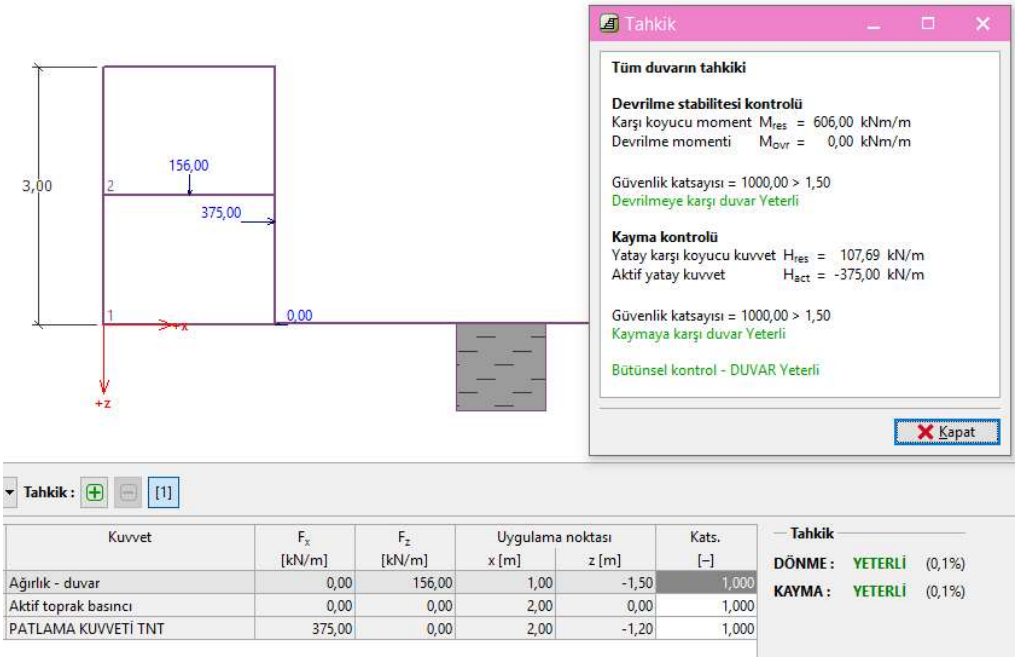
Şekil 11. C-4 Patlayıcısı İçin Patlama Kuvveti ve Uygulanma Noktasının Tayini



Şekil 12. FOX-12 Patlayıcısı İçin Patlama Kuvveti ve Uygulanma Noktasının Tayini

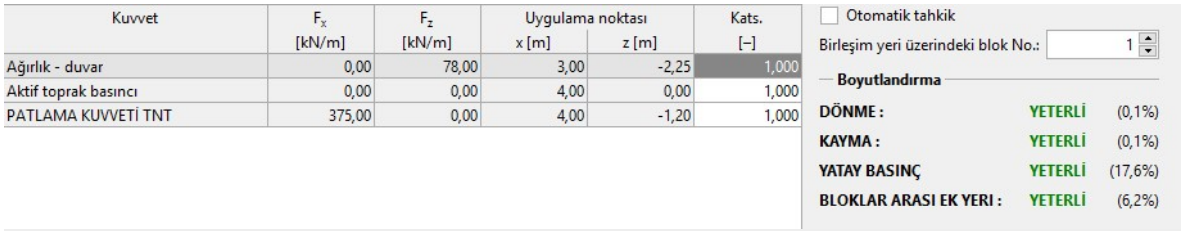
6. GEO5 Programı Farklı Patlayıcı Türlerinde Yapılan Tahkikler ve Sonuçları

GEO5 programı dahilinde tüm patlayıcı tipleri için patlama kuvveti değerleri programa işlenmiş ve tahkikler yapılmıştır. Tüm patlayıcı tipleri için eylem türü -kaza- olarak seçilmiş ve yük dağılımı patlama olması sebebiyle trapez seçilmiştir. Gabion duvara patlayıcı kuvvetleri etki ettirilmiş ve yapılan tahkikler sonucunda Gabion duvar bütün patlayıcı tiplerinin olası patlama durumunda yüklerini taşımış ve tahkikler olumlu sonuçlanmıştır. Şev stablite analizi yapılmış olup tüm patlayıcı türlerinde olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Tanıtılan ve olumlu sonuç veren dört patlayıcı türü de işlenmiş olup analizlerde emsal olarak TNT patlayıcısı ve FOX-12 patlayıcısının sonuçları verilmiştir. Şekil 13'te TNT patlayıcısının patlayıcı kuvvetine karşı duvar tahkikleri gösterilmektedir.

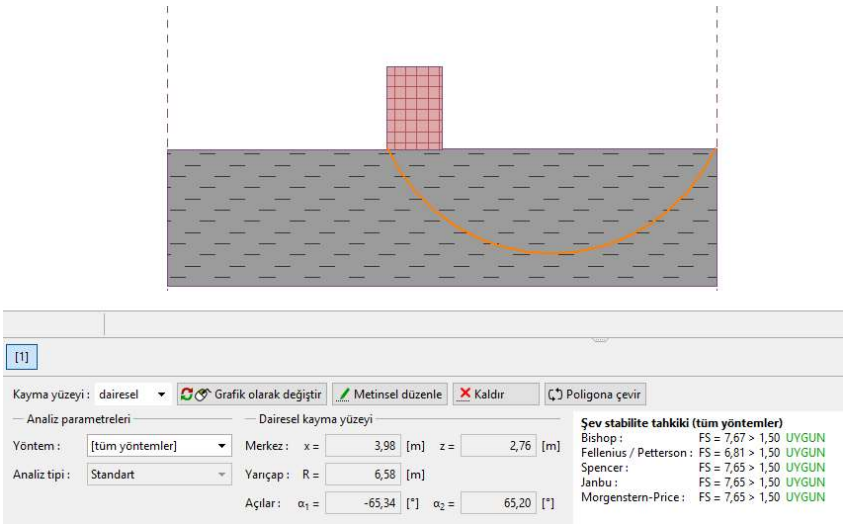


Şekil 13. TNT Patlayıcı Kuvvetine Karşı Duvar Tahkik Sonuçları

Şekil 14'te uygulanan TNT patlama kuvvetine karşı duvar boyutlandırma tahkik sonuçları ve Şekil 15'te ise TNT patlayıcı kuvvetine karşı şev stabilite analiz sonuçları gösterilmektedir.

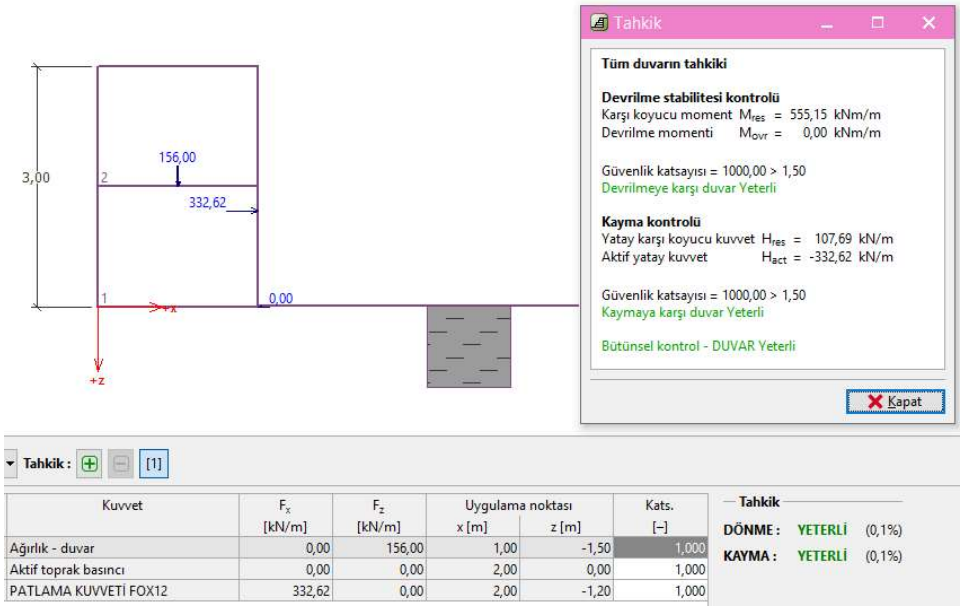


Şekil 14. TNT Patlayıcı Kuvvetine Karşı Duvar Boyutlandırma Tahkik Sonuçları



Şekil 15. TNT Patlayıcı Kuvvetine Karşı Şev Stabilite Analiz Sonuçları

TNT eşdeğerlik değerlerinde 1'in altında eşdeğerlik veren FOX-12 patlayıcısı da incelenmiş ve Şekil 16'da FOX-12 patlayıcı kuvvetine karşı duvar tahkik sonuçları gösterilmiştir. Şekil 17'de duvar tahkik sonuçları, Şekil 18' de ise şev stabilite sonuçları sunulmuştur.



Kuvvet	F_x [kN/m]	F_z [kN/m]	Uygulama noktası x [m]	Uygulama noktası z [m]	Kats. [–]
Ağırlık - duvar	0,00	156,00	1,00	-1,50	1,000
Aktif toprak basıncı	0,00	0,00	2,00	0,00	1,000
PATLAMA KUVVETİ FOX12	332,62	0,00	2,00	-1,20	1,000

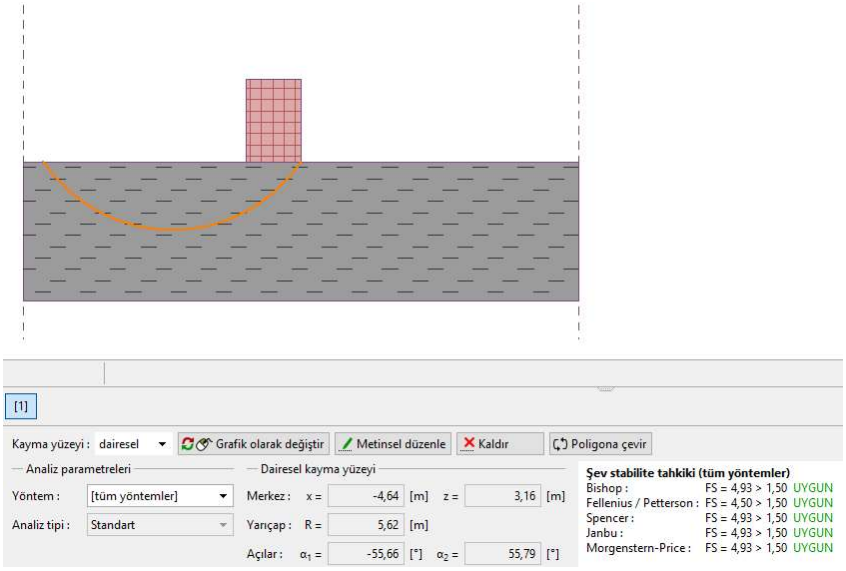
Tahkik
DÖNME : YETERLİ (0,1%)
KAYMA : YETERLİ (0,1%)

Şekil 16. FOX-12 Patlayıcı Kuvvetine Karşı Duvar Tahkik Sonuçları

Kuvvet	F_x [kN/m]	F_z [kN/m]	Uygulama noktası x [m]	Uygulama noktası z [m]	Kats. [–]
Ağırlık - duvar	0,00	78,00	3,00	-2,25	1,000
Aktif toprak basıncı	0,00	0,00	4,00	0,00	1,000
PATLAMA KUVVETİ FOX12	332,62	0,00	4,00	-1,20	1,000

Otomatik tahkik
Birleşim yeri üzerindeki blok No.: 1
Boyutlandırma
DÖNME : YETERLİ (0,1%)
KAYMA : YETERLİ (0,1%)
YATAY BASINÇ YETERLİ (17,6%)
BLOKLAR ARASI EK YERİ : YETERLİ (6,2%)

Şekil 17. FOX-12 Patlayıcı Kuvvetine Karşı Duvar Boyutlandırma Tahkik Sonuçları



Şekil 18. FOX12 Patlayıcı Kuvvetine Karşı Şev Stabilite Analiz Sonuçları

7. Sonuçlar

Bu çalışmada dört farklı patlayıcı etkisine maruz kalmış Gabion duvarların stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir. Geo5 programı dahilinde TNT, RDX, C-4 ve FOX-12 patlayıcılarının dönme, kayma, devrilme tahkikleri yapılmış olup boyutlandırma açısından da değerlendirilmiştir. Tablo 7'de tüm patlayıcı türlerinin tahkik ve boyutlandırma analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 7. Geo5 Programı Dahilinde Elde Edilmiş Tahkik ve Boyutlandırma Analizi

Patlayıcı türü	Tahkik ve boyutlandırma analizi				
	Dönme tahkiki	Kayma tahkiki	Devrilme tahkiki	Yatay basınç	Bloklar arası ek yeri
TNT	%0,1 yeterli	%0,1 yeterli	Yeterli	%17,6 yeterli	%6,2 yeterli
RDX	%0,1 yeterli	%0,1 yeterli	Yeterli	%17,6 yeterli	%6,2 yeterli
C-4	%0,1 yeterli	%0,1 yeterli	Yeterli	%17,6 yeterli	%6,2 yeterli
FOX-12	%0,1 yeterli	%0,1 yeterli	Yeterli	%17,6 yeterli	%6,2 yeterli

Şev stabilite analizi kapsamında şev stabilitesi tahkik türlerinden Bishop, Fellenius- Petterson, Spencer, Janbu ve Morgenstern Price yöntemleri uygulanmıştır. Şev stabilite analizlerinde FS adı verilen güvenlik sayısının 1,5'ten büyük olması gerekmektedir. Çalışmada kullanılan dört patlayıcı türünün de güvenli katsayı değerleri 1,5'ten büyük çıkmış olup şev stabilitesi olumlu sonuçlanmıştır. Tablo 8'de tüm patlayıcıların şev stabilite analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 8. Geo5 Programı Dahilinde Elde Edilmiş Şev Stabilite Tahkik Sonuçları

Patlayıcı türü	Şev stabilitesi tahkiki				
	Bishop	Fellenius/ Petterson	Spencer	Janbu	Morgenstern-Price
TNT	FS: 7,67	FS: 6,81	FS: 7,65	FS: 7,65	FS: 7,65
RDX	FS: 4,93	FS: 4,50	FS: 4,93	FS: 4,93	FS: 4,93
C-4	FS: 4,42	FS: 4,13	FS: 4,42	FS: 4,42	FS: 4,42

FOX-12	FS: 4,93	FS: 4,50	FS: 4,93	FS: 4,93	FS: 4,93

Tüm yapılan analizler sonucunda her bakımdan daha ekonomik ve avantajlı olan gabion duvarlar tüm patlama kuvvetlerini taşımış olup, şev stabilite analizinde de güvenli tarafta kalmıştır. Gabion duvar boyutlandırması değiştirilerek, patlama kuvvetleri ve patlayıcı türleri farklı seçilerek çalışma büyütülebilir ve gabion duvar kullanımı ülkemizde bu şekilde arttırılabilmektedir. Yapılan çalışma sonucunda özellikle savunma sanayisi açısından olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Bilgilendirme

Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Kurumu Fine Firması tarafından sağlanan GEO5 Geoteknik Yazılım Paketini kullanmaktadır.

Kaynaklar

Akıncı, M., (2000). Güvenç Havzası Koruma Projesi Teknik Gerekçe Raporu, KHGM.

C grubu patlayıcıları ve C-4. 11.10.2020 https://www.savunmasanayist.com/c-grubu-patlayicilari-ve-c4/ (2020).

Cömert, M. (2010). Betonarme yapıların patlamalar karşısındaki performanslarının değerlendirilmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.*

DSİ, Taşkın Kontrol Duvarları Genel Teknik Şartnamesi, Nisan (2018).

Dursun, Ö. (2008). Gabion Sandık Uygulamasının Tersip Bendi ve Islah Sekilerinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *DSİ 9. Bölge Müdürlüğü, Etüd ve Plan Şube Müdürlüğü*, *Elazığ.*

Ekermen, Nilgün. Patlayıcı ve Yüksek Patlayıcı Maddelerin Özellikleri, Sınıflandırılması ve Patlama Etkileri. Patlamadan Korunma Dökümanı Hazırlama Eğitim Programı.

Erkoç, Ö. (1998). Patlatma ile Çevreye Verilen Sarsıntılar ve Hasar Kriteri Üzerine Bir Tartışma
3.Delme ve Patlatma Sempozyumu, p. 129-139.

Gabion duvar nedir? Gabion tel örgü- sandık duvarlar nasıl uygulanır?. 25.02.2020 https://insapedia.com/gabion-nedir-gabion-tel-orgu-sandik-duvarlar-nasil-uygulanir/ (2020).

Karabayır, D. (2020). 33,5-Dinitro-4-Kloro Benzonitril' den Hazırlanan Azotça Zengin Yeni Enerjik Maddelerin Termodinamik Değerlerinin Teorik ve Deneysel Değerlerinin Karşılaştırılması. *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.*

Kıcıman Tel Sanayi ve Ticaret A.Ş. *Gabion sepet*. http://www.kiciman.com/sayfa/gabion-sepet,6.php (2013).

Koççaz, Zeynep. (2004). Patlama yüklerine dayanıklı yapı tasarımı. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.*

Saatçi, S. (2018). İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü, *TMMOB İzmir Şube.*

Toplu, E. (2020). Sismik Yalıtımlı Yapılarda Patlama Etkilerinin İncelenmesi. *Sakarya Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.*

Tosun, S. (1991). Madencilikte Patlatılacak Ortama Uygun Patlayıcı Madde Seçimi, *Madencilik Dergisi.*

Uray E. (2014). Gabion Tipi Dayanma Duvarlarında Tasarım Kriterlerinin Araştırılması. *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.*

Uray, E.– Tan, Ö. (2015). "Gabion Tipi Dayanma Yapıları", *(TMH) Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, 485, 19-29.

Yılmaz, M.-Sevgi, S.-Eskici, B.-Şener & Y.S.-Eliüşük, M. (2020). Kısmen Baraj Gölü Suları Altında Kalacak Olan Hasankeyf Yamaç Külliyesinin Sağlamlaştırılması, Korunması ve Sergilenmesine Yönelik Uygulamalar, *Amisos*, 5/9, 413-439.

Zakar, L.& Eyüpgiller, K. K. (2015). *Mimari Restorasyon Koruma Teknik ve Yöntemleri*, İstanbul.

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

UMAGD, (2023) 15(2), 749-762

10.29137/umagd.1305068

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Two DO-CCII Based Lossless Floating Capacitance Multipliers

Tolga Yucehan [1]

[1]*Afyon Kocatepe University, Dazkiri Vocational School, Afyonkarahisar, TURKEY*

***Başvuru/Received**: 29/05/2023* ***Kabul / Accepted**: 10/06/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Abstract

In this paper, two new lossless floating capacitance multipliers (FCMs) are designed. These FCMs consist of two dual-output second-generation current conveyors (DO-CCIIs). In the designed FCMs, two resistors and a capacitor are used. The resistors of the proposed FCMs are grounded. Nevertheless, the capacitors of the FCMs are floating. The proposed circuits can be electronically adjusted if current controlled DO-CCIIs are employed instead of the DO-CCIIs in the proposed lossless FCMs. Furthermore, passive element matching conditions do not necessary for the proposed circuits. The proposed FCMs are tested in the second-order passive filter. The SPICE program is carried out for all the simulations while utilizing the parameters of the 0.18 μm CMOS technology.

Key Words

"Lossless, DO-CCII, floating capacitance multipliers"

***Corresponding Author:** tyucehan@aku.edu.tr*

1. Introduction

In analog circuits, such as oscillators and active filter circuits, a capacitor has a crucial role as a passive component. As mentioned in (Amico et al., 1997), large-valued capacitors are unsuitable for integrated circuit (ICs) technologies due to their large area requirements. It means that as the value of the capacitor increases, the area of the ICs also increases. The capacitance multiplier circuits are utilized instead of large-sized capacitors in IC technology. In the literature, various types of active block buildings (ABBs) are used in analog circuit designs (Kuntman & Uygur, 2012). Current-mode (CM) active devices offer several potential benefits over voltage-mode (VM) active devices like operational amplifiers (Giuseppe & Guerrini, 2004; Senani et al., 2015; Toumazou et al., 1993; Wilson, 1990, 1992). Among them, one of the most commonly used ABB is the second-generation current conveyor (CCII), especially in low-power applications and CM signal processing (Ferri & Guerrini, 2001; Yuce, 2017). However, some CCII-based floating capacitance multiplier (FCM) circuits mentioned in the literature have some disadvantages, which are listed below:

The circuits mentioned in (Abuelma'Atti & Tasadduq, 1999; Al-Absi & Al-Khulaifi, 2019; Jaikla & Siripruchyanun, 2007; Pal, 1981; Saad & Soliman, 2010; Senani, 1982; Siripruchyanun et al., 2007; Yuce, Minaei, et al., 2006; Yuce, 2006a, 2006b; Yuce, Cicekoglu, et al., 2006; Yucehan & Yuce, 2022) have been implemented using more than two ABBs. In the FCM circuits introduced in (Jaikla & Siripruchyanun, 2007; Yuce, 2006a, 2006b), more than two resistors are utilized. The ABBs employed in some of the proposed circuits are not similar (Al-Absi & Al-Khulaifi, 2019; Jaikla & Siripruchyanun, 2007; Saad & Soliman, 2010; Sagbas et al., 2009; Siripruchyanun et al., 2007). Additionally, the FCM has a passive element matching issue in (Yuce, 2006a), while the FCM presented in (Abuelma'Atti & Tasadduq, 1999) is lossy. Furthermore, the FCM circuits described in (Abuelma'Atti & Tasadduq, 1999; Jaikla & Siripruchyanun, 2007; Minaei et al., 2006; Petchakit & Petchakit, 2005; Siripruchyanun et al., 2007; Yuce, 2006b; Yuce, Minaei, et al., 2006) are included BJTs in the internal structure of the ABBs. In this case, the proposed circuits are sensitive to temperature variations. A comparison of these CCII-based FCMs from the literature with the proposed circuits is presented in **Table 1**.

This study proposes two new lossless FCM circuits. Two dual-output CCIIs (DO-CCIIs) are utilized in both proposed FCMs. The FCMs are designed with a minimum number of passive elements, consisting of one capacitor and two resistors. The resistors are grounded; nevertheless, the capacitors in the proposed FCMs are floating. The circuits can be electronically adjustable if current-controlled DO-CCIIs (DO-CCCIIs) are used instead of the ABBs. The ideal and non-ideal analyses of the FCMs are performed. Also, the FCMs are examined in a second-order passive filter as an application. All the simulations are performed using the SPICE program.

The rest of the study is planned as follows: In the second section, the DO-CCII is introduced, while the proposed circuits and their theoretical analyses are presented in Section 3. The simulation results of the proposed FCMs are introduced in Section 4. The application circuit and its simulations are given in the fifth section. Finally, the conclusion is discussed in Section 6.

Table 1. The Comparison table for the FCMs in the literature and the proposed ones.

References (Figure)	Lossless	# of Resistors G / F	Using Capacitor	Technology	# of ABBs	Using Similar ABBs	Supply Voltages (V)	Total Power Consumptions (W)	Matching Conditions	Operating Frequency Range (Decade)
(Abuelma'Atti & Tasadduq, 1999) (4)	No	0 / 0	G	BJT	DO-CCCII, 3 CCCII+	Yes	± 2.5	-	No	-
(Al-Absi & Al-Khulaifi, 2019) (1)	Yes	0 / 0	F	0.18µm	CCII+, 4 OTA	No	± 0.75	2.03 µ	No	7
(Jaikla & Siripruchyanun, 2007) (3)	Yes	4 / 0	G	BJT	DVCC, DO-CCII, CCII+, CCII-	No	± 1.5	-	No	3.48
(Minaei et al., 2006) (1)	Yes	1 / 1	G	BJT	2 DO-CCII	Yes	± 2.5	-	No	-
(Mohan, 2005) (1.a)	Yes	1 / 1	G	-	2 DO-CCII	Yes	-	-	No	-
(Pal, 1981) (2)	Yes	1 / 1	G	-	2 CCII+, 2 CCII-	Yes	-	-	No	-
(Petchakit & Petchakit, 2005) (3)	Yes	1 / 1	G	BJT	2 DO-CCII	Yes	± 2.5	-	No	-
(Saad & Soliman, 2010) (14)	Yes	1 / 1	G	0.25 µm	DVCC, 2 CCII+	No	± 1.5	-	No	2
(Sagbas et al., 2009) (1)	Yes	1 / 0	G	0.35 µm	DO-CCII, OTA	No	± 1.5	1m	No	4.75
(Senani, 1982) (1)	Yes	1 / 1	G	-	4 CCII+	Yes	-	-	No	-
(Siripruchyanun et al., 2007) (3)	Yes	2 / 0	G	BJT	DVCC, DO-CCCII, CCCII+, CCCII-	No	± 1.5	-	No	3.48
(Yuce, 2006a) (1)	Yes	3 / 0	G	0.35 µm	DO-CCII, CCII+, CCII-	Yes	± 1.5	-	Yes	4
(Yuce, 2006b) (1)	Yes	3 / 0	G	BJT	DO-CCCII, 3 CCCII+	Yes	± 2.5	-	No	-
(Yuce, 2006b) (2)	Yes	3 / 0	G	BJT	2 DO-CCCII, CCCII+	Yes	± 2.5	-	No	-
(Yuce, Cicekoglu, et al., 2006) (1)	Yes	1 / 1	G	0.35 µm	DO-CCII, CCII+, CCII-	Yes	± 1.5	-	No	1.52
(Yuce, Minaei, et al., 2006) (4)	Yes	0 / 0	G	BJT	DO-CCCII, 3 CCCII+	Yes	± 2.5	-	No	-
(Yucehan & Yuce, 2022) (5)	Yes	1 / 1	G	0.18 µm	2 DO-CCII, CCII-	Yes	± 1.25	1.26 m	No	5
First Proposed FCM	**Yes**	**2 / 0**	**F**	**0.18 µm**	**2 DO-CCII**	**Yes**	**± 1.25**	**1.16 m**	**No**	**6.12**
Second Proposed FCM	**Yes**	**2 / 0**	**F**	**0.18 µm**	**2 DO-CCII**	**Yes**	**± 1.25**	**1.16 m**	**No**	**6.12**

G: Grounded F: Floating -: Not available

2. The Presentation of the DO-CCII

The symbolic demonstration of the DO-CCII is given in **Figure 1**. The mathematical equation of the terminals of the DO-CCII, with the non-ideal gains, is defined in equation (1) as a matrix form. In equation (1), β, α, and γ are terms that specify non-ideal gains in which β is voltage gain, while α and γ are current gains. The internal structure of the DO-CCII based on CMOS transistors is obtained from (Hassanein et al., 2005), which is demonstrated in **Figure 2**.

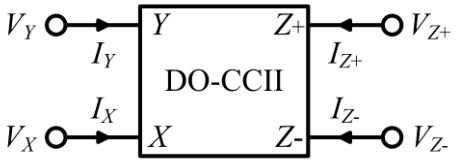


Figure 1. The symbolic demonstration of the DO-CCII

$$\begin{bmatrix} I_Y \\ V_X \\ I_{Z+} \\ I_{Z-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \beta & 0 \\ 0 & \alpha \\ 0 & -\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ I_X \end{bmatrix} \quad (1)$$

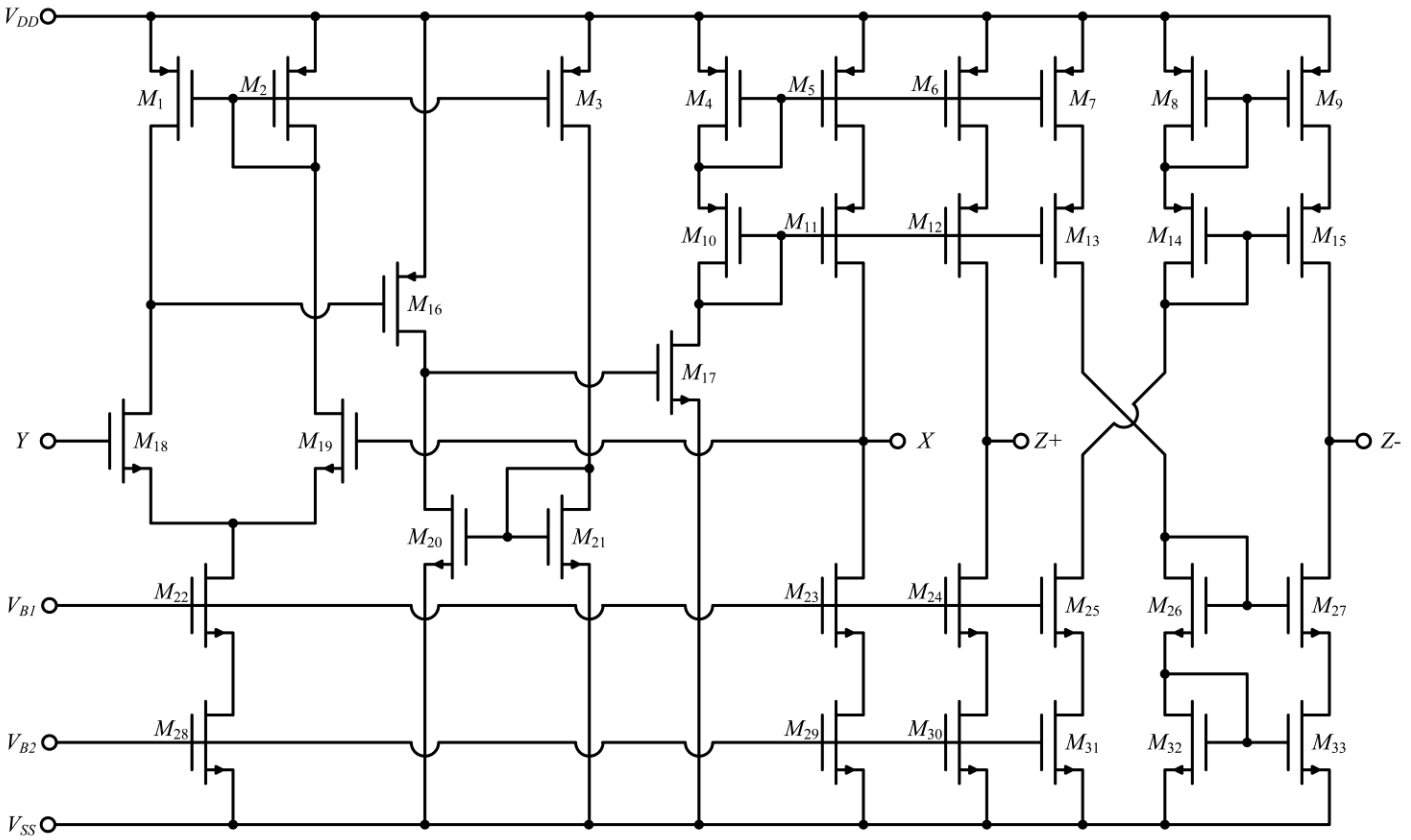


Figure 2. The internal structure of the DO-CCII based on CMOS transistors derived from (Hassanein et al., 2005)

3. Proposed Circuits

The proposed lossless FCMs are demonstrated in **Figure 3** and **Figure 4**, respectively. Two DO-CCII, a capacitor, and two resistors are used in each designed FCM. Also, the equivalent representation of the designed FCMs is given in **Figure 5**.

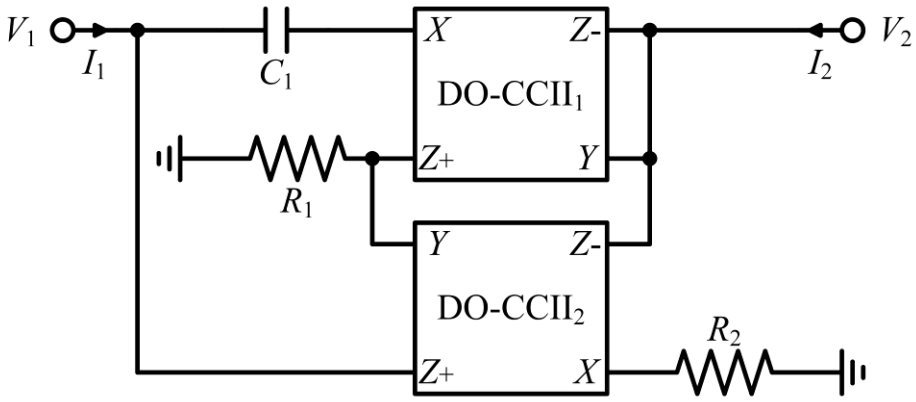


Figure 3. The first proposed FCM

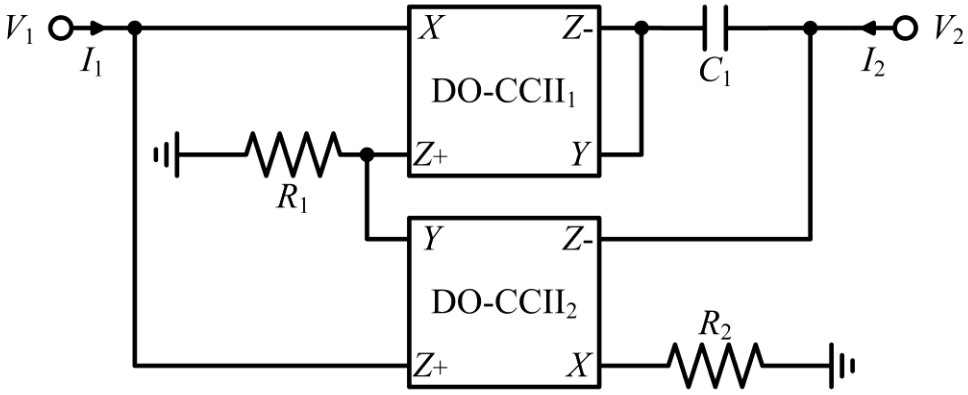


Figure 4. The second proposed FCM

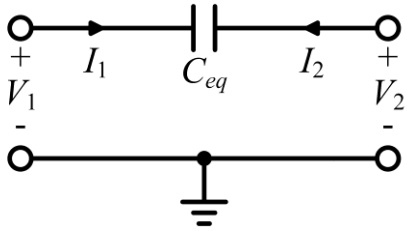


Figure 5. The equivalent representation of the designed FCMs

3.1. Theoretical Analyses of The First Proposed FCM

The first proposed FCM, which is shown in **Figure 3**, is ideally calculated as in equation (2).

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = sC_1\left(1+\frac{R_1}{R_2}\right)\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = sC_{eq}\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

Here, C_{eq} is an equivalent capacitance, while K is a multiplying factor, and they are respectively equal to $C_1(1+R_1/R_2) = C_1K$ and $1+R_1/R_2$. If the non-ideal gains of the DO-CCII are included, the matrix equation is evaluated as

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{sC_1}{R_2}\begin{bmatrix} \alpha_1\alpha_2\beta_2R_1+R_2 & -\beta_1\left(\alpha_1\alpha_2\beta_2R_1+R_2\right) \\ -\left(\alpha_1\beta_2\gamma_2R_1+\gamma_1R_2\right) & \beta_1\left(\alpha_1\beta_2\gamma_2R_1+\gamma_1R_2\right) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \tag{3}$$

If the parasitic impedances of the DO-CCII are included, while the DO-CCII is considered ideal, the following matrix equation is calculated as

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{b}\begin{bmatrix} 1+a+b\left(C_{Z+}//R_{Z+}\right) & -\left(1+a\right) \\ -\left(1+a\right) & 1+a+b\left(C_Y//2C_{Z-}//2R_{Z-}\right) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

where the terms, *a* and *b*, are defined as

$$a = \left(C_Y//C_{Z+}//R_{Z+}//R_1\right)\left(R_X + R_2\right) \tag{5a}$$

$$b = a\left(R_X + \frac{1}{sC_1}\right) \tag{5b}$$

3.2. Theoretical Analyses of The Second Proposed FCM

The second proposed FCM, which is represented in **Figure 4**, is ideally evaluated as in equation (2). When considering the non-ideal gains of the DO-CCII, the equation is calculated as in equation (6).

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{sC_1}{\gamma_1 R_2}\begin{bmatrix} \beta_1\left(\alpha_1\alpha_2\beta_2 R_1 + R_2\right) & -\left(\alpha_1\alpha_2\beta_2 R_1 + R_2\right) \\ -\beta_1\left(\alpha_1\beta_2\gamma_2 R_1 + \gamma_1 R_2\right) & \alpha_1\beta_2\gamma_2 R_1 + \gamma_1 R_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \tag{6}$$

If the parasitic impedances of the DO-CCII are considered, while the non-ideal gains of the DO-CCII are chosen as unity, the following matrix equation is calculated as

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{ad}\begin{bmatrix} \left(1+a\right)\left[\left(C_Y//C_{Z-}//R_{Z-}\right)+sC_1\right]+ad\left(C_{Z+}//R_{Z+}\right) & -\left(1+a\right)sC_1 \\ -\left(1+a\right)sC_1-\left(C_Y//C_{Z-}//R_{Z-}\right) & ad\left(C_{Z-}//R_{Z-}\right)+\left(1+ac\right)sC_1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \tag{7}$$

where the term, *a*, is given in equation (5a), while terms, *c* and *d*, are shown in equations (8a) and (8b), respectively.

$$c = 1 + R_X\left(C_Y//C_{Z-}//R_{Z-}\right) \tag{8a}$$

$$d = c + sC_1R_X \tag{8b}$$

4. Simulations of The Proposed FCMs

The sizes of the MOS transistors in the internal structure are given in **Table 2**. The supply voltages, V_{DD} and V_{SS}, are respectively selected as +1.25 V and –1.25 V, while bias voltages, V_{B1} and V_{B2}, are chosen as –0.25 V and –0.62 V. The non-ideal gains and parasitic impedance values of the MOS transistor-based DO-CCII in **Figure 2** are obtained as indicated in **Table 3**. Additionally, the 0.18 µm CMOS technology parameters specified in (Minaei & Yuce, 2010) are utilized for the MOS transistors in **Figure 2**. The SPICE program is used for all the simulations.

Table 2. Sizes of the MOS transistors

	MOS Transistors	*W* (µm)	*L* (µm)
PMOS	M_1-M_{16}	18	
NMOS	M_{18}, M_{19}, M_{22}, M_{28}	6	0.5
	M_{17}, M_{20}, M_{21}, M_{23}-M_{27}, M_{29}-M_{33}	5	

Table 3. Several achievement parameters of the DO-CCII

Non-ideal Gain Parameter Values			Values of The Parasitic Impedances		
α_0 = 1.0000	β_0 = 1.0000	γ_0 = 0.9997	R_X = 0.5162 Ω	R_{Z+} = 20.407 MΩ	R_{Z-} = 22.512 MΩ
$f_{\alpha 0}$ = 405 MHz	$f_{\beta 0}$ = 510 MHz	$f_{\gamma 0}$ = 340 MHz	C_Y = 4.79 fF	C_{Z+} = 16.64 fF	C_{Z-} = 33.29 fF

4.1. Simulation Results of The First Proposed FCM

In many simulations for the first proposed FCM, which is shown in **Figure 3**, C_1 is selected as 50 pF, and R_1 is chosen as 10 kΩ while R_2 is 1 kΩ. As a result, K is calculated as 11 while C_{eq} is 0.55 nF. The first proposed FCM is consumed 1.16mW of power. AC frequency-domain results of the first proposed FCM are represented in **Figure 6** comparatively with the ideal results. Also, Monte Carlo (MC) analyses are performed, while the uniform deviations of all passive elements are selected as 10%. MC analyses are made for 150 samples. MC results of the first proposed FCM are demonstrated in **Figure 7**. The temperature analysis results are shown in **Figure 8**, in which the temperature is changed from –40ºC to 120ºC. In addition to these analyses, the time-domain analysis of the first proposed FCM is fulfilled. The sinusoidal input currents, which have 20 µA peak-to-peak magnitude and 100 kHz frequency, are applied separately in the designed FCM and equivalent FCM circuits. The input current and output voltages are indicated in **Figure 9**. AC responses of the first proposed FCM with different K values are given in **Figure 10**. In this analysis, C_1 and R_2 are respectively chosen as 50 pF and 1 kΩ. Furthermore, R_1 is separately selected as 1 kΩ, 99 kΩ, and 999 kΩ. As a result, C_{eq} is obtained as 100 pF, 0.5 nF, and 5 nF, while K is evaluated as 2, 100, and 1000, respectively.

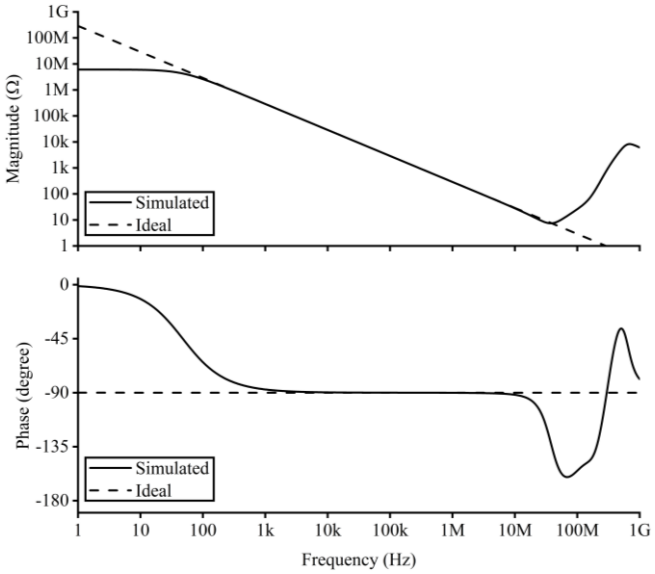


Figure 6. AC analysis outcomes of the first proposed FCM

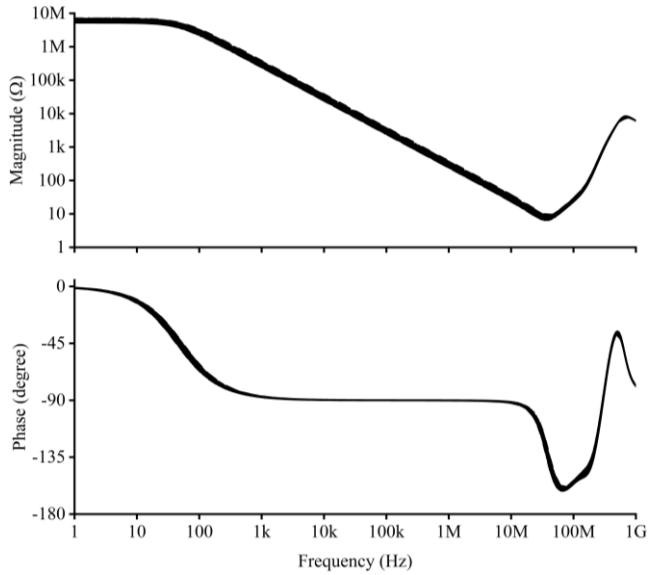


Figure 7. MC analysis outcomes of the first proposed FCM

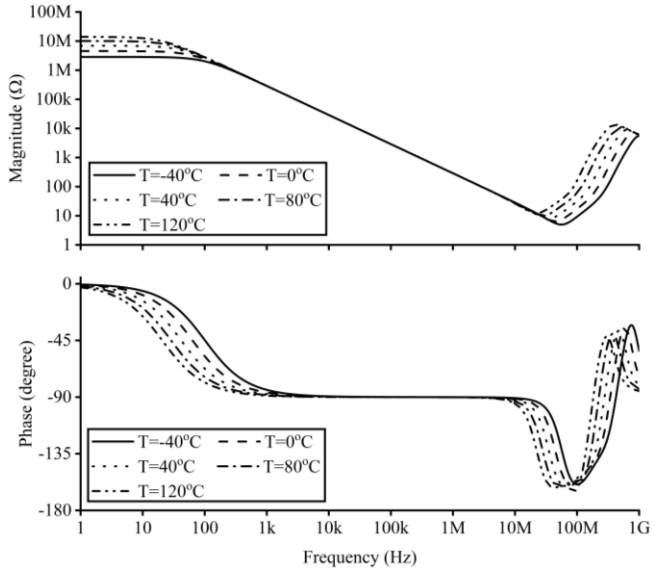


Figure 8. Temperature analysis outcomes of the first proposed FCM

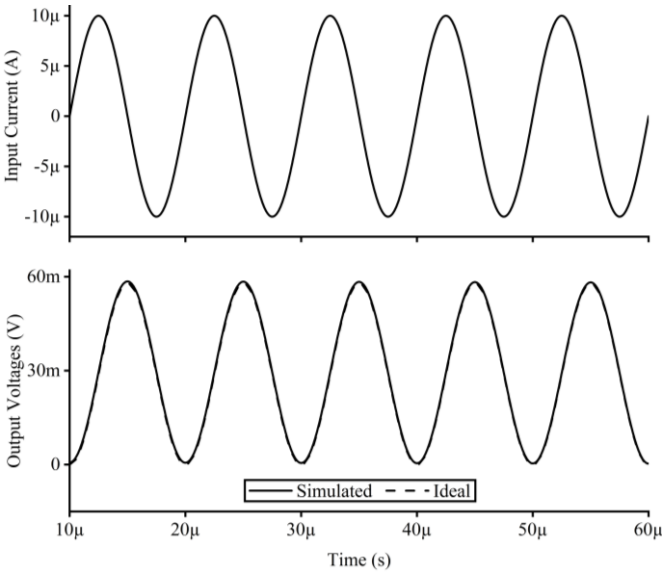


Figure 9. Time-domain analysis outcomes of the first proposed FCM

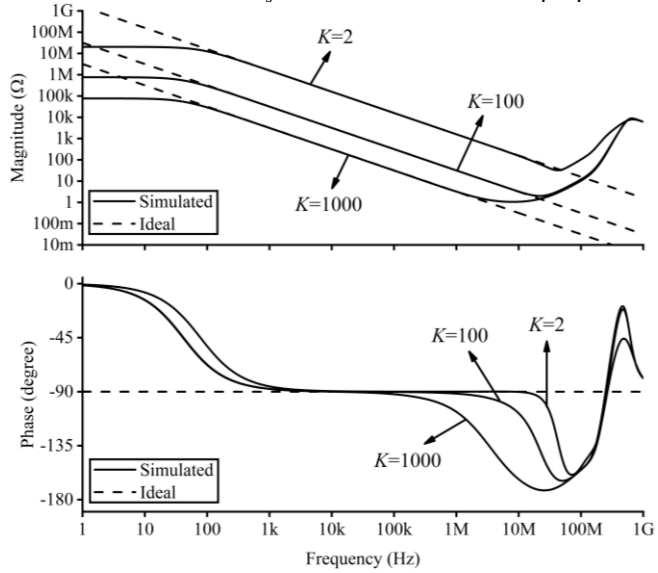


Figure 10. AC analysis outcomes for different *K* values of the first proposed FCM

The first designed FCM is compared with the FCM in (Mohan, 2005). R_1 = 1 kΩ, R_2 = 11 kΩ, and C = 50 pF are chosen for the FCM in (Mohan, 2005). Thus, K = 11, and C_{eq} = 0.55 nF are obtained. For the first proposed FCM, R_1 = 10 kΩ, R_2 = 1 kΩ, and C_1 = 50 pF are taken; hence, K = 11, and C_{eq} = 0.55 nF are gotten. The comparison results for the AC simulations are given in **Figure 11**.

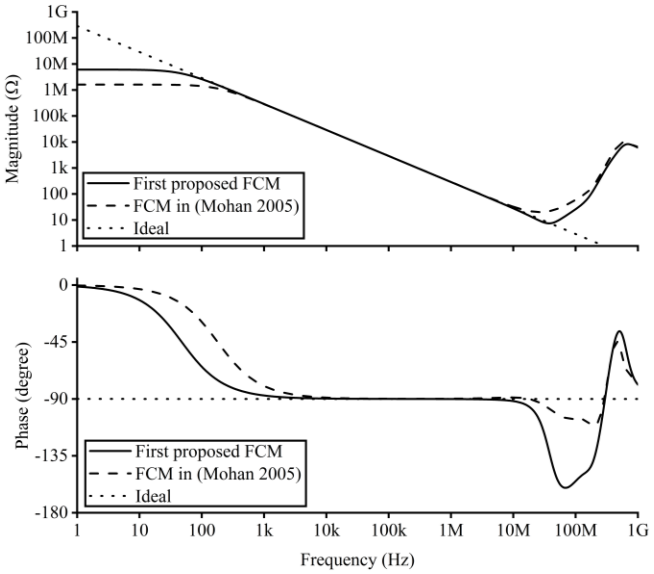


Figure 11. AC analysis outcomes for the FCM in (Mohan, 2005) and the first proposed FCM

4.2. Simulation Results of The Second Proposed FCM

In numerous simulations, C_1, R_1, and R_2 of the second proposed FCM, shown in **Figure 4**, are selected as 50 pF, 10 kΩ, and 1 kΩ, respectively. With these values, K is calculated as 11; consequently, C_{eq} is obtained as 0.55 nF. The second proposed FCM is consumed 1.16 mW of power. Frequency-domain results of the second designed FCM are shown in **Figure 12** comparatively with the theoretical results. Moreover, the MC analysis results of the second proposed FCM are given in **Figure 13**. MC analysis is fulfilled while the uniform deviations of all passive elements are selected as 10%, which is maintained for 150 samples. The temperature analysis results are plotted in **Figure 14**, where the temperature varies from –40ºC to 120ºC. Additionally, the time-domain analyses of the second proposed FCM are performed. Similarly, the same input currents are applied as in Section 4.1. The input current and output voltages are demonstrated in **Figure 15**. In **Figure 16**, the AC frequency results of the second proposed FCM with different K values are represented. In this analysis, C_1 and R_2 are respectively selected as 50 pF and 1 kΩ. As well, R_1 is separately selected as 1 kΩ, 99 kΩ, and 999 kΩ. As a result, C_{eq} is obtained as 100 pF, 0.5 nF, and 5 nF, while K is evaluated as 2, 100, and 1000, respectively.

Likewise, the second designed FCM is compared with FCM in (Mohan, 2005). The same passive elements given in Section 4.1 are taken. The simulation result is given in **Figure 17** comparatively with the second proposed FCM.

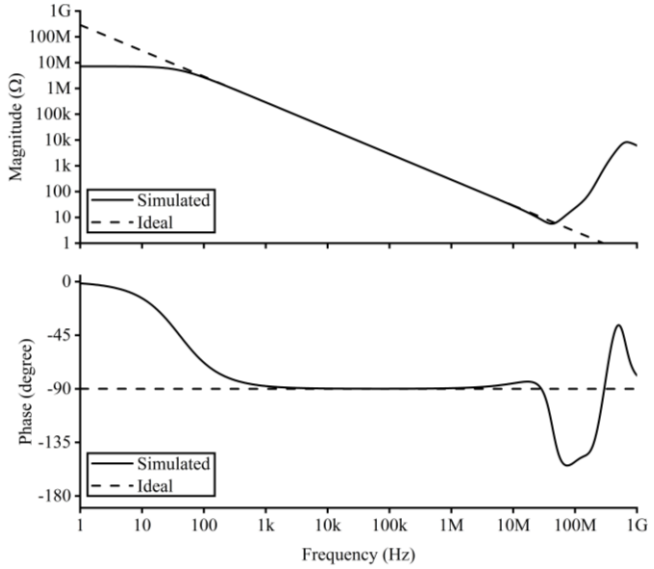


Figure 12. Frequency-domain analysis outcomes of the second proposed FCM

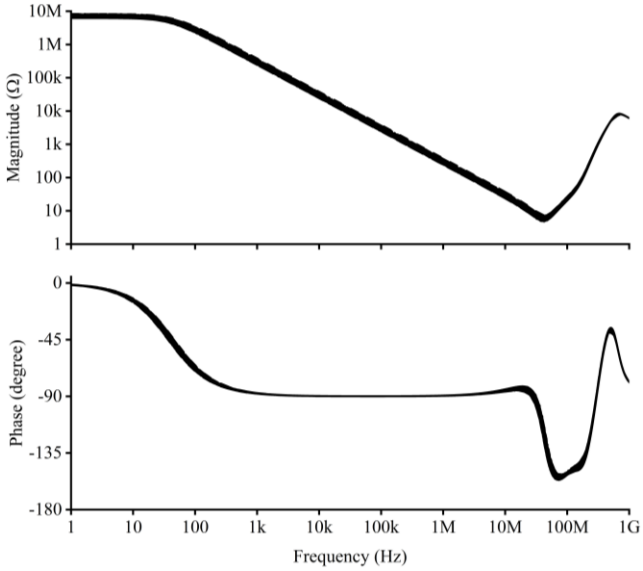


Figure 13. MC analysis outcomes of the second proposed FCM

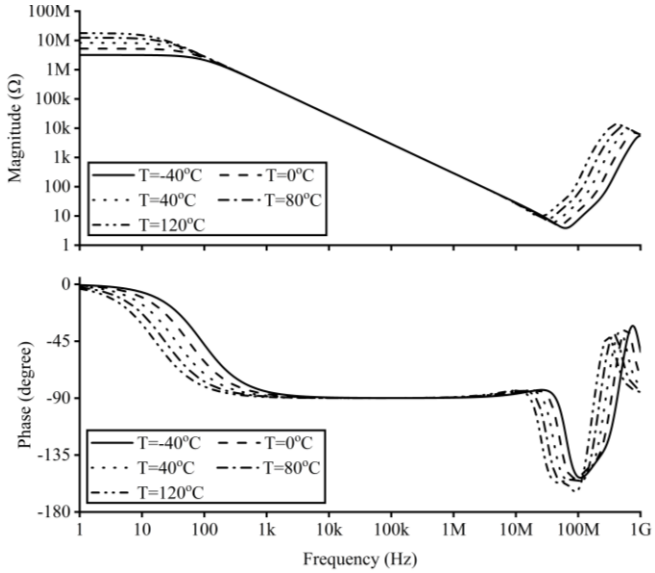


Figure 14. Temperature analysis outcomes of the second proposed FCM

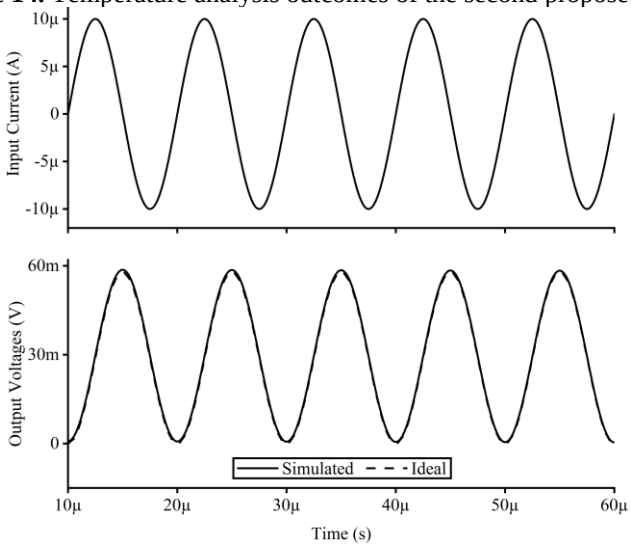


Figure 15. Time-domain analysis outcomes of the second proposed FCM

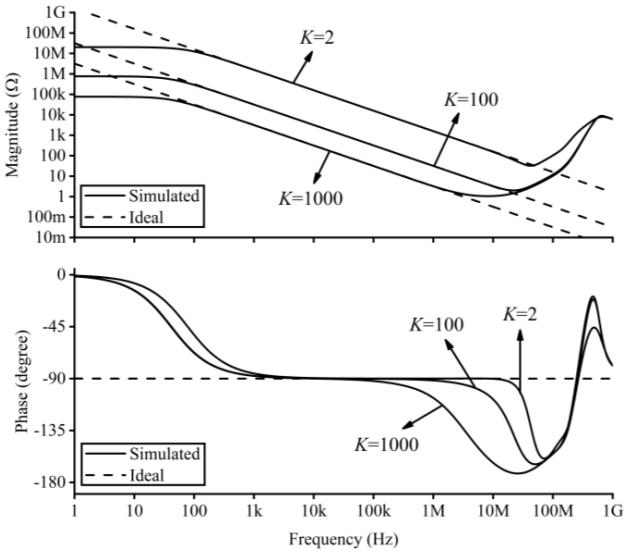


Figure 16. AC analysis outcomes for different *K* values of the second proposed FCM

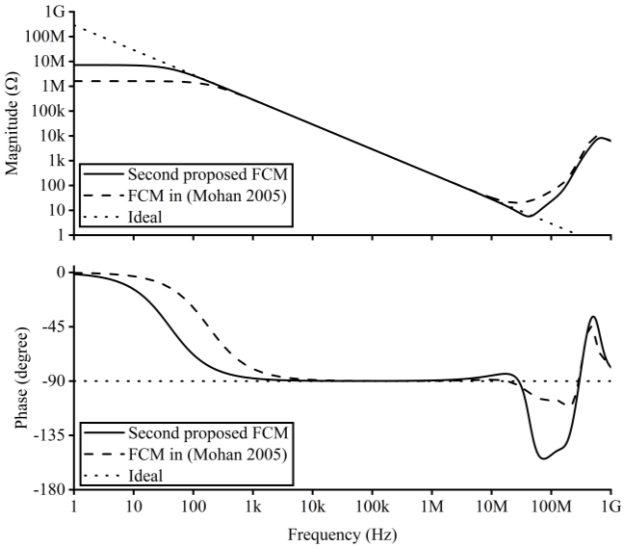


Figure 17. AC analysis outcomes for the second proposed FCM and FCM in (Mohan, 2005)

5. Application Example: Second-order Passive Filter

The proposed FCMs are tested in the second-order passive filter which is represented in **Figure 18**. It can appear from the application example in **Figure 18** that the filter can behave as high-pass (HP) filter or notch filter. The transfer functions of the filter are indicated in equations (9) and (10) for HP and notch outputs, respectively. Also, the resonance frequency (f_0) of the filter is indicated in equation (11), while the quality factor (Q) is in equation (12).

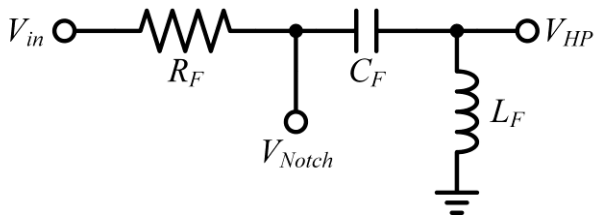


Figure 18. The second-order passive filter

$$\frac{V_{HP}}{V_{in}} = \frac{s^2}{s^2 + s\dfrac{R_F}{L_F} + \dfrac{1}{C_F L_F}} \tag{9}$$

$$\frac{V_{Notch}}{V_{in}} = \frac{s^2 + \frac{1}{C_F L_F}}{s^2 + s\frac{R_F}{L_F} + \frac{1}{C_F L_F}} \tag{10}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_F L_F}} \tag{11}$$

$$Q = \frac{1}{R_F}\sqrt{\frac{L_F}{C_F}} \tag{12}$$

For the simulations, the first proposed FCM is used instead of the C_F in **Figure 18**, firstly. R_F and L_F of the filter are selected as 1 kΩ and 0.5 mH. Also, C_1, R_1, and R_2 in **Figure 3** are respectively chosen as 50 pF, 9 kΩ, and 1 kΩ. Consequently, C_{eq} is ideally evaluated as 0.5 nF, while K is 10. Thus, selecting these values, f_0 of the filter is obtained as about 318 kHz, while Q is 1. Frequency-domain analysis results of the filter are demonstrated in **Figure 19**, and the time-domain analysis results are given in **Figure 20**. In the time-domain analysis, the sinusoidal input voltage is applied with 80 mV peak-to-peak at 1 MHz for the HP output. In addition, the second proposed FCM is utilized instead of C_F in the filter application, while C_1, R_1, and R_2 of the second proposed FCM are selected as 50 pF, 9 kΩ, and 1 kΩ. Also, R_F and L_F of the filter are taken as the same values. Hereby, f_0 and Q of the filter are also obtained as the same values. AC responses and transient analysis results of the filter are demonstrated in **Figure 21** and **Figure 22**, respectively.

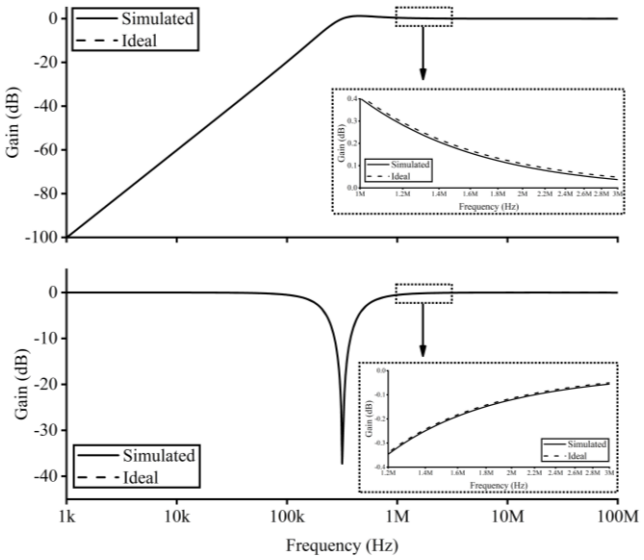


Figure 19. AC analysis outcomes of the filter in which the first proposed FCM used

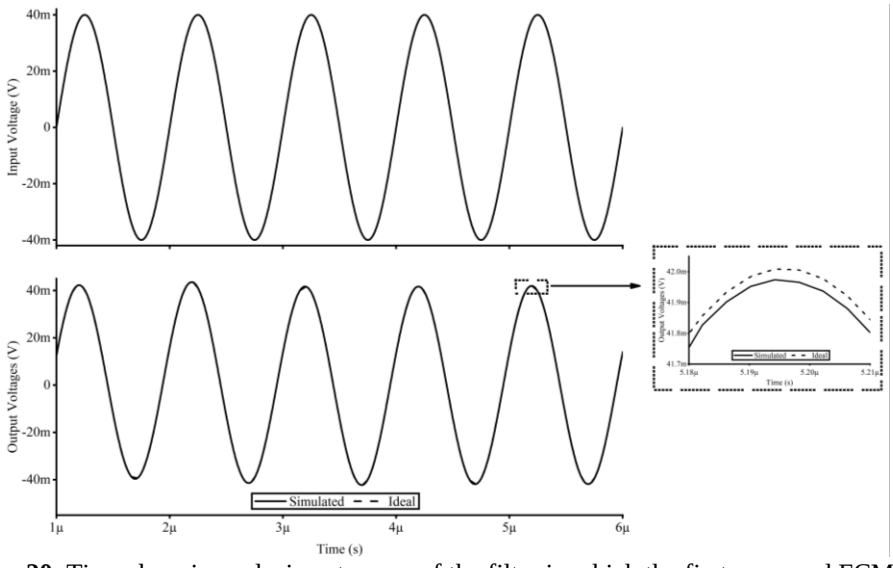


Figure 20. Time-domain analysis outcomes of the filter in which the first proposed FCM used

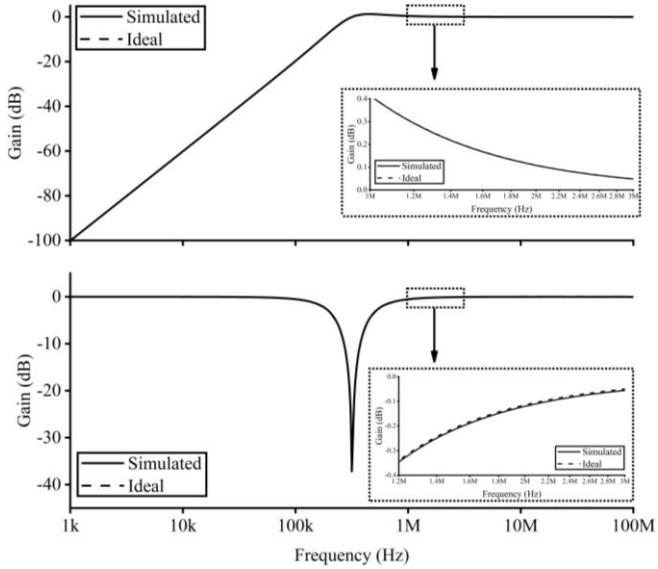


Figure 21. AC analysis outcomes of the filter in which the second proposed FCM used

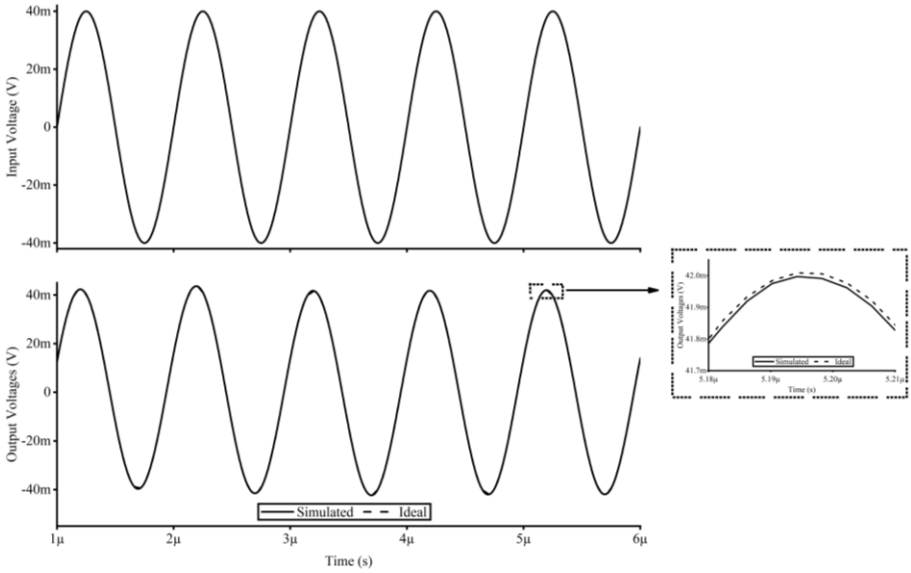


Figure 22. Time-domain analysis outcomes of the filter in which the second proposed FCM used

6. Conclusions

In this paper, two new lossless FCMs are proposed. Only two active devices are used, called DO-CCII, in the proposed FCMs. Both lossless FCMs are designed with a minimum number of passive elements. Resistors of the proposed FCMs are grounded, but a capacitor is floating in both proposed FCMs. The simulation responses of the proposed FCMs are achieved by using the SPICE simulations. Simulation results confirm the theoretical analysis from approximately 100 Hz to 40 MHz. Also, *K* can be very high. In addition, the proposed FCMs can be electronically adjusted if the current controlled DO-CCIIs are used instead of the DO-CCIIs of the proposed circuits. Both proposed FCMs are applied in the second-order passive filter as an application example. This application example has two outputs, one is HP output, and the other is notch output. Simulations of the filters, in which both proposed FCMs separately used, are verified the ideal results. The SPICE program is used for all the simulations, while 0.18 μm CMOS technology parameters are utilized in the internal structure of the DO-CCIIs.

References

Abuelma'Atti, M. T., & Tasadduq, N. A. (1999). Electronically tunable capacitance multiplier and frequency-dependent negative-resistance simulator using the current-controlled current conveyor. *Microelectronics Journal*, *30*(9), 869–873.

Al-Absi, M. A., & Al-Khulaifi, A. A. (2019). A new floating and tunable capacitance multiplier with large multiplication factor. *IEEE Access*, *7*, 120076–120081.

Amico, A. D., Natale, C. Di, Mariucci, M., & Barccarani, G. (1997). Active capacitance multiplication for sensor application. *Proceedings of Italian Conference of Sensors and Microsystems*.

Ferri, G., & Guerrini, N. C. (2001). Low-voltage low-power novel CCII topologies and applications. *ICECS 2001. 8th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, 1095–1098.

Giuseppe, F., & Guerrini, N. C. (2004). *Low-voltage low-power CMOS current conveyors*. Kluwer Academic Publishers.

Hassanein, W. S., Awad, I. A., & Soliman, A. M. (2005). New high accuracy CMOS current conveyors. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, *59*(7), 384–391.

Jaikla, W., & Siripruchyanun, M. (2007). Realization of current conveyors-based floating simulator employing grounded passive elements. *Proc. ECTI Con*, 89–92.

Kuntman, H. H., & Uygur, A. (2012). New possibilities and trends in circuit design for analog signal processing. *2012 International Conference on Applied Electronics*, 1–9.

Minaei, S., & Yuce, E. (2010). Novel voltage-mode all-pass filter based on using DVCCs. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, *29*, 391–402.

Minaei, S., Yuce, E., & Cicekoglu, O. (2006). A versatile active circuit for realising floating inductance, capacitance, FDNR and admittance converter. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, *47*(2), 199–202.

Mohan, P. V. A. (2005). Floating capacitance simulation using current conveyors. *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, *14*(1), 123–128.

Pal, K. (1981). New inductance and capacitor floatation schemes using current conveyors. *Electronics Letters*, *17*(21), 807–808.

Petchakit, W., & Petchakit, S. (2005). New floating capacitance multipliers. *Proceedings of 28th Electrical Engineering Conference (EECON-28)*, *2*, 1233–1236.

Saad, R. A., & Soliman, A. M. (2010). On the systematic synthesis of CCII-based floating simulators. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, *38*(9), 935–967.

Sagbas, M., Ayten, U. E., Sedef, H., & Koksal, M. (2009). Floating immittance function simulator and its applications. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, *28*(1), 55–63.

Senani, R. (1982). Novel lossless synthetic floating inductor employing a grounded capacitor. *Electronics Letters*, *18*(10), 413–414.

Senani, R., Bhaskar, D. R., & Singh, A. K. (2015). *Current conveyors: variants, applications and hardware implementations*. Springer International Publishing.

Siripruchyanun, M., Phattanasak, M., & Jaikla, W. (2007). Temperature-insensitive, current conveyor-based floating simulator topology. *2007 International Symposium on Integrated Circuits*, 65–68.

Toumazou, C., Lidgey, F. J., & Haigh, D. G. (1993). *Analogue IC design: the current-mode approach*. The Institution of Engineering and Technology.

Wilson, B. (1990). Recent developments in current conveyors and current-mode circuits. *IEE Proceedings G (Circuits, Devices and Systems)*, *137*(2), 63–77.

Wilson, B. (1992). Tutorial review trends in current conveyor and current-mode amplifier design. *International Journal of Electronics*, *73*(3), 573–583.

Yuce, E. (2006a). Floating inductance, FDNR and capacitance simulation circuit employing only grounded passive elements. *International Journal of Electronics*, *93*(10), 679–688.

Yuce, E. (2006b). On the realization of the floating simulators using only grounded passive components. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, *49*(2), 161–166.

Yuce, E. (2017). DO-CCII/DO-DVCC based electronically fine tunable quadrature oscillators. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, *26*(2), 1–17.

Yuce, E., Cicekoglu, O., & Minaei, S. (2006). CCII-based grounded to floating immittance converter and a floating inductance simulator. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, *46*(3), 287–291.

Yuce, E., Minaei, S., & Cicekoglu, O. (2006). Resistorless floating immittance function simulators employing current controlled conveyors and a grounded capacitor. *Electrical Engineering*, *88*(6), 519–525.

Yucehan, T., & Yuce, E. (2022). CCII-based simulated floating inductor and floating capacitance multiplier. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, *112*, 417–432.

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development
UMAGD, (2023) 15(2), 763-775.
10.29137/umagd.1281639
Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2023
Araştırma Makalesi / Research Article

An Experimental Study to Investigate Shear Performance of Anchor Bolt to Strengthen an RC Frame Against Lateral Load

Fulya Kale[1*], Orhan Doğan[2]

[1]*Department of Civil Engineering, Kirikkale University, Kirikkale 71450, TURKIYE*

[2]*Department of Civil Engineering, Kirikkale University, Kirikkale 71450, TURKIYE*

***Başvuru/Received**: 12/04/2023* ***Kabul/Accepted**: 12/06/2023* ***Çevrimiçi Basım/Published Online:** 30/06/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2023*

Abstract

The use of structural steel profiles as an external shear bracing is one of the most preferable simple, time saving and cost-efficient strengthening method for an inadequate existing reinforced concrete (RC) structure against earthquake lateral loads in comparison to the other interrupting, irritating and destructive traditional in plane strengthening methods which need evacuation of houses. With the use of this method, inhabitants of building can continue their daily life as usual during the strengthening site work.

With this experimental study it is aimed to determine the shear performance of anchor bolts used to connect the steel lama to an RC single span frame depending on embedment depth. For this purpose, a special steel construction loading system has been designed and constructed and six RC column-beam frames are prepared and five of them were strengthened using steel lama connected to the frame with different numbers of anchors in different depths. And also an equation was found related with the shear performance of steel anchor bolts depending on the anchor embedment depth.

Key Words
"RC Beam-Column Frame, Strengthening of RC Structures with Steel Bracings, Strengthening Against Earthquake, Steel Anchor Embedment Depth, Shear Performance of Steel Anchor Bolts

***Sorumlu Yazar:** hamidiyefulya@gmail.com*

1. Introduction

The majority of horizontal loads should be compensated by means of inelastic behavior of the system elements to prevent existing buildings from uncover able damage or totally collapse. Resistance of structural elements and systems with an over linear elastic deformations and with a large deflection under overloads is known as ductility. Ductile behavior is also described as energy absorber during cycling loading by over linear elastic displacements and deformations. Collapses of buildings during earthquakes are usually occurred due to inadequacy in ductility of structural members.

Before strengthening of existing building against earthquake, existing structural damages should be observed and evaluated. An improved seismic vulnerability index methodology is formulated on the basis of eight modeled parameters that are designed according to earthquake-resistant design concept and derived from the empirical vulnerability index that was initiated by the Group of National Defense against earthquake, named as GNDT Level approach. The results of this study indicated that there is a good correlation between the analytical modeling approach and the observed fragility features during in-situ field investigations. To prove that the proposed methodology is accurate and reliable, the verification of the current methodology is performed through the experimental testing related to school building damages during Ranau Earthquake (Kassem et al., 2022).

As much as the strength and the energy absorption capacity of structural members are important, redistribution of applied loads by inelastic behavior of the system members are also very important (Chao et al., 2007). It is possible to provide an inelastic RC building system by adding strengthening steel elements and connectors behaving ductile.

Various traditional methods have been developed for strengthening of RC structures against earthquake. One of these methods is to strengthen existing RC structures with steel bracings. All the other methods are destructive except external strengthening method by using steel bracing (Kawamata and Ohnuma, 1981; Youssef et al., 2007; Yılmaz et al., 2018; Ahmad and Masoudi, 2020)

Structures having weak and soft storey can be preliminarily strengthened by using steel diagonal braces. Also for strengthening of same structures linear viscous dampers can be used. Viscous dampers reduce both displacements and accelerations. While steel diagonal braces reduce the displacements, they increase the storey accelerations which cause increment in earthquake forces. Depending on their locations and quantities, steel diagonal braces also concentrate at storeys which have less stiffness compared to other storeys (Aydin et al., 2012).

The lateral load performance of the reinforced concrete frames can be increased by using different steel bracings such as X, Diagonal, Knee and Z. In the light of experimental studies, it has been observed that such strengthening with a stronger ductile connection than the steel bracings is effective in increasing the energy absorption capacity and shear force resistance of RC building (Sharma and Tiwary, 2020). However, if there is a weaker connection than the strengthening steel bracings, unexpected pre-failure will occur in RC structures and the steel bracings will not perform ductile, fully reflect its capacity and also overloads will not be transformed from the structure to the steel bracings. In this type of strengthening, the design of connectors is the key stage of design (Maheri and Sahebi, 1997).

During an in-plane strengthening of an existing building, the column and beam joints are supported with a steel plate covering to increase the shear performance and moment carrying capacity of the junction (Torabi and Maheri, 2017). However, the strengthening of a building by using in-plane reinforcement method will cause an increment in expenses and weight of building and waste of time because of additional reinforced shear wall sand also will force to move the residents due to the replacement of existing walls. It is possible to increase the capacity of the building by using external strengthening method to minimize the horizontal displacement of the relative floor displacement with the mechanisms created with additional steel frames and braces applied on the outer surface of the RC building (Korkmaz, 2007; Formisano et al., 2020).

Apart from the destructive strengthening methods mentioned above, usage of steel members in the external strengthening method, the steel members can easily be fixed on the outer surfaces of a building with a minimum damage and also there is no need to evacuate the building during the strengthening.

By strengthening of an RC building externally against earthquake by using structural steel members which is the scope of this experimental study, it is possible to delimit lateral displacements and to increase the rigidity of structural system as shown in Fig. 1. Beside all these mentioned benefits, this strengthening method can be described as practical, time saving and cost efficient.



Figure 1. Externally Strengthening of RC Building

In the strengthening design of an RC building with steel profiles, the most important key point is to provide a sustainable connection. Because of the failure in connection may result after an unnoticeable tiny displacement in comparison to the failure of a long strengthening steel profile. The anchor bolts and welds must be designed both more ductile and stronger than the steel strengthening profiles (maybe more than %20) to make the failure noticeable beforehand and to prevent brittle and sudden failure of the RC frame having weak stirrup and concrete compressive strength.

In this study six single span RC frames are designed to investigate both the contribution of the steel members in strengthening of an RC frames and the shear performance of anchorage at the beam-column junction area depending on depth of anchor bolt in a similar way of the study made by Yoldas (Yoldas, 2015).

2. Materials and Testing Methods

2.1. Preparation of Test Specimens, Testing Set Up and Instrumentation

2.1.1. Preparation of Test Specimens

By considering the common floor height of RC buildings as 2.50 meters, testing specimens have been designed in a 1:2 scale single span beam and column frames shown in Fig. 2. Totally 6 single span test specimens have been prepared. Testing frames are 1000x1000mm in clearance dimension. Beams and columns were prepared in a section of 125x250mm.

To represent structures needs built to be strengthening almost in total according to the 1975 Earthquake Code before 2000 in Turkey with inadequate concrete strength, the RC frames were built aiming as a concrete strength with 10 MPa, which was prepared in the laboratory.

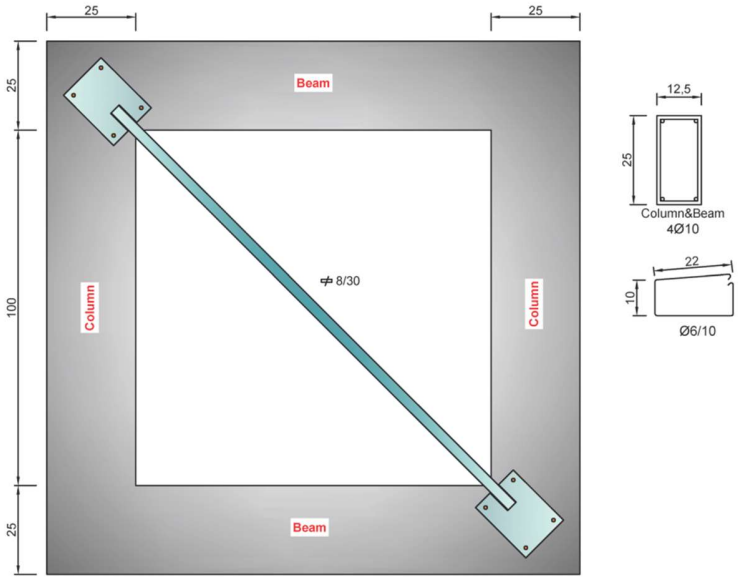


Figure 2.A Strengthened Single Span RC Frame with Steel Lama

Beams and columns were longitudinally reinforced with bars of 4Ø10 with a minimum reinforcement as indicated in Turkish Code TS-500 (TS-500, 2000) as shown in Fig.3. All specimens were prepared by using Ø6/10 stirrup bars without densification in order to represent current situation of reinforced concrete structures in Turkey.



Figure 3. Reinforcement and FormworkDetails of Beams and Columns of anRC Frame

Concrete with approximately C10 strength was aimed to represent existing buildings built before 2000 in Turkey with low-strength concrete in comparison to the individual Earthquake Code.

Five of the single span frames were strengthened using a steel lama 8x30 mm in section. 45° angled two bearing steel plates 10x150x200 mm in dimension and St-37 (σ_{em} = 220 MPa) quality were welded to the two ends of the steel lama as shown on Fig.2.

Contrary the design of the anchoring between the steel lamas and RC frames has to be at least 20% stronger than the steel lamas for strengthening, inhere it is aimed to investigate the shear performance of the anchors and to predict the prior shear failure in anchors, so the other strengthening parts such as lama and welding areas were designed stronger than anchorage.

The steel bearing plates have been fixed to the junction area of the RC frame using steel anchor bolts. To investigate shear performance of the steel anchor bolts depending on the depths of the anchors were chosen variable such as 100, 80, 60 and 40 mm. In the preparation of test frames, the depth and number of anchors were varied, however all other testing setups related with strengthening and RC frames were the same for all testing specimens.

Herein, anchor bolts in diameter of 10 mm were preferred because the thin bolts show more ductile and nonlinear behavior in comparison to the thick connectors (Dogan et al, 2021). In accordance with the thickness of t^*_{min}=1.0 cm steel plates and the diameter of anchor bolts, using the Eq.(1), four slots were drilled on the steel plates with the diameter of 12 mm (less than d) and on the junction area of the RC frame with the diameter of 14 mm.

$$d \leq \sqrt{5\ t^*_{min}} \text{-}0.2 \qquad (1)$$

And then each plate was fixed properly to the concrete using 2 or 4 numbers of anchor bolts as shown on Fig.4. Steel lamas were welded to the steel plates at corners of lamas considering maximum load to prevent failure in welding areas. Lamas were welded to the steel plates and weld thickness and size of weld was calculated as a=6 mm and L_k=60 mm considering plate thickness in accordance with (3mm<a=6mm<0.7tmin=7mm) and (10a<L_k=60mm<100a) rules due to avoiding from failure in welding areas.

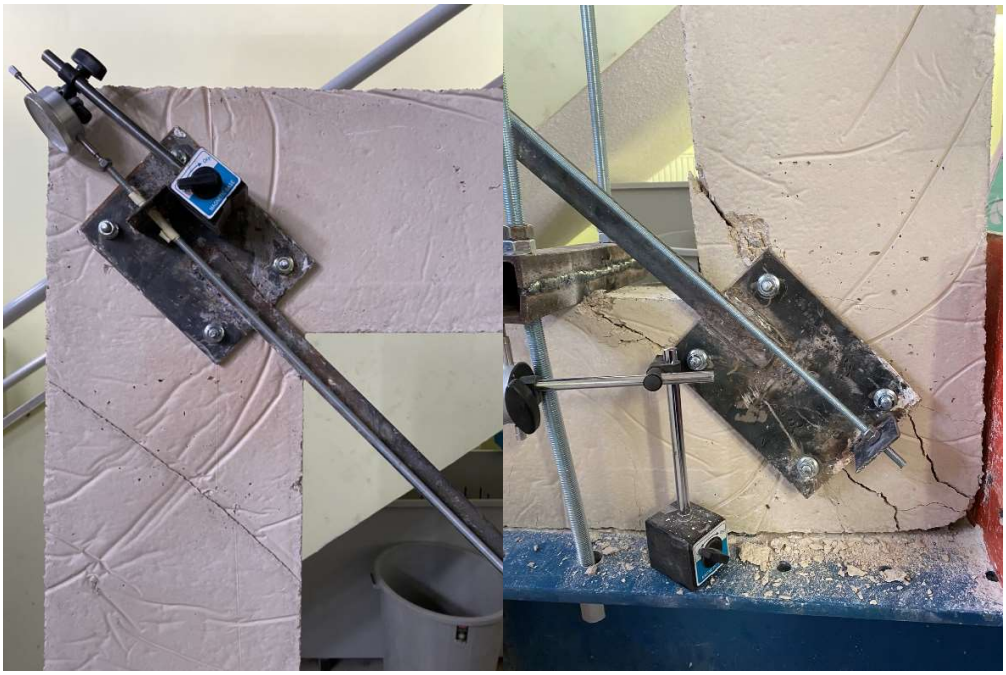


Figure 4. Fixing Steel Lama and Placement of Comparator on RC Frame using Anchor Bolts

Anchor numbers and depths of testing specimens are given in Table 1.

Table 1. Anchor Numbers and Depths of Specimens

Specimen No	Anchor Number & Depth (mm)
C1	-
C2	2*40 mm
C3	2*100mm
C4	4*80 mm
C5	4*100 mm
C6	4*60 mm

2.1.2. Testing Set-up

To test reinforced concrete frames, a special steel construction loading system has been designed and constructed. The loading system is composed of two numbers of vertical and horizontal I300 profiles and a diagonal I200 profile as a strut. Total length of steel construction loading system is 5100 mm and total height is 2060 mm. Horizontal steel I300 profile was anchored to the ground by means of M14x20 steel dowels. An additional upper plate having 15 mm thickness was welded on the horizontal I300 profile and Ø15 holes were drilled with the space of 100 mm. In order to fix the test specimens, two triangular form supporters of 200x300 mm were prepared and fixed on the additional plates.

An additional plate having 15 mm thickness was welded on the loading façade of the vertical I300 profile and Ø15 holes were drilled with the space of 100 mm. Another triangular support of 200x300 mm were designed and fixed on the additional plates of vertical I300 profile to put loading hydraulic jack. Hydraulic jack was placed over this support in order to apply lateral load to the RC frames specimen as shown in Fig.5.

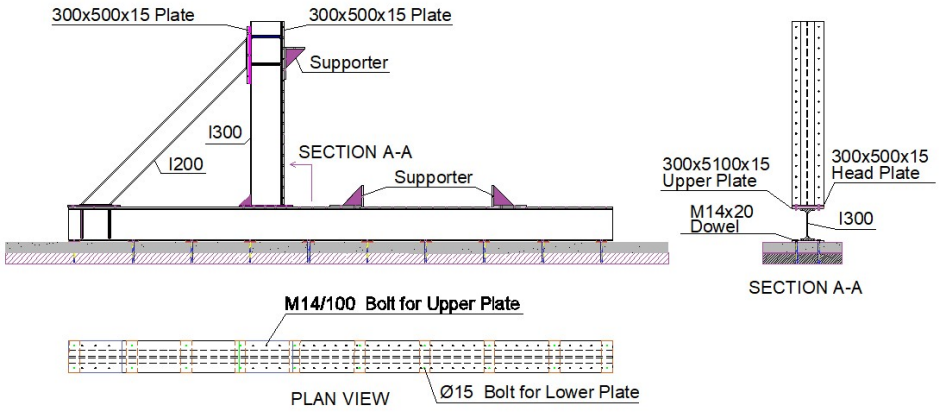


Figure 5. Details of Steel Construction Loading System

Steel construction loading system was designed to keep the specimens in horizontal testing position and to allow the displacement manometer (comparator) instrumentations. Vertical stability of specimens not to lift it up was assured to connect box profile to the loading system with two numbers of stem bars. Horizontal stability was assured by additional strengthened L250.150.10 profile mounted at the rear side-bottom of specimen as shown on Fig.6.

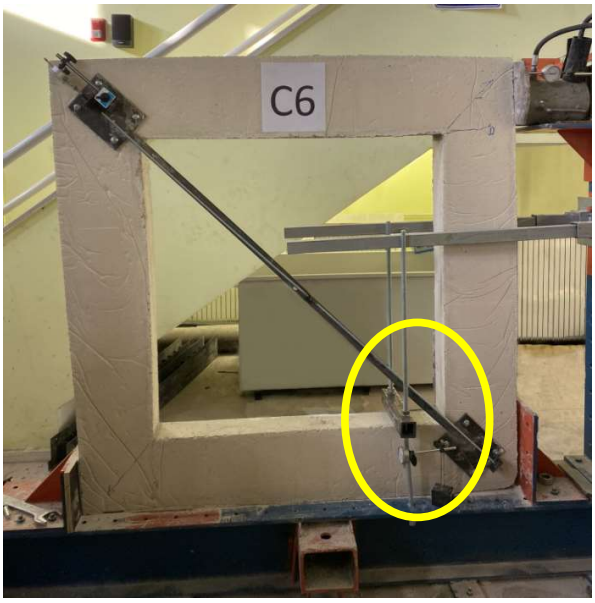


Figure 6. Details of Loading Setup Frame, Supporters and Tightening Bars

In order to create lateral load on specimens a hydraulic jack with 3000 kN capacity was placed over steel construction loading system. This test set-up was designed and manufactured in order to perform tests by an easily applicable way.

2.1.3. Instrumentation

In order to measure the displacements three longitudinal comparators were placed; the first LVDT-1 laterally at the top and the second LVDT-2 vertically at the bottom of the frame and the third one LVDT-3 fixed to another steel bar parallel along the steel lama in the direction of steel lama as shown in Fig.7. In here one and of the steel bar fixed to one end point plate and displacement was measured from the other end of the steel bar. The applied loads were measured using hydraulic dial gauge fixed on hydraulic pump unit. Absolute deformations ($\Sigma\delta$) of the frame were calculated taking the differences of horizontal (δ_1) and vertical (δ_2) displacements (lifting up) by using Eq.(2).

$$\Sigma\delta = \delta_1 - \delta_2 \quad (2)$$

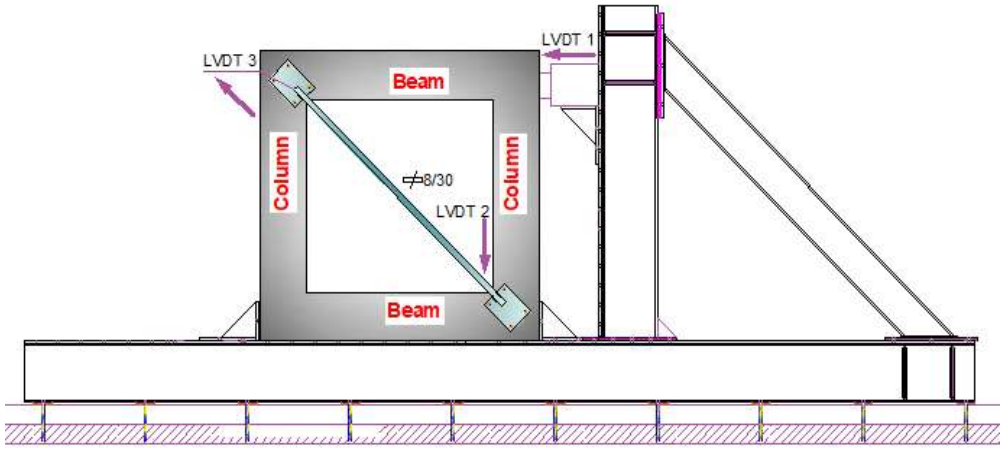


Figure 7. Positions and Directions of Comparators

2.2. Experimentation

By these tests it is aimed to investigate the performance of strengthened RC beam-column frames using steel lamas depending on the depth of steel anchor bolts. All these quasi-static tests were carried out manually using a hydraulic pump unit. Prior to tests hydraulic jack and comparators were calibrated properly. All these instrumentations were fixed properly to the specimens. The hydraulic jack was placed to apply the load laterally from the upper end of the frame.

The loading were carried out up to the maximum failure load of the anchor bolts to observe the failure types of the bolts which is the weakest chain of the strengthened frame. Maximum load carrying capacity and energy absorbing capacity of the frames before and after strengthening were determined depending on the depth of anchors.

3. Test Results and Evaluations

Cube samples were cured in the same condition with test specimens and tested in the meantime with experiments in order to determine concrete compressive strength. Average compressive strength of concrete cube compressive strength and cylindrical strength of concrete (f_{ck}) was calculated by multiplying cube strength with 0.85 and found as 9.98 MPa.

The C1 frame was tested without strengthening to observe the maximum load carrying capacity of an RC single span frame as a reference specimen. The quasi-static test of C1 was carried out until to failure of the specimen. While there were no cracks in any of the beams and columns, C1 failed with cracks in the beam-column junction areas due to the maximum bending moment at these areas as shown in Fig.8. Precursor cracks were observed in the left-top corner and right-bottom corner of beam-column junction area in the direction of outer side to inner side of the frame. In the meantime vice versa another cracks were observed in the left-bottom corner and right-top corner of beam-column junction area in the direction of inner side to outer side of the frame.

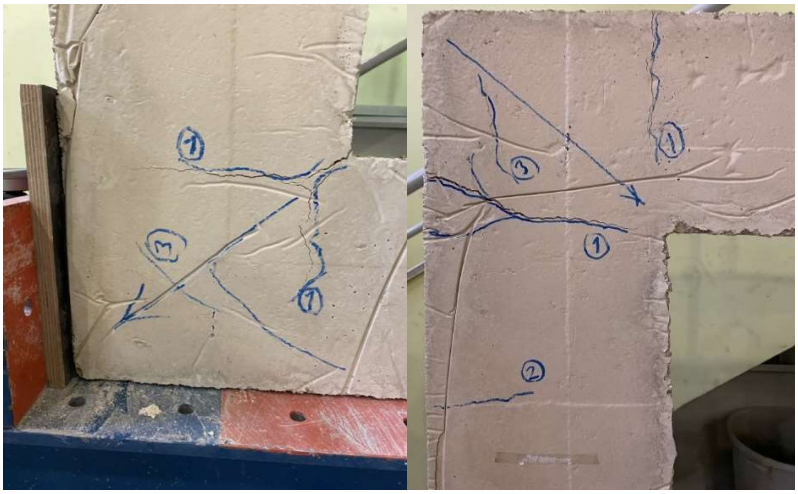


Figure 8. Failure of the Cracks at the Left Bottom Corner and the Left Top Corner of the Beam-Column Junction Area of Reference Specimen C1

With the use of steel lama in strengthening an RC frame, beam and column behaved such as a strut in compression and lama behaved such as a tie in tension of a lattice system. In another word, as a result of strengthening a frame with a lama, shear force and bending moment in beam and column were minimized and the RC frame system was partially converted to a lattice system. Just after the failure of anchor bolts, as it is expected, the failure in the junction area of beam and column the strengthened specimens were the same as non-strengthened specimens. Prior to the failure of anchor bolts the beams and columns were behaved like struts in compression so any shear or bending moment cracks were not observed in the beams and columns. Stirrups densification even if it is not applied as indicated in rules of building an RC beam or column has negligible effect on the failure type and load carrying capacity when it is strengthened.

As it is expected, prior shear failures were observed in anchor bolts as a weakest chain of the system instead of lama, welding areas and RC beams and columns. All the strengthened specimen tests were carried out until the failure of anchor bolts at a maximum shear load. Following the failure of anchor bolts, several cracks were observed at the junction areas of the beam and column. As it was expected after reaching the maximum load carrying capacity applied load declined because of the failure of anchors as shown in Fig.9. As expected, any failure was not observed both in steel lama and welding areas.



Figure 9. Failure of Strengthening Anchor Bolts at the Junction Area

It was observed that the strengthened specimens showed up to two times more load carrying capacity (P_{max}) and displacement (δ_1) in comparison to the reference specimen C1. It means that strengthened specimens showed more inelastic behavior than reference specimen C1 as shown in Fig. 10. After reaching maximum load capacity, the tests were continued out to investigate the inelastic behavior of anchors under shear force in the junction area of RC beam-column frame.

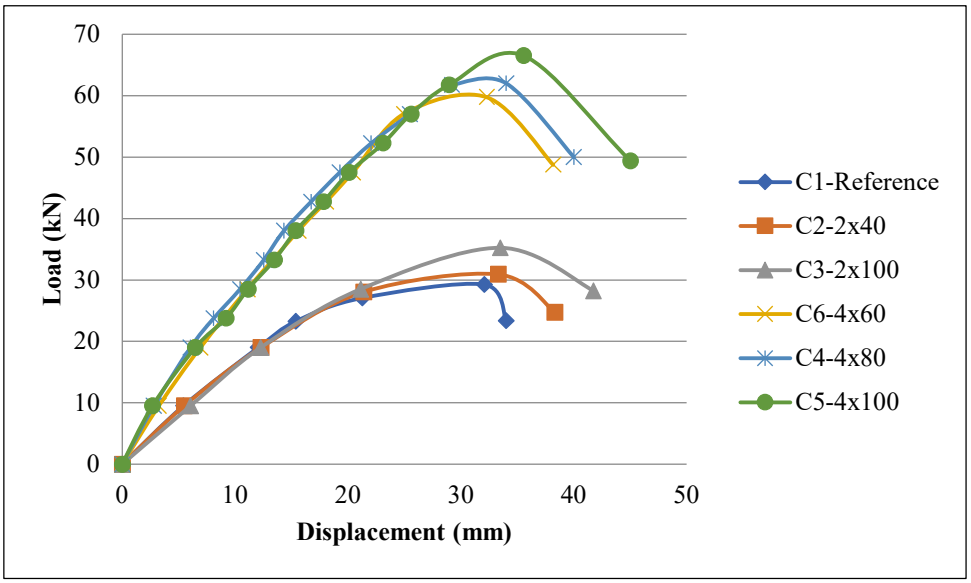


Figure 10.Load-Displacement Diagram under Quasi-Static Test of the Frames

Maximum load carrying capacity (P_{max}) was found as 29.25 kN for the non-reinforced reference specimen C1. While the specimen C5 was giving maximum load carrying capacity of 66.50 kN due to maximum anchor depth of 100 mm, the specimen C2 gave the lowest load carrying capacity of 30.90 kN due to minimum anchor depth of 40 mm. As a result, the load carrying capacity of the frames increased with the increment of anchor depth. Maximum load carrying capacity of frames are given in Table 2.

Table 2. Maximum Load Carrying Capacity of Frames

Specimen	P_{cr} (kN)	P_{max} (kN)	P_{cr}/P_{max}	δ_{cr} (mm)	δp_{max} (mm)	K	P_u (kN)	δ_u (mm)	$\mu_0=\delta_u/\delta_{cr}$	Critic A_{en} (kNmm)	Ultimate A_{en} (kNmm)
C1-Reference	23.40	29.25	0.80	15.42	32.08	1.5395	23.36	34.00	2.20	191.48	693.91
C2-2x40	24.72	30.90	0.80	16.80	33.30	1.5122	24.75	38.31	2.28	221.49	833.02
C3-2x100	28.20	35.25	0.80	19.90	33.48	1.4606	28.25	41.74	2.10	297.44	988.22
C6-4x60	56.76	59.75	0.95	24.84	32.30	2.3657	48.75	38.17	1.54	752.87	1506.65
C4-4x80	58.90	62.00	0.95	26.10	34.00	2.4158	50.00	40.00	1.53	866.74	1686.76
C5-4x100	63.18	66.50	0.95	30.60	35.55	2.2516	49.40	45.00	1.47	1104.97	1973.55

During the tests, applied loads to the frames and vertical, horizontal displacements of the frame and longitudinal elongation in lama were recorded using comparators and given in Table 3.

Table 3. Horizontal and Vertical Displacements of the Frames and Longitudinal Elongation in Lama

Specimen No	Max. Load P_{max} (kN)	Horizontal	Vertical	Real Horizontal Displacement of the Frame	Longitudinal Elongation in Lama
		δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	$\delta_H=\delta_1-\delta_2$ (mm)	δ_3 (mm)
C1 (Ref.)	29.25	32.23	0.15	32.08	-
C2	30.90	33.46	0.16	33.30	0.52
C3	35.25	33.66	0.18	33.48	0.73
C4	62.00	34.18	0.18	34.00	3.02
C5	66.50	35.74	0.19	35.55	3.25
C6	59.75	32.46	0.16	32.30	2.72

After load application to the frame, an increment in length of the lama was occurred due to tensile. Total longitudinal increment in length of steel lama (δ_3) was calculated. Tensile force of each steel strengthening lama (P_L) was calculated using Eq.(3) as given in Table 3.

$$P_L = \frac{\delta 3 * E * F_L}{L} \tag{3}$$

Herein, cross section area of steel lama is F_L=8x30 mm^2, length of lama between plates is L=1560 mm and modulus of elasticity is used as E=2.1x105 N/mm^2. Additionally, the maximum shear force (T_{1S}) in each bolt was calculated dividing the P_L in number of anchor bolts because each plate was connected to concrete with different numbers of anchor bolts as given in Table 4.

Table 4. Maximum Load Carrying Capacity Depending on the Anchor Depths

Specimen No	Anchor Depth, L_{ab} (mm)	Tensile Force P_L (kN)	Number of Anchors (n)	Max. Shear Force of an Anchor $T_{1S}=P_L/n$ (kN)
C1	-	-	-	-
C2	40	16.87	2	8.44
C3	100	23.66	2	11.83
C4	80	97.66	4	24.42
C5	100	104.84	4	26.21
C6	60	87.92	4	21.98

The shear force capacity of an anchor (T_{1S}) depending on anchor depth (L_{ab}) is shown in Fig. 11.

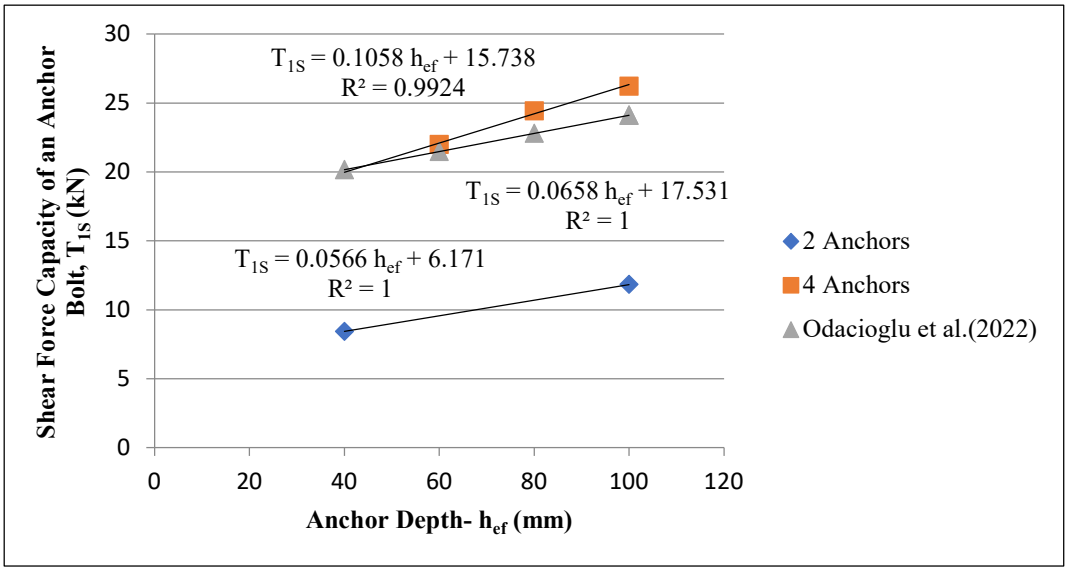


Figure 11. Shear Force Capacity of an Anchor Bolt Depending on Anchor Depth

For the three tests used four anchor bolts in diameter of 10 mm (Ø10) with concrete strength f_{ck}=9.98 MPa, the best fitted linear (with a regression value R^2 = 0.9924) for the values of T_{1S} between 60-100 mm depths of anchor bolts is given in Eq.(4).

$$T_{1S}= 0.1058 \times h_{ef} + 15.738 \quad (4)$$

For the two tests used two anchor bolts in diameter of 10 mm (Ø10) with concrete strength f_{ck}=9.98 MPa, the best fitted linear (with a regression value R^2 = 1.00) for the values of T_{1S} between 40 and 100 mm depths of anchor bolts is given in Eq.(5).

$$T_{1S}= 0.0566 \times h_{ef} + 6.171 \quad (5)$$

As indicated in the tests carried out by Odacioglu et al. (2022) used one anchor bolt in diameter of 10 mm (Ø10) with concrete strength f_{ck}=9.42 MPa, the linear equation for the values of T_{1S} between 70 and 110 mm depths of anchor bolts is given in Eq.(6)(Odacioglu et al, 2022)

$$T_{1S}= 0.0658 \times h_{ef} + 17.531 \quad (6)$$

According to the obtained equationsit was seen that the maximum shear force capacity of an anchor (T_{1S}), is increasing with the increase of embedment depth h_{ef}. Herein, the connection in the junctions areas of steel plate with four anchors gave higher performance as seen Eq.(4). However the connection in the junctions areas with two anchors gave much less performance asseen Eq.(5). Because, in the junction area, two of the four anchors was in tension zone of the beam-column junction area. The first group of two tests C2 and C3 gave much less performance than expected. That is why in the second group of three tests C4, C5 and C6 another two anchors were additionally embedded in compression zone of the beam-column junction area. The anchors used in the second group of tests where two of the specimens are in compressions and another two are in tension zone, gave quite reasonable performance in comparison to the results indicated in the tests carried out by Odacioglu et al. (2022) where there is no residual strain like tension or compression in the reinforced test specimens. According to the tests the anchors are embedded in reinforced concrete in compression gave much more performance in comparison stress the anchors embedded in reinforced concrete under tension stress or no stress. The anchors used in the second group of tests where two of the specimens are in compressions and another two are in tension zone, gave quite reasonable performance in comparison to the results indicated in the tests carried out by Odacioglu et al. (2022) where there is no tension or compression in the reinforced test specimens. As a result, the equation found by Odacioglu et al.

(2022) releated with the shear performance of anchors, is found quite preferable and reasonable as long as the anchors are embedded in a zone without tension stress of reinforced frame.

Shear capacity of an anchor connected to the conjunction area of the RC frame with concrete strength fck=9.98 MPa and anchor bolt in diameter of 10 mm (Ø10) and 100 mm in anchor depth was found 15.75 kN for four bolts and 11.83 for two bolts. However, the shear capacity of one anchor connected to RC cubic samples with concrete strength fck=9.42 MPa gave 24.11 kN found by Odacioglu which is quite higher than the shear capacity of the anchors connected to the conjunction area of an RC frame (Odacioglu et al, 2022). In here, an RC cubic samples was being forced with only shear, but the conjunction area of the RC frame was forced with both shear and bending moment which is causing cracks in the conjunction area.

4. Conclusions and Recommendations

With this study it is aimed to investigate the shear performance of anchor bolts used to connect the steel lama to an RC frame. For this purpose, six single span RC column-beam frames having concrete average strength (9.98 MPa) is prepared and five of them were strengthened using overdesigned steel lama with different anchor depths in 40-60-80-100 mm.

To investigate the shear performance of the anchor bolts used to connect a strengthening steel lama and an RC frame, 6 RC frames in total were tested and the following results were obtained:

- In comparison to the un-strengthened reference specimen, some of the strengthened frames with a tiny steel lama and 100 mm anchor showed up to two times more carrying capacity and displacement until to failure.
- As expected, damage did not occur along the beams and columns of the reference specimen. However, diagonal damages and cracks were observed due to the shear force and bending moment at intersection areas in the beams and columns.
- It is observed that, with the use of this type of loading setup and instrumentation, the determination of the contribution of strengthening steel profiles to an RC frame and the shear performance of an anchor bolt is found reasonable and efficacious.
- The use of this type of strengthening method by using diagonal steel profiles is found quite reasonable and preferable for an RC structure with insufficient stirrups because the diagonal steel profile in tension behaves like ties of lattice and reduces shear in beams and columns.
- In strengthening of an RC structure by using steel profiles, it is reasonable to fix the end points of steel profiles to the intersection area to minimize bending moment and shear force of the RC building members with insufficient concrete strength and insufficient stirrups.
- It was observed that the anchor bolts acted more ductile with longer anchor bolt. Ductile behavior of the bolts caused the transfer of overloads of some bolts to the other bolts. And also the load carrying capacity of the RC frame is increased with the increment of anchor depth.
- In strengthening RC frame with an inadequate concrete strength, a good correlation was found, between anchoring depth and shear force capacity of an anchor bolt between 40 and 100 mm depths with a regression value $R^2 = 0.9924$ for four anchors and $R^2 = 1.00$ for two anchors.
- The equation found by Odacioglu et al. (2022) related with the shear performance of anchors, is found quite preferable and reasonable as long as the anchors are embedded in a zone without tension stress of reinforced frame.
- Shear capacity of an anchor connected to the conjunction area of the RC frame damaged during the test was found quite less than the shear capacity 24.11 kN investigated by Odacioglu et al. (2022) using cubic samples effected by no other effect (Odacioglu et al, 2022). As a result, to get the maximum shear performance from anchors connected to concrete, connection area must not be affected by another shear or tensile force. It means that, the conjunction area of an RC frame is not suitable for the connection of steel bracings.

Consequently, this study showed that with the definition of shear performance of anchor bolts depending on anchor depth, the external strengthening against earthquake by using steel profiles will commonly be preferred because this type of strengthening is more reasonable (time saving, economic and undisturbed for the residents) for the existing RC buildings with/without sufficient stirrups which is commonly encountered in application.

It is recommended that, using this type or different type of loading setups, this study can be expanded;

- To investigate the performance of RC frame in filled with different types of wall with/without plaster coating,
- To investigate the shear performance of anchor bolts under the cycling loadings,
- To investigate the shear performance of anchor bolts with different concrete strength.

References

Ahmad, N., & Masoudi, M. (2020). Eccentric steel brace retrofit for seismic upgrading of deficient reinforced concrete frames, Bulletin of Earthquake Engineering,18, 2807-2841. doi: 10.1007/s10518-020-00808-0

Aydin, E., Ozturk B., & Duzel, E. (2012). Rehabilitation of Planar Building Structures using Steel Diagonal Braces and Dampers, 5th European Conference on Structural Control (EACS 2012), Genoa, Italy, June 2012, Paper No. # 024.

Chao, SH., Goel, SC., & Lee, SS. (2007). A seismic design lateral force distribution based on inelastic state of structures, Earthquake Spectra, 23(3), 547-569. doi: 10.1193/1.2753549

Dogan, O., Celik, F., Odacioglu, O.G., & Sevim, O. (2021). In situ determination of the mechanical performance of the steel rods anchored on an existing masonry building wall, Sādhanā, 46(4), 1–13.

Formisano, A., Massimilla, A., Di Lorenzo, G., & Landolfo, R. (2020). Seismic retrofit of gravity load designed RC buildings using external steel concentric bracing systems, Engineering Failure Analysis, 111, 104485. doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104485

Kassem, M., M., Nazri, F., M., Farsangi, E., N., & Ozturk, B. (2022). Improved Vulnerability Index Methodology to Quantify Seismic Risk and Loss Assessment in Reinforced Concrete Buildings, Journal of Earthquake Engineering, 26(12), 6172-6207. doi: 10.1080/13632469.2021.1911888.

Kawamata, S., & Ohnuma, M. (1981). Strengthening effect of eccentric steel braces to existing reinforced concrete frames, 7WCEE Conference, Proceedings of 2nd Seminar on Repair and Retrofit of Structures.

Korkmaz, K.A. (2007). Çelik çapraz elemanlarla güçlendirilen betonarme yapıların deprem davranışlarının incelenmesi, Doğuş Üniversitesi Dergisi, 8(2), 191-201.

Maheri, M.R., & Sahebi, A. (1997). Use of steel bracing in reinforced concrete frames, Engineering Structures, 19(12), 1018-1024, doi: 10.1016/S0141-0296(97)00041-2

Odacioglu, O.G., Dogan, O., & Kale, F. (2022). An experimental study to determine the optimum depth of steel anchors in RC subjected to shear force, Structures, 44, 1321-1327.

Sharma, S., & Tiwary, A.K. (2020). Analysis of a building under composite structural system: A review, Materials Today: Proceedings, 33, 1650-1659. doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.376

Torabi, A., & Maheri, M.R. (2017). Seismic repair and retrofit of RC beam–column joints using stiffened steel plates, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 41(1), 13-26.

TS500. (2000). Requirements for Design and Construction of Reinforced Concrete Structures, Turkish Standards Institution, Ankara, Turkiye.

Yılmaz, E.E., Uzun, M., & Çöğürcü, M.T. (2018). Betonarme çerçevelerin güçlendirilmesi ve deprem performasının iyileştirilmesi, Selçuk-Teknik Dergisi, 17(3), 100-111.

Yoldaş, F. (2015). An Experimental Study on Performance Analysis of Steel Anchorages For Reinforced Concrete Frames Strengthened With Steel Profiles, Master'sThesis, Department of Civil Engineering, Kirikkale University.

Youssef, M.A., Ghaffarzadeh, H., & Nehdi, M. (2007). Seismic performance of RC frames with concentric internal steel bracing, Engineering Structures, 29(7), 1561-1568. doi: 10.1016/j.engstruct.2006.08.027

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development
UMAGD, (2023) 15(2), 776-785.
10.29137/umagd.1310831
Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Temmuz/July 2023
Araştırma Makalesi / Research Article

Ultrasonic Therapy Device Using Fuzzy-Logic for Clinical Use

Fikret Yalçınkaya[1], Ata Sevinç [1], Hüseyin Aydilek [1],Ali Erbaş *[1]

[1]*Department of Electrical and Electronics Engineering, Kırıkkale University, 71450 Yahsihan, Kırıkkale, Turkiye*

***Başvuru/Received**: 06/06/2023* ***Kabul / Accepted**: 30/06/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 10/07/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 14/07/2023*

Abstract
In this paper, an ultrasonic therapy device using fuzzy logic (UTD-FL) has been designed, constructed, and tested with phantom materials. Fuzzy logic rules have been determined using four parameters. In clinical practice, ultrasonic therapy is conducted solely based on the subjective evaluation of medical experts, but in UTD-FL, fuzzy-logic rules automatically decide the three critically important characteristic parameters of applicable output power to the patient, namely the power of the signal, the percent of the duty-cycle and the signal frequency. The signal frequency and specifically its amplitude have a critical effect on the temperature rise of the tissue test point or surface. Therefore, the intensity of the ultrasonic frequency and the duration of treatment time are absolutely vital, that is why this instrument has been developed. This instrument is expected to prevent possible side effects, injuries, and potential damages to real tissues due to experts' uneasiness. The test results of this newly developed medical device have been compared with the available clinical instruments' results in clinical practice. The instrument produces optimum output power due to its fuzzy logic rules-based mode design and IR-temperature sensor-based feedback effect, whereas the clinical mode inputs only clinical experience base gained medical data.

Key Words
"Ultrasonic Therapy Device, Fuzzy Logic, Clinical Mode, Fuzzy Mode, IR Temperature Sensor, Phantom Materials"

***Responsible Author:** aerbas@kku.edu.tr*

1. Introduction

In medical practice, ultrasound has two broad application types, its diagnostic effect, and its treatment capacity. In its diagnostic effect, a low signal level is preferred so as not to cause any damage due to its propagation in human tissue. Human tissue is exposed to ultrasound accordingly and interactions occur, and hence diagnostic ultrasound distinguishes between various acoustic properties of human tissues. In case of ultrasonic treatment, the signal level is kept high based on the treatment targeted. For physical therapy applications, the preferred intensity level is about 2-10 W/cm^2, whereas, for ultrasound-based surgery, the intensity may be as high as 104 W/cm^2 (Yardimci and Celik 2005; Yasuil et al., 2005). Compared to the ultrasound diagnosis, therapeutic ultrasound is usually used at lower frequencies as it has low attenuation, and therefore, can penetrate into deep areas of human tissue.

Location is crucially important for the ultrasonic treatment of deep diseased tissues in vivo; therefore, focused ultrasound is needed for some types of tissues. The surrounding tissue must preferably not be affected at all, but the targeted tissue is deliberately exposed to highly intensified ultrasound leading to 70 °C (Yasuil et al., 2005).

The parameters of reversible and irreversible biological effects of ultrasound are mainly three; the signal intensity, its frequency and the biological tissue itself. Low-level acoustic intensity leads to a reversible effect but acoustic level exceeding the threshold limits causes irreversible effects. Important biological effects of ultrasounds are five based on tissue and applications, namely: Thermal, mechanical, acoustic streaming, cavitation, and thixotropic effects.

1.1 Thermal effect

Biological tissues absorb sound and hence ultrasonic energy creates a temperature increase in tissues. The rise of temperature of the tissue depends on three main parameters: the acoustic intensity, its frequency, and its duration. In case of constant sound intensity, the temperature rise is proportional to the acoustic wave irradiation time. Initially, time and temperature increase are proportional, but when the temperature increases to a pre-set or threshold value, then its rate of rise needs to be reduced to some extent until the thermal balance had achieved.

1.2 Bioheat Transfer

Heat transfer in living tissue occurs in two different ways, partly by perfusion (due to blood flow) and partly by conduction (due to diffusion). Pennes formulated the well-known bioheat transfer equation (Pennes, 1948), which has a source and a sink term leading to a draft explanation of heat transfer from blood perfusion with the parameters given in Equation 1.

$$dT/_{dt} = k\nabla^2 T - \Delta T/_{\tau} + \dot{Q}/_{C_b} \tag{1}$$

The parameters of the Pennes equation are defined as follows:

$dT/_{dt}$	:	Rate of change of temperature increase at a point
k	:	Thermal diffusivity
T	:	Temperature
ΔT	:	Temperature increases above ambient
τ	:	Perfusion time constant
$\dot{Q}$	:	Metabolic heat production
C_b	:	Specific heat of blood

Although the Pennes equation is not perfect (Weinbaum *et al.*, 1984), due to its compatibility with analytical implementation, it is widely preferred and used for thermal model of living tissue. Due to the imperfect Pennes equation, new methods of tissue characterization have been investigated (Gambin *et al.*, 2016), one of which is based on backscattered echoes of heated breast and integrated with statistical analysis techniques. It has been demonstrated that an increase in breast temperature modifies three parameters of the samples: “the intensity, the spectrum of echo signals and the probability density functions” (Gambin *et al.*, 2016).

1.3 Tissue thermal conductivity

The main goal of therapeutic applications of ultrasound is proper and sufficient heating of targeted organs, tissues, or tumors, respectively. Two key factors must be considered in order to successfully produce the necessary temperature rise: the tissue's thermal properties and the beam's acoustic properties. The test medium thermal properties for therapeutic practice, for local tissue heating, are mainly thermal conductivity dependent. A local temperature rise above physiological limits damages the cell protein structure. Very rapid (less than 3 seconds) and high (above 56 °C) local heating of tissues instantaneously kills the cells (Kujawska *et al.* 2014). Four key testing parameters, namely "the frequency, intensity, pulse duration, duty-cycle, and exposure time of generated tone bursts," must be regulated in order to observe the applications' limits. For hyperthermia applications, a typical ultrasonic beam has been used with the limits: “the intensity (low-0.12 W/cm^2), the duty-factor (average-about 0.2%), exposure time (long-up to an hour) and a beam width (between 10% and 20% of the transducer diameter)”.

1.4 Mechanical effect

Ultrasound obeys to the propagation principles of elastic waves. It can be defined via mechanical parameters such as sound pressure, particle displacement, velocity and/or acceleration. In case of low sound intensity, the sound intensity is proportional to the amplitude of displacement by the square root law. If it is high enough, the mechanical vibration might become beyond the

controllable limit for such a medium, leading to a damaged, fractured or crushed tissue. This effect is special and named as the mechanical effect of ultrasound with brilliant products such as ultrasonic operation knife and ultrasonic lithotripsy. Ultrasound has a variety of different uses as well, such as nerve healing, healing of muscle injuries, micro-massaging for getting an increase in localized blood circulation, and brain therapy. Having deep penetration ability into tissues and delivering energy to the parts under therapy is another superiority of ultrasounds for medical practice (1 MHz). It decreases the healing time and strengthens the bruised, fractured, and/or damaged parts after injury. If low frequencies are used, then less thermal energy is obtained in the tissues, especially around the bones. Therefore, the power of the ultrasound signal is important in therapy practice and its effect depends on the type of injuries. Then, ultrasonic therapies need a healthcare specialist to decide the power requirements (Mohammed et al., 2010). As a result, the healthcare specialist's decision depends on personal experience and it is subjective; that requirement leads to automated decision-making systems, such as the device developed: Fuzzy-logic based ultrasonic therapy device (FL-UTD).

1.5 Different applications of ultrasounds: Thermal Effect, bioheat transfer, tissue thermal conductivity and mechanical effect

Using ultrasound as a therapeutic tool, especially in physiotherapy and rehabilitation, is a rising field worldwide. The wider ultrasonic range usable for medical therapy is from 1 MHz up to 1000 MHz. However, 1 MHz and 3 MHz frequencies are preferably used in ultrasound-based medical instruments. But the frequency range preferred for rehabilitation is a bit narrow band, from 0.8 MHz to 3 MHz. Because the increase in tissue temperature has a direct effect on the human body's metabolic rate, 1 ºC increase changes the metabolic rate by 13%. A moderate heating range of 2-3 ºC has been recommended (Yardimci and Celik, 2005). A 200-microseconds burst of 1.5 MHz sine wave repeating at 1.0 kHz has been applied to the treated limb. The incident intensity has approximately been recorded as 30 mW per cm^2. Experimental findings clearly show that "biomechanical healing" is accelerated using ultrasound by a factor of nearly 1.7 (Pilla *et al.* 1990). It has mainly been accepted that ultrasonic treatment time must depend on the size of the tissue. Lehmann suggests that the maximum treatment time must be restricted to 15 minutes for a treated maximum area between [75 - 100] square centimeters (Yardimci and Celik, 2005). A fuzzy logic-based control system has been developed in order to obtain the optimum treatment time during ultrasound therapy applications (UT) (Yardimci and Celik, 2005).

As a biophysical safe energy form used in the treatment of fracture-repair processes, low-intensity ultrasound (LIUS) accelerates and enhances not only the healing of fresh fractures but also callus formation in delayed unions and non-unions (Yasuil *et al.* 2005).

An embedded system using ultrasound has been designed and realized for achieving the most suitable treatment conditions for physiotherapy patients based on the five parameters (Isik and Arslan 2011): Age of the patient, the coordinates of the tissue, the thickness of the tissue, the surface area of the treated region and the fat rate in the tissue (Isik and Arslan, 2011).

The quantitative effect of therapeutic ultrasound has also been studied, as it contributes to the formation of new blood vessels of adult rats. The frequency used is either 0.75 MHz or 3 MHz, the exposure time to ultrasound is 5 minutes on a daily basis, and its intensity is 0.1 W per cm^2. It had been demonstrated that the repair process is considerably high in ultrasound-treated wounds; the blood vessels have been returned to normal conditions due to the ultrasonic treatment applied (Young and Dyson, 1990).

The stimulation of bone repair, and fibular fractures by using ultrasound had been reported using rats groups. The delivered ultrasound has an intensity of 0.5 W per square centimeter. The pulse duration applied is 2 ms ON and 8 ms OFF for 5 minutes time for 4 consecutive days. The frequency range applicable is 1.5 MHz and 3.0 MHz. The effectivity of treatment with ultrasound has been compared with micro-radio-graphical and histological methods (Dyson and Brookes, 1983).

Three groups of rats were used in experimental testing to determine the optimum dose; however, it was found that the right dose varies on a variety of factors, making it difficult and unnecessary to recommend a single dose that is successful in all types of applications. As each application has its own characteristics and application procedures (Emsen, 2007)

A major use of the low megahertz ultrasound frequency range is its treatment capability to treat tumors. The tumors must be heated to temperatures between 42 and 45 degrees Celsius in order to cause cellular damage (Quan et al., 1989).

An ultrasound-based thermal conductivity measurement of tissues ex vivo has been experimentally carried out on a phantom material in vitro to determine and measure the time dependency of temperature-rise, T(t), in the phantom material. After the application of 1 MHz ultrasonic pulse inside the phantom material, its temperature-rise has been recorded from thermocouples readings. For comparison of the temperature readings, Pennes bio-heat transfer equation has been used and solved via finite element methods. In vitro, temperature rise of the phantom material has been verified by the correlation of the experimental results with the numerical simulation results (Erbas, 2012; Kujawska *et al.,* 2014)

Ultrasound is a method that can be used as a heat-promoting thermal source. But the skinfold thickness effect and skin temperature upon ultrasound heating have not yet been investigated extensively. To measure the change in skin temperature upon ultrasound heating remains to be investigated and measured. This was achieved by doing an ultrasonic treatment test at 1.0 W/cm2 and 3 MHz frequency up until the absolute temperature reached 3° above the baseline-reference temperature. Then the recorded data were analyzed with two methods: ordinary least squares regression-hierarchical linear modeling (HLM) and mixed methods repeated measures (MMRM) techniques. Based on the proper data analysis, the HLM method was concluded to be a better fit for the analysis (Miller, 2011).

2. Methods

2.1 Full block diagram of the fuzzy logic-based ultrasonic therapy device

The fuzzy logic algorithm works on IPC. IPC is a PC made of high-tech components and designed for industrial applications. The touch panel is a high-tech LCD monitor commonly used as an input-output interface unit in industrial applications. The Microcontroller board controls the signal board and communicates with IPC. IR temperature sensor module reads surface temperature and in case of temperature overflow higher than 2 ºC, it cuts the power connection of the therapy device completely. A full overall block diagram of the fuzzy logic-based ultrasonic therapy device H/W is given in Figure 1.

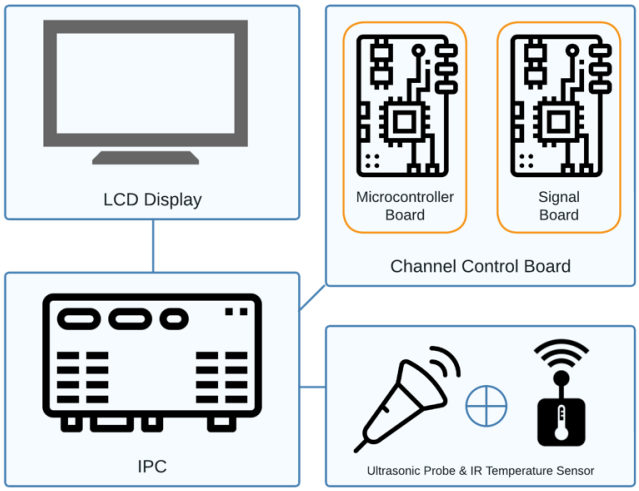


Figure 1. A Complete block diagram of the fuzzy logic based ultrasonic therapy device H/W

2.2 Component based hardware design of the fuzzy logic ultrasonic therapy device

The designed ultrasonic therapy device is made of two modules: An industrial PC (IPC) based main control module, which uses Windows XP as an embedded operating system and a channel control board. The channel control board has three sub-modules: a microcontroller-based control board, a duty module consisting of oscillators and logic gates to produce ultrasonic signals, and an IR temperature sensor board. The detailed hardware of FL-UTD is given in Figure 2 below.

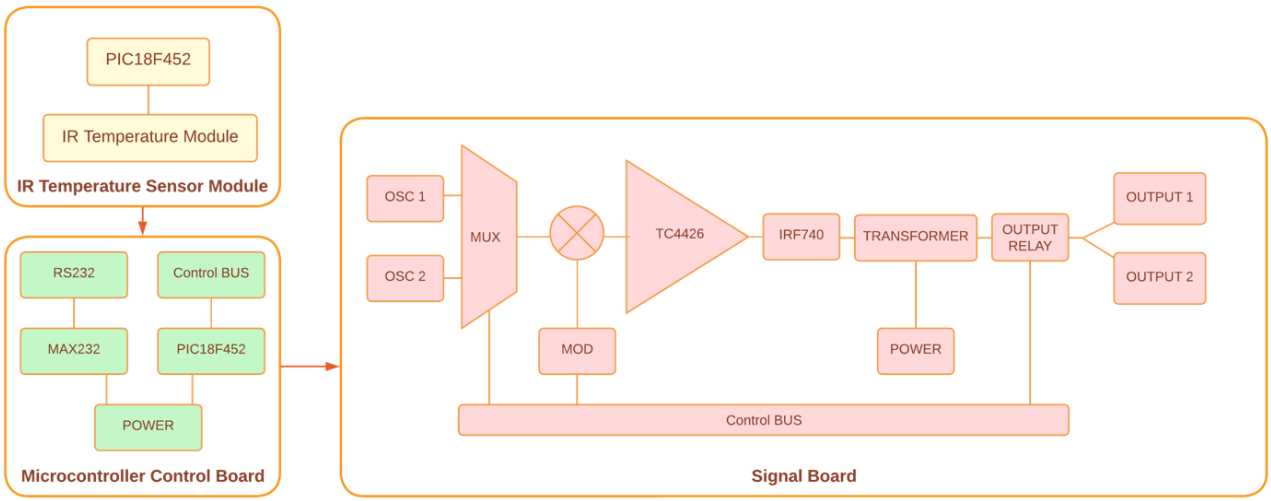


Figure 2. The Detailed Block Diagram of H/W Structure of the Ultrasonic Therapy Device

Microcontroller board communicates with IPC withRS232 interface. It also controls the multiplexer circuit, modulator circuit and output relay on the signal board. MAX232 IC is an RS232 to TTL signal converter. And it has its own power circuit with LM7805 linear regulator to supply regulated 5V DC.

The signal board has two different frequency NAND Gate-based oscillators producing/outputting frequencies of 1MHz and 3MHz, respectively. PIC microcontroller in the microcontroller control board connects oscillators output to carrier signal line with multiplexer circuit and modulates a carrier signal with duty-cycle signal on modulator circuit. TC4426 is a MOSFET driver. It accepts modulated signals and controls IRF740 power MOSFET. A sequence of modulated square waves is given as input to IRF740 MOSFET, which switches 30 V DC source of the coupling power transformer to the ground. The output of the transformer is connected to output terminals with the output relay.

IR temperature sensor module has its own PIC18F452 microcontroller. Microcontroller reads surface temperature with an IR temperature sensor and calculates deep tissue temperature. If the temperature change is larger than 2 °C, the system automatically stops by the software program developed.

2.3 The contactless sensing mechanism for ultrasonic absorbed energy on tissue with IR temperature sensor

Precise measurement of temperature rise induced in tissues due to the ultrasound effect is very important for the treatment underway. The rise of the temperature depends on some crucial parameters of the test medium and measuring system togetherness and compatibility. The determining parameters are the acoustic properties of the beam used and the acoustic and thermal properties of tissues intended for heating. An instrument or system measuring local tissue heating level is highly appreciated as it saves life and integrity of the human body (Kujawska *et al.* 2014)

This paper contributes to the development of a novel system for UTDs by using a feedback control mechanism. The conventional UTDs do not have a feedback control method. Medical experts cannot see accepted ultrasonic waves in deep tissues. This may cause various damages with different degrees in the tissue. This paper provides a solution protecting the tissue from overheating due to US wave exposure. An IR temperature sensor can detect that by, for instance, reading skin temperature. The temperature of tissues targeted by US waves has been calculated by expert system. If the temperature change is less than 1 °C, the therapy will continue. If the temperature change is larger than 2 °C, the system automatically stops by the software program developed. The contactless sensing mechanism for ultrasonic absorbed energy on tissue with an IR temperature sensor is given in Figure 3.

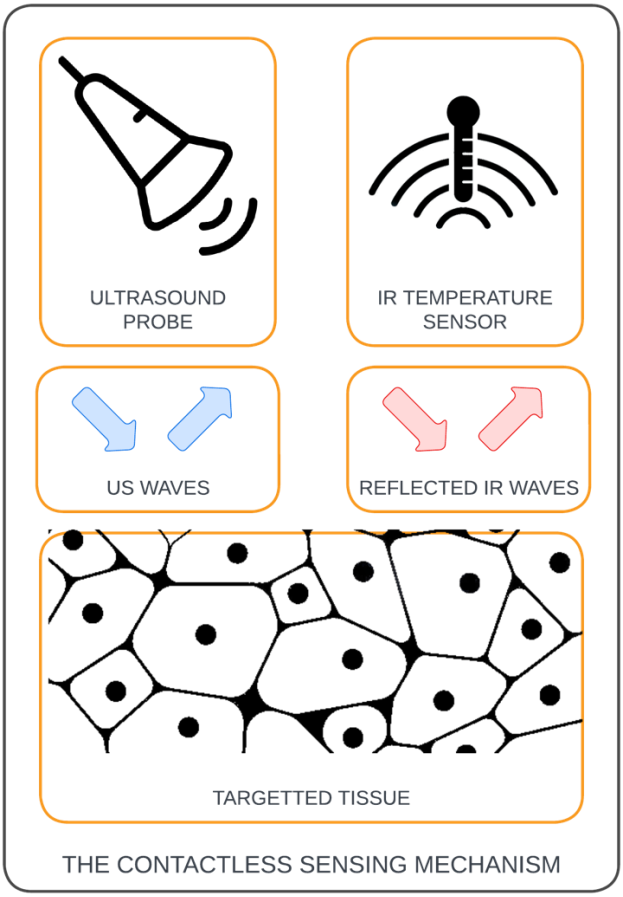


Figure 3. The contactless sensing for ultrasonic energy absorbed on tissue with IR temperature sensor.

2.4 Thermocouple temperature sensor shield design for phantom material test

Placing the temperature sensors in test mediums properly and correctly is crucial, and it is one of the main problems encountered in such applications. Thermocouple-based temperature sensors are widely used. However, conventional temperature sensors are flexible and defenseless to physical impacts and bending. This research produced a rigid and robust hybrid case for thermocouple temperature sensors. The developed sensor shield has a sharp ending for easy substitution in test mediums. Engrave a brass pipe with a 5.22 mm diameter to 60º abrupt ending and platted with chrome. Then K-type thermocouple has been installed in this pipe. The epoxy resin had been used to fill the gaps between thermocouple joints and pipes.

2.5 Fuzzy logic-based ultrasonic therapy device (FL-UTD) software design

Advanced membership functions and the FL-UTD screen are given in Figure 4 and Figure 5, respectively. Parameters used in ultrasonic therapy devices, such as power, frequency, and duty cycle, must be changeable based on the therapy type and the patient's requirements. This feature of interchangeability increases the efficiency of therapy. FL-UTD uses patient-specific treatment parameters based on discussions with expert physiotherapist and available literature survey. Therapy parameters decided are the patient's age, the number of therapy sessions, the tissue thickness of the patient, patient's weight, and height. The developed program use fuzzy logic rules to calculate the optimal range of therapy parameters for each patient individually by using defined input parameters.

Ultrasonic therapy device output frequency can be defined as 3 MHz for 0≤Tissue-Thickness<2 cm, and 1 MHz for 2 cm ≤ Tissue-thickness≤ 8 cm. Inputs and outputs-based membership functions are given in Table 1 below.

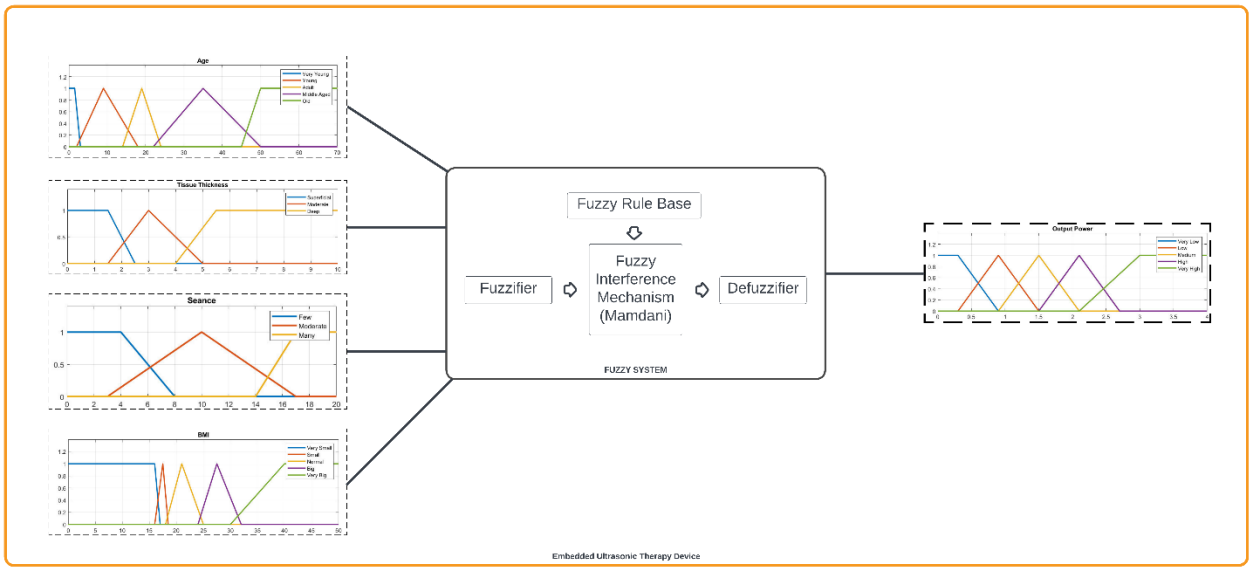


Figure 4. The Block Diagram of the Embedded Fuzzy Logic-Based Ultrasonic Therapy Device

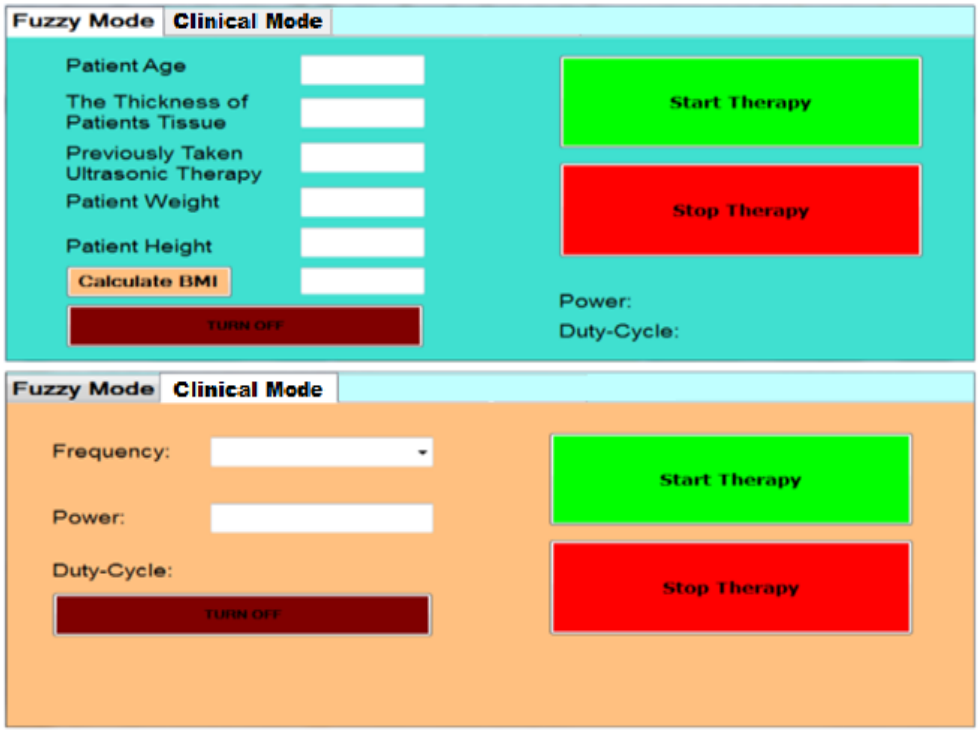


Figure 5. The Fuzzy and Clinical mode display of fuzzy logic-based ultrasonic therapy device

Membership functions of the fuzzy logic system have been generated. Obtained data shows that the power density of the generated ultrasonic waves must be in the range of [0-3] W per square centimeter. The output power of the ultrasonic waves has been calculated with these membership functions. Four input membership functions and one output membership function have been defined only; all input membership functions are given in Table 1(Erbas, 2012). Classifications between body mass index (BMI) and individual weight on adults' age have been used to develop and improve the patient's age group membership functions (Emsen, 2007). Age groups are defined as follows: 0-4 baby, 5-14 child, 15-29 young, 30-49 adult, 50-55 middle-aged, 55-65 pre-old, 65-85 old, and finally 85 and over is very old.

Table 1. Functions, variables, and boundaries of Fuzzy logic membership

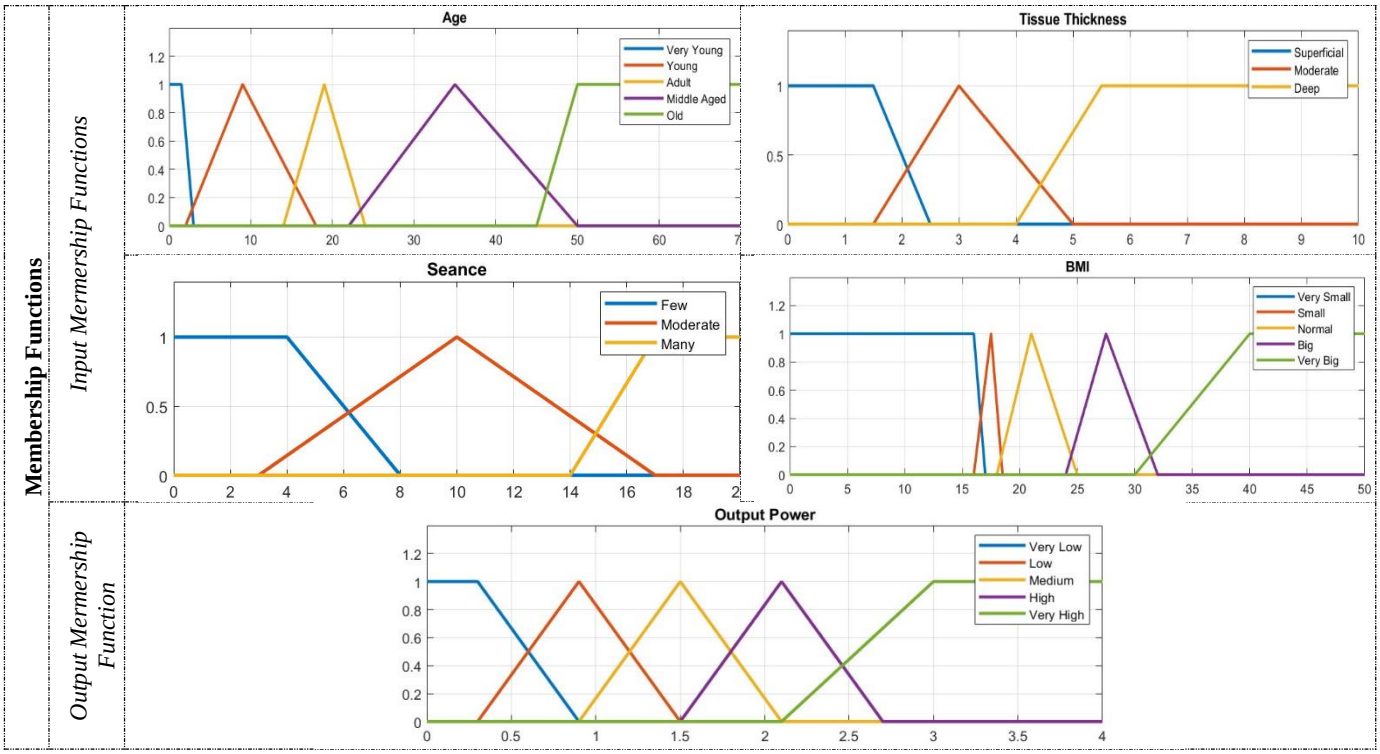


Table 2. The Clinical Mode test data of FL-UTD, temperature sensor and ACC of phantom materials

Subject	Patient's age	Séance	Tissue thickness (cm)	W (Kg)	H (m)	% Error	Physiotherapist Personal Suggestion-Clinical Practice (W/cm2)	P_{out}(W/cm^2)	Medium density	Time (minutes) 1st	2nd	3rd	4th	5th	ACC in 1st minute= [LD temp reading/ HD temp reading]	
	Patients' Parameters - Four Fuzzy Logic Inputs			BMI												
1	24	First	2.5	95	1.75	7.4	2.5	2.7	LD	0.5	1.0	1.6	2.4	3.2	0.83	The Readings of Therapy Device' Output power on phantom mediums temperature changes (°C)
									HD	0.6	1.3	1.9	2.6	3.4		
2	28	First	2.5	56	1.68	0	2.1	2.1	LD	0.3	0.5	0.9	1.6	2.0	0.75	
									HD	0.4	0.7	1.3	2.2	2.8		
3	53	First	2.5	85	1.72	-4	2.6	2.5	LD	0.4	0.7	1.4	1.7	2.2	0.66	
									HD	0.6	1.0	1.5	2.1	3.0		
4	34	First	2.5	63	1.74	0	2.0	2.0	LD	0.4	0.6	1.2	1.5	2.1	0.80	
									HD	0.5	0.9	1.5	1.9	2.8		
5	29	First	2.5	88	1.74	3.7	2.6	2.7	LD	0.4	1.0	1.6	2.4	3.2	0.66	
									HD	0.6	1.3	1.9	2.5	3.4		

The mostly used fuzzy interference methods are Mamdani and Tagaki-Sugeno-Kang methods. This paper preferred to use Mamdani fuzzy interference method. The main disadvantage of Tagaki-Sugeno-Kang fuzzy method is built on fuzzy rules. Thus,-adapting

this method and adjusting of parameters on accurate words is very complex. In contrast, Mamdani's fuzzy interference method rules are linguistic and easy.

Mamdani model has been used for calculating output power with an applicable fuzzy logic system. Mamdani's model is applicable in four steps. These steps define rule base, fuzzification, rule evaluation, the intersection of fuzzy membership crippled functions, and de-fuzzification. Developed membership functions, their variables and boundaries, and membership functions' graphics are given in Table 1.

2.6 Therapy Probe with IR Temperature Sensor Board Design

Conventional therapy device probe design is simple in therapy equipment. The probe has a single lead zirconate titanate ceramic transducer or multi-transducer array. The transducer element accepts electrical signals and produces US waves. The novel idea in this paper is a security mechanism for US therapy overheating effects. In this paper, we developed a protection method for overheating effects of US therapy. The sensing mechanism is based on an IR temperature sensor and microcontroller-based board. An IR temperature sensor reads surface temperature and calculates targeted tissue temperature. If the temperature change exceeds 2 °C, the IR temperature sensor board cuts off US waves to protect tissues. The developed probe transmits US waves and receives IR signals to calculate the temperature. The sensors' output data was calculated in the PIC18F452 microcontroller. The developed system has an integration capability of ordinary/conventional therapy device. The developed probe has a sensor holder, which is reshapeable for every US therapy probe. The control mechanism builds as an external device and is adopted in every US device. The control device switches and transmits the power on its power plug, and it cuts off the power in emergencies.



Figure 5. General View of Fuzzy Logic-Based Ultrasonic Therapy Device

2.7 Phantom material tests

Testing the ultrasonic device developed directly on tissues is safe by adequately investigating the probable side effects. Therefore, the instrument has been tested with phantom materials. Phantom mediums are developed at home for the sole purpose of experimental work used during the research of this paper (Erbas, 2012). Phantom materials are broadly two types: low-density (LD) and high-density (HD) phantom mediums. All tests have successfully been done; the data obtained from experimental tests are given on Table 2.

The carried-out tests have proved that the tested medium's density is affecting the ultrasonic waves' absorption ability. The absorption coefficient correlation (ACC) between the low-density medium and high-density medium of phantom materials developed is given in Table 2.

A thermocouple-based temperature sensor was inserted accordingly in the phantom medium about 2.5 cm deep, and an ultrasonic was gel added to the ultrasonic probe. Then the ultrasonic waves were applied to phantom materials (special medium), and the temperature changes were recorded.

It is experimentally observed that the temperature rise in a high-density medium is higher than in a low-density medium. Test data obtained with five subjects are given in Table 2 below. Patient-specific parameters have correctly been inputted into the therapy device as fuzzy rules suggested. As a result, the required power of the ultrasonic wave has been calculated by FL-UTD using the

fuzzy logic-based program developed. The output data from the fuzzy logic-based program was given in Table 2. In addition, patients' parameters from different age groups, the correlation between output power and physiotherapist' suggestion (Clinical Practice), and the percent error were given in Table 2.

3. Conclusions

In this paper, an embedded ultrasonic therapy device using fuzzy-logic rules has been designed and constructed by integrating an industrial PC (IPC) with a PIC18F452 microcontroller. The device has two main modules, a control module and a microcontroller-based duty module that can produce ultrasonic signals.

Defining correct physiotherapy parameters need experienced physiotherapists. In clinical practice, physiotherapists widely use medical therapy systems working mainly in binary logic (1 or 0), especially in developing and underdeveloped countries. Nevertheless, patients require optimum and correct parameters for treatment; therefore, fuzzy logic rules-based decision-making systems need to be used in medical instrumentation, as diseases cannot be diagnosed and treated using only binary logic-based instrumentation. Due to that reason, different levels of therapy parameters (such as output power) for various patients and conditions could be suggested by fuzzy logic algorithms developed. For example, in ultrasonic therapy, the parameters affecting the output power are many and as follows: age, number of treatments, tissue thickness, patient's weight and height, blood group, nutritional habit, geographic region, and patient's sex. This paper has only used four of the main parameters. The four variables are evaluated on fuzzy logic rules developed; the computerized system uses them based on the software developed. The medical instrument developed for this paper uses fuzzy-logic rules to decide the three primary parameters of the output signal (the power of signal, percent of duty-cycle, and the signal frequency). The software is written in C# programming language. The software enables inputting and saving therapy parameters, communicating with peripherals devices, and calculating therapy parameters with fuzzy logic. The comparison between the designed fuzzy logic-based ultrasonic therapy device and other therapy devices published in the literature is shown in Table 3.

The design and construction of a medical instrument using a feedback mechanism and a sensor, in this case, an IR temperature sensor-based feedback, was/is a must for medical instrumentation, as in clinical medical applications, there is no method of measurement of the temperature rise in the tissue when treatment is applied/conducted. That may lead to many injuries undetected and untold. For example, the ultrasonic intensity used for traditional ultrasonic physical therapy is about 2-10 W/cm^2. In contrast, for ultrasonic surgery, such as high-intensity focused ultrasound (HIFU), the ultrasonic intensity may reach as high as 104 W/cm^2. This requires accurate and sensitive control of the temperature rise in the tissue.

The medical instrument developed in the content of this paper has the following characteristics, as shown in Table 4 above. Those features are: The use of two frequencies (1 MHz and 3 MHz, preferably 1 MHz), two modes of operation (clinical mode-already available in clinics and fuzzy mode developed by this research for clinical use), the use of fuzzy logic rules based on four parameters (the age of patient, séance undertaken, tissue thickness, and body mass index), and most importantly IR temperature sensor based feedback mechanism, which helps safe treatment and no injuries due to over-dose conditions.

Developed instrument targets ultrasonic therapies as they usually require low frequency because low frequency has low attenuation in the medium and, therefore can penetrate the deeper area and cure diseases more underneath.

Table 3. The comparison of various generations available and FL-UTD developed

	1st Generation (Isik and Arslan 2011)	**2nd Generation (**Akdag *et al.* 2008)	**Commercial Product**	**3rd Generation (FL-UTD)**
Frequency Range	0.880 MHz	Not clearly given	1MHz & 3MHz	1 MHz & 3MHz
Expert Systems Developed	Clinical Mode	Fuzzy Logic Mode	Clinical Mode	Fuzzy Logic and Clinical Mode
Therapy Parameters/ Fuzzy Logic Inputs	-Invidual Decision	-Patient's age -Séance -Tissue thickness	-Invidual Decision	-Patient's age -Séance -Tissue thickness -Body mass index
Safety Consideration	-N/A	-N/A	-N/A	IR temperature sensor-feedback effect

References

Akdag C., Kocer S., Fidan U., Güler N.F. (2008) Ultrasonik Terapi Cihazı Tasarımı ve Geliştirilmesi, Journal of Polytechnic, Vol. 11: 2, 83-87.

Dyson M. & Brookes M. (1983). Stimulation of bone repair by ultrasound, Ultrasound Med Biol., 2: 61-66.

Emsen I.M. (2007). The effect of ultrasound on flap survival: An experimental study in rats, Burns, 33: 369–371.

Erbas A. (2012). The design and construction of an embedded ultrasonic therapy device using fuzzy-logic based patient specific therapy parameters, MSc. Thesis, Kirikkale University, Kirikkale, Turkey.

Gambin B., Byra M., Kruglenko E., Doubrovina O. And Nowicki A. (2016). Ultrasonic Measurement of Temperature Rise in Breast Cystand in Neighbouring Tissues as a Method of Tissue Differentiation, Archives Of Acoustics, Vol. 41: 4, 791–798.

Isik H. & Arslan S. (2011). The design of ultrasonic therapy device via fuzzy logic, Expert Systems with Applications, 38: 7342-7348.

Kujawska T., Secomski W., Kruglenko E., Krawczyk K. andNowicki A.(2014). Determination of Tissue Thermal Conductivity by Measuring and Modeling Temperature Rise Induced in Tissue by Pulsed Focused Ultrasound, PLoS One.

Miller M.G. (2011). Comparisons of Three Analytical Techniques for Measuring Absolute and Relative Temperature Changes During Ultrasound Treatment, Ph.D. Thesis, Western Michigan University.

Mohammed Y., Eslami P., Shaik M., Akula R., and Abdel-Motaleb I.M. (2010). Integrated Ultrasonic /Interferential Current System for Injured Bones, Muscles, and Nerve Therapy, 2010 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT).

Pennes H.H. (1948). Analysis of Tissue and Arterial Blood in the Resting Human Forearm, Journal of Applied Physiology, Vol. 1: 2, 5–34.

Pilla A.A., Mont M.A., Nasser P.R., Khan S.A., Figueiredo M., Kaufman J.J., Siffert R.S.(1990). Non-invasive low-intensity pulsed ultrasound accelerates bone healing in the rabbit, Journal of Orthopaedic Trauma, 4: 246-253.

Quan K.M., Shiran M., Watmough D.J. (1989). Applicators for generating ultrasound-induced hyperthermia in neoplastic tumours and for use in ultrasound physiotherapy, Phys Med Biology, 34: 1719-1731.

Weinbaum, S., Jiji, L.M., Lemons, D.E.(1984). Theory and experiment for the effect of vascular microstructure on surface tissue heat transfer-part I: anatomical foundation and model conceptualization. J. Biomech. Eng. 106: 321–330.

Yardimci A.& Celik O. (2005). Ultrasound intensity and treatment time fuzzy logic control system for low cost effective ultrasound therapy devices, Computational Intelligence, Theory and Applications Advances in Soft Computing, 33: 797-807.

Yasuil A., Haga Y., Chen J.J. (May 2005). Wada H, Focused ultrasonic device for sonodynamic therapy in the human body, 3rd IEEE/EMBS Special Topic Conference on Microtechnology in Medicine and Biology, Oahu, HI, USA, 154-157.

Young S.R.& Dyson M. (1990). The effect of therapeutic ultrasound on angiogenesis. Ultrasound Med Biol, 16: 261-269.

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

UMAGD, (2023) 15(2), 786-793.

10.29137/umagd.1286016

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Temmuz/July 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Farklı Açılarda Alümina Seramiğe Çarpan Mermi Hasarının İncelenmesi

Investigation of Bullet Damage to Alumina Ceramic at Different Angles

Alemdar Ongun [1], Ömer Resuloğlu [1]

[1]*Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 71451, Kırıkkale, Türkiye*

***Başvuru/Received**: 19/04/2023 **Kabul/Accepted**: 21/06/2023 **Çevrimiçi Basım/Published Online:**10/07/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 14/07/2023*

Öz

Yapılan bu çalışma, savunma sanayinde uygun maliyetiyle sıklıkla tercih edilen alümina seramiklerin, mermi çarpması sonrası hasar durumunu incelemek amacıyla yapılmıştır. Alümina seramikler sert (1600 HV) yapıları sebebiyle zırhların ön kısımlarında mermi darbesini ilk olarak karşılayan ve bu darbeyi mermi ucundaki sivri kısmı kırarak, direnç göstererek mermi uç kısmını geometrik olarak mantarlaştırarak, daha geniş bir alana yayması sağlamaktadır. Sayısal analizlerde 7,62x51 mm (M80) mermi olarak modellenerek, standartlarına uygun olarak 23,7 metrede ulaştığı hız olan 838 m/sn hız referans alınmıştır. Yapılan analizlerin sonuçlarında hem mermide hem de seramikte oluşan hasar durumları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler

"Alümina Seramik, Terminal Balistik, Mermi Hasarı, Çarpma Açısı"

Abstract

Alumina ceramics are often preferred in the defense industry at affordable costs. In this study, alumina ceramics were made to investigate the damage status after projectile impact. Alumina ceramics, known for their hard structure (1600 HV), first respond to the bullet impact on the front of the armors. After impacting, the ceramic breaks the piercing part of the bullet tip, showing resistance and geometrically mushrooms the bullet tip, allowing the effect to spread over a larger area. In numerical analysis, it was modeled as 7.62x51 mm (M80) bullet and 838 m/sec speed, which was reached in 23.7 meters in accordance with its standards, was taken as reference. As a result of the analyzes, the damage cases in both bullets and ceramics were examined and compared.

Key Words

"Alumina Ceramic, Terminal Ballistic, Bullet Damage, Impact Angle"

***Sorumlu Yazar:** alemdarongun@kku.edu.tr*

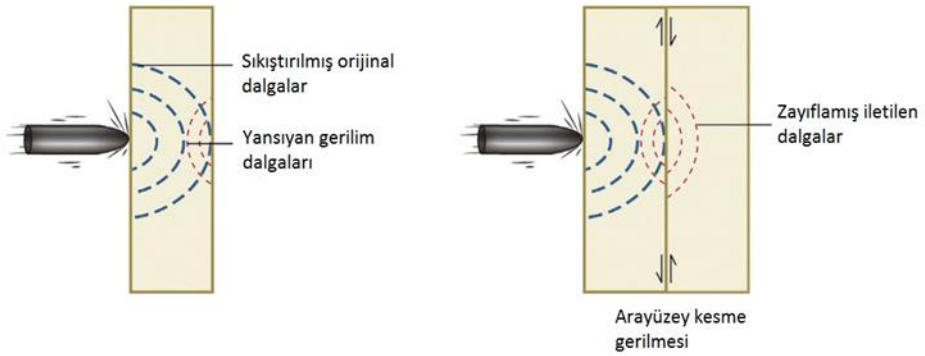
1- Giriş

Zırh olarak bilinen balistik hasarı önleme sistemleri , mühendislik anlamında ilkel çağlarda kalkanla başlayıp zamanla tehdidi önceden algılayarak, önleyebilen kompleks sistemlere dönüşmüştür. Saldırı sistemlerinin teknolojiyle gelişmesiyle beraber, tehditler sürekli gelişmekte ve değişmektedir, buna bağlı olarak savunma teknolojisinde zırh sistemleri devamlı olarak revise edilmekte, iyileştirilmektedir. Bu ihtiyaç doğal arz-talep dengesinden gelmektedir. Tam tersi olarak da savunma geliştikçe, bu savunmayı geçecek saldırı, tahrip mekanizmaları gelişmektedir. Bu doğal dengede zırh ve anti-zırh teknolojileri birlikte, devamlı olarak gelişmektedir. Sürekli gelişen bu sistemler için kullanılan deneyler genelde tahribatlı testler olduğundan dolayı, maali güç ve zaman gerektirmektedir. Bu maliyetli ve zaman alan tahribatlı testleri minimumda tutabilmek adına analitik ve sayısal çalışmalar önem kazanmaktadır.

“Balistique” Fransızca kökenli olup, mermilerin namlu içinde ve dışında hareketlerini ve hedef üzerindeki hasarlarını araştıran bir bilim dalıdır. Balistik atış bilimi olarak da adlandırılmaktadır. Balistik, mermi ve füzelerin hareketlerini analiz eder ve dört farklı kategoride incelenir.

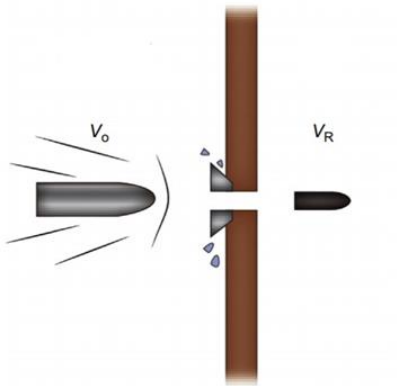
- İç Balistik: Mermi veya füzenin namluda veya uygulanan konumdaki hareketini araştırır. Bir bakıma mermiye uygulanan itme kuvvetini inceler. Mermi, namludan harekete başladığı zamandan, namlu çıkışına kadar olan süreci kapsar.(Army, 1965),
- Geçici Balistik: Ara balistik olarak da bilinen kategoridir (Encyclopædia Britannica, 2017), mermi silahtan çıktıktan sonra arka kısmındaki basınç dengelendiği noktaya kadar olan süreci irdeler. (Gable, Hurley ve Chojnicki, 2007),
- Dış Balistik: Uçuş sırasında mermi veya füzenin hareketini inceleyen kısımdır.
- Terminal Balistik: Merminin hedef üzerindeki etkilerini ve tepkilerini araştırır, analiz eder. (Zook, Frank ve Silsby, 1992).

"Terminal balistik", mermi ile merminin çarptığı bölge arasındaki deformasyonu araştıran balistik biliminin bir alt dalıdır. Terminal balistik, yapılar, tanklar, zırhlar vb. gibi çeşitli nesnelerde oluşan darbe etkilerini, kinetik enerji çevrimlerini, kimyasal enerji çevrimlerini ve patlayıcı etkileri inceleyen bir bilim dalıdır. Şekil 1'de gösterildiği gibi, mermi hedefe çarptığında parçacıklar arasında stres dalgaları oluşur. Bu oluşan dalgalar, elastik, plastik veya dalga şeklinde olabilir, seviyeleriyle ilgilidir.



Şekil 1. a) Stres Dalgalarının Oluşması **b)** Ara Yüzeyde Oluşan Makaslama Etkisi (Crouch, 2016)

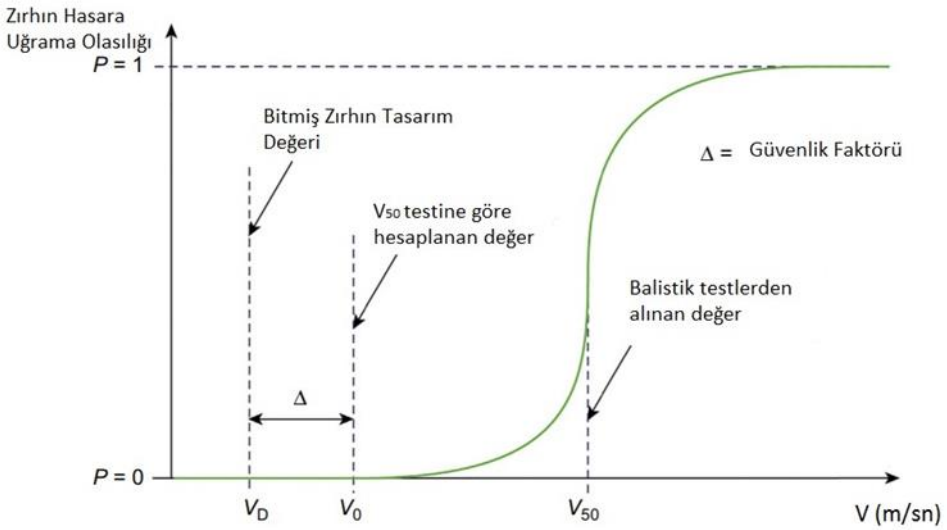
Mermilerin zırh üzerindeki etkilerini anlamak ve zırhın enerjiyi ne kadar absorbe edebildiğini, mermiye ne kadar hasar verdiğini ve merminin enerji dağılımını ne ölçüde gerçekleştirdiğini anlamak, balistik için araştırılması gereken bir konudur. Bu nedenle, mermilerin balistik zırh üzerinde yarattığı deformasyon mekanizmalarını 8 farklı kategoride değerlendirilebilir. Sünek malzeme delik oluşumu, tıkama şeklinde hasar oluşumu, delaminasyon, tabaka ayrılma, konik kırılma, parçalanma, radyal kırılma ve çevresel çatlaklar olarak inceleyebiliriz.



Şekil 2. Tek Plaka Basit Zırh Sistemi

Mühendislik açısından değerlendirdiğimizde, delinmeyen veya korunan bir malzeme sistemi tasarlamak için analizler ve testler kesinlikle gereklidir. Şekil 2'de gösterilen basit bir sistem, tek bir çelik tabakadan oluşur. Zırhın işlevini yerine getirebilmesi için

kabul gören dört özellik incelenir: çeliğin kalitesi, çeliğin kalınlığı, plakanın eğimi ve mermi hızı. Şekil 3'te mermi çarpma hızına bağlı olarak zırhın delinme olasılığını gösteren bir grafik bulunmaktadır. Grafikte önemli bir nokta olan V50, yapılan deneylerde zırhlarda %50 delinme oranının görüldüğü hızı ifade eder.



Şekil 3. Çarpma Hızına Bağlı, Delinme İhtimalinin Şematik Gösterimi

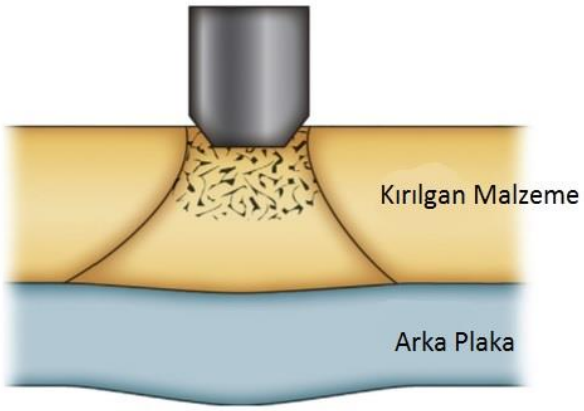
V0 çarpma hızında, yapılan deneyler ve analizler zırhta herhangi bir delinme gözlenmediği için güvenli bölge olarak kabul edilir. Bununla birlikte, mühendisler güvenliği garanti altına almak için VD hızını tehdit olarak kabul eder ve tasarımlarını bu hıza göre yapmak için güvenlik faktörünü (Δ) eklerler. P değeri, zırhın hasar almasını gösterir. Örneğin, P değeri 1 ise tamamen hasar anlamına gelir. Saha koşullarında mermi/füze açılı bir şekilde tahribe yol açabilir veya kullanılan balistik zırh mermiye karşı belirli bir açıda olabilir. Ancak, en kötü senaryoyu uygulamak, yani merminin dik bir şekilde zırha çarptığı durumu dikkate almak önemlidir. Ayrıca, malzeme kusurlarından kaynaklanan gri bölge adı verilen bir bölge mevcuttur, bu bölge hasarın meydana geldiği bölgeyi gösterir. Tek katmanlı yapılar, basit çelik katmanlı sistemlere kıyasla 5m/s'ye kadar küçük farklar oluşturabilirken, karmaşık katmanlı sistemlerde (kompozit yapılar) 50m/s hıza kadar olumsuz etkiler oluşabilir. Seramik yapıların mikro yapısında olan boşluklar/düzensilikler buna bir örnek olarak gösterilebilir. Literatürde metallerin davranışını inceleyen genel modelin Johnson-Cook modeli olduğu görülmüştür (Johnson ve Cook, 1985).

Seramik malzemeler, balistik zırhlarda önemli bir rol oynar ve balistik tehditlere karşı koruma sağlamak için temel bir malzeme olarak kullanılır. Seramiklerin balistik zırhlarda önemli olmasının başlıca sebepleri şunlardır: yüksek sertlik, çoklu mermi atışına dayanıklılık, termal ve korozyon direnci. Sertlik, seramiklerin en belirgin özelliğidir. Bor karbür, silisyum karbür ve alümina gibi seramik malzemeler, olağanüstü sertlik özelliklerine sahip malzemelerdir. Bu özellik, mermilerin keskin ve rijit yapısını etkisiz hale getirir ve zırhın etkin bir şekilde kullanılabilmesini sağlar. Seramik zırha çarpan mermi, yüksek sertlik özelliği sayesinde kinetik enerjiyi dağıtarak ve emerek delme derinliğini azaltır. Seramik malzemeler yüksek sertlik, hafif yapı, çoklu vuruş kabiliyeti ve termal-kimyasal tehditlere karşı direnç gibi özellikleri bir araya getirerek etkili balistik zırhların geliştirilmesinde kritik bileşenlerdir. Seramikler, balistik tehditlere karşı güvenilir koruma sağlarken, geleneksel zırhlara kıyasla hafif yapısıyla kullanıcının hareket kabiliyetini artırır ve kullanım kolaylığı sunar.

2- Seramik Malzeme Hasarı

Mermilerin balistik olarak verdiği hasar türlerinin anlaşılması balistik olarak inceleme yapmak adına hassas bir konuma sahiptir. Merminin kinetik enerjisinin ne kadarının absorbe edildiğini belirleyebilmek, mermiyi ne kadar tahribata uğrattığını tespit etmek bakımdan hayati öneme sahiptir. Bu nedenle mermilerin balistik plakalarda meydana getirdiği tahrip türleri genel olarak altı başlıkta irdelenebilir. Bunlar sünek malzeme delik oluşumu, tıkama şeklinde hasar oluşumu, tabaka ayrılma, konik kırılma, parçalanma ve çevresel çatlaklardır. Bu makalede incelenen seramikte deneylerde ve diğer makalelerde görülen parçalanma şeklinde hasar oluşmaktadır. Normalde ölçü olarak büyük seramiklerde ek olarak çevresel çatlaklarda tespit edilebilmektedir.

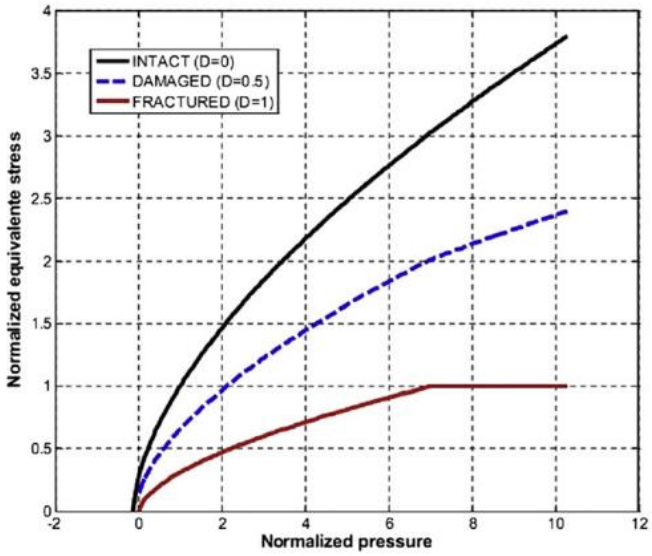
Parçalanma terimi; Katı malzemelerin ortalama parça boyutunu ezilme, kesilme, titreşim veya bu gibi proseslerle daha küçük tane boyutuna indirmek demektir. Terminal balistikte incelenen parçalanma; kırılgan malzemeler, cam, seramik ve konsantre aglomeralar da tespit edilmektedir. Şekil 4.'de incelendiği gibi, etkilenen bölge merminin ön kısmında bulunsada, parçalanma koni kırığı içinde kalmaktadır. Normalde uzun silindirik çubuğun hiper hızlarda malzemeye verdiği hasar olarak görülse de yüksek hızlarda küçük mermilerin verdiği hasar olarak da görülebilir. Şekil 2.5'te görülebileceği gibi, hasar mekanizmalarının araştırılması ve farklı balistik savunma sistemleri/modülleri üzerine çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Kocer, 2003 ve Carton vd., 2014).



Şekil 4. Kırılgan malzeme de sınırlı alanda meydana gelen ezilme (Crouch, 2016)

Seramik malzemelerin balistik koruma için etkili olabilmesi için belirli özelliklere sahip olmaları gerekmektedir. Bu özellikler arasında yüksek sertlik, kırılma direnci, elastisite modülü ve düşük yoğunluk bulunur. Balistik zırh uygulamaları için değişik seramik malzemeler kullanılmaktadır, ancak en yaygın olarak kullanılanlar içinde bor karbür (B4C), silisyum karbür (SiC) ve alüminadır. (Al_2O_3).

Johnson-Holmquist (JH) tarafından yapılan çalışmada, seramik malzemelerin inelastik deformasyonu ve kırılması üzerine kuramsal bir model olan Johnson-Holmquist (JH) modeli geliştirilmiştir. Bu modelde iki farklı gerilme değeri dikkate alınmıştır. Birincisi, hasarsız durumda ölçülen eşdeğer gerilme değeridir, diğeri ise hasar sonrası ölçülen eşdeğer gerilme değeridir. Lamberts ve arkadaşları (2007) tarafından JH-1 ve JH-2 olarak adlandırılan iki farklı model geliştirilmiştir. Şekil 5'te gösterilen JH-2 modeli, kuvvet kaynaklı gerilmeleri, uzama oranlarını ve deformasyondan sonraki kuvvet değerlerini içeren ek bilgileri içermektedir. Bu model, literatürde genellikle tercih edilen bir modeldir. (Tasdemirci ve Hall, 2007), (Wang ve Yang, 2008).



Şekil 5. Johnson-Holmquist 2 Modeli

3- Sayısal Çalışmalar

Seramik malzemeler için JH modeli, normalize eşdeğer gerilme 1 numaralı denklemle gösterilmiştir.

$$\sigma = \sigma_i^l - D\left(\sigma_i^l - \sigma_f^l\right) \quad (1)$$

σ_i ilk durumda meydana gelen gerilme, σ_f hasar durumunda oluşan gerilme, D ise hasar faktörü olarak verilmiştir ve 2 ve 3 numaralı denklemlerle gösterilmiştir.

$$\sigma_i^l = A(P^* + T^*)^N(1 + lne^*) \quad (2)$$

$$\sigma_f^l = B(P^*)^M(1 + Clne^*) \quad (3)$$

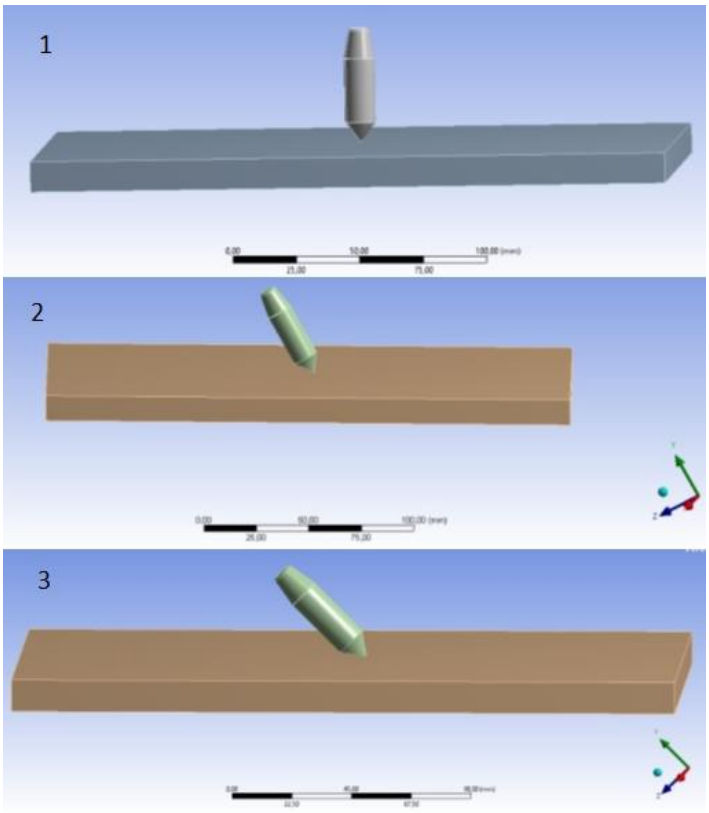
A, B, C, M, ve N sabit değerler olup, P* normalleştirilmiş basınç gerilmesini ve T* maksimum hidrostatik çekme gerilmesini temsil eder. e* ise boyutsuz deformasyon hızıdır. K1 hacim modülü, K2 ve K3 malzeme sabitleri ve c ise sıkışabilirlik faktörü olarak kabul edilir. Hidrostatik gerilme, basınç artışının eklenmesiyle elde edilir ve üç farklı durumunu araştırır. D=0 hasarsız olduğu durumu,

D=0.5 hasar aldığı durumu ve D=1 kırılma durumunu temsil eder. Normalleştirilmiş basınç aşağıdaki denklemle ifade edilir. Seramik malzeme modeli için; A sağlam dayanım sabiti, N sağlam dayanım üstel faktörü, HEL Hugoniot elastik limiti, B kırılma dayanım sabiti, M kırılma dayanım üstel faktörü ve C deformasyon oranı sabiti olarak alınmış değerler Çizelge 2.3'te verilmiştir.

$$P = K_1\dot{c} + K_2\dot{c}^2 + K_3\dot{c}^3 + \Delta P \quad (4)$$

Çizelge 2.1. Analizde kullanılan alümina seramikler için Johnson-Holmquist malzeme modeli için parametre değerleri (Westerling ve Lundberg)

A	N	HEL (MPa)	B	M	C
0,989	0,3755	5900	0,77	1	0

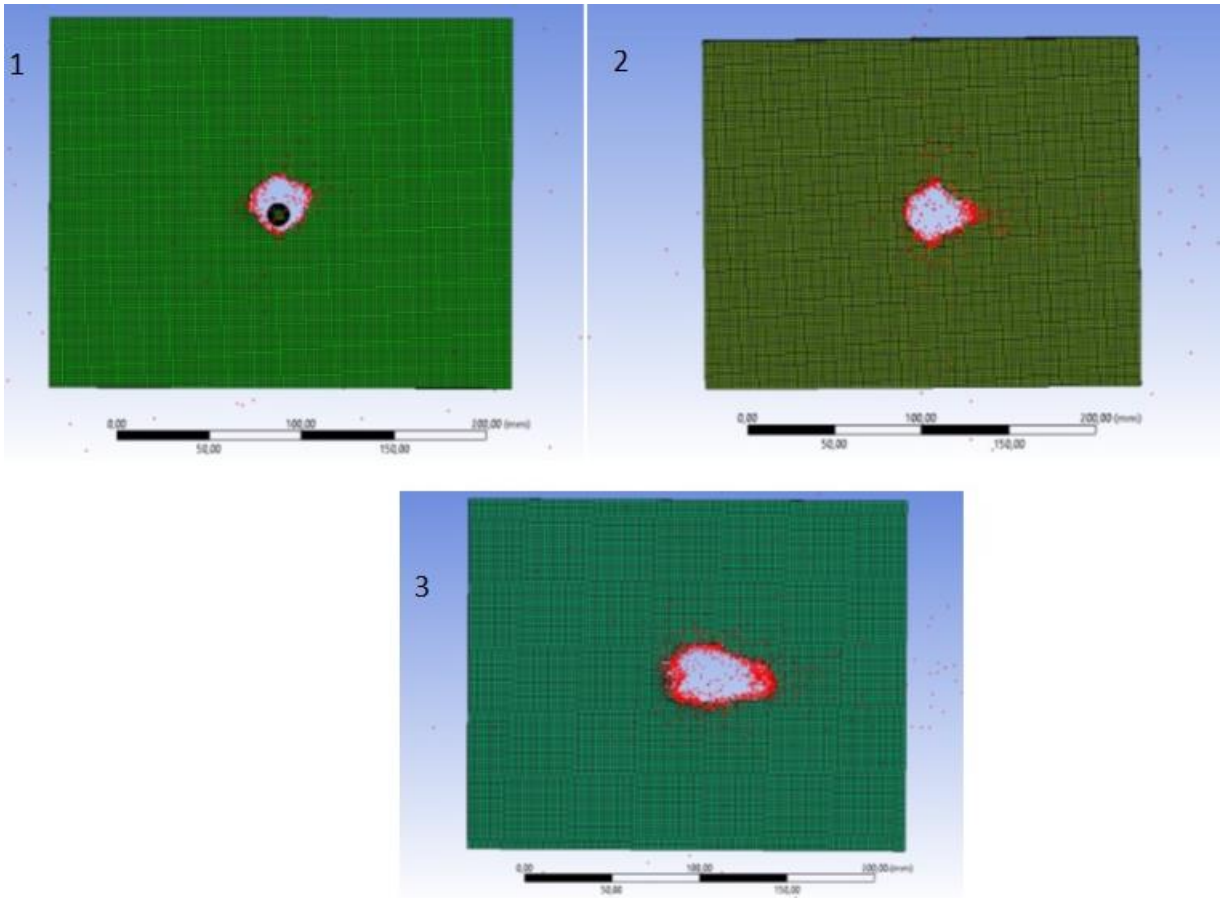


Şekil 6. Mermi Çarpma Açıları 1.90º, 2. 30º, 3. 45º

4- Çarpma Sonucu Seramikte Oluşan Hasar

Dikdörtgen şeklinde hazırlanan seramik plakalara farklı açılarda (30, 45 ve dik) ve 838 m/s hızda mermi etki ettirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, mermi tüm modellerde kırılmaya neden olmuş ve bu kırılma sonucunda mermide mantarlaşma gözlenmiştir.

45º açıyla çarpan mermi, diğer sonuçlara kıyasla yanal olarak daha fazla hasara sebep olmuştur. Bu yanal hasar sonucunda mantarlaşmanın sıyrılma şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Yani, mermi seramik yüzeye çarptıktan sonra yanal yönde bir sıyrılma hasarı oluşmuştur. Mermi dik olarak çarptığında ise, seramik üzerinde yuvarlak kesitli bir hasar oluşmuştur. Bu hasar, mermi açısı arttıkça daha geniş bir alanda etki yaparak hasarı artırmıştır. Yani, mermi açısı arttıkça seramik üzerindeki hasar alanı genişlemiştir. Bu veriler, farklı açılarda mermilerin seramik üzerindeki etkisini gösteren analiz sonuçlarını açıklamaktadır. Bu sonuçlar, mermi geometrisi ve açısının seramik üzerindeki hasar şekillerini ve hasar alanını etkilediğini göstermektedir.



Şekil 7. Mermi Çarpma Açılarına Bağlı Olarak Oluşan Deformasyonlar 1.90^{o}, 2. 30^{o}, 3. 45^{o}

Mermi açısı arttıkça, kinetik enerjinin seramik yüzeyine transferi değişir. Dik bir açıyla çarpan mermi, kinetik enerjisini daha yoğun bir şekilde bir noktaya odaklar ve bu da daha yüksek bir basınç ve hasar bölgesi oluşturur. Ancak açı arttıkça, kinetik enerji yayılır ve hasar alanı daha geniş bir alana yayılır. Bu daha geniş etki alanı, seramik üzerinde daha fazla hasara yol açar. Kesit alan hasarı dik olan seramikde yaklaşık olarak 71 mm^2, 30^0 olan mermide 97 mm^2, 45 olan mermide 145 mm^2 olarak tespit edilmiştir. Mermi açısı arttıkça, seramik malzeme üzerindeki gerilim dağılımı da değişir. Daha dik bir açıda çarpan mermi, seramik malzemenin içindeki gerilimi daha yoğunlaştırır ve kırılma mekanizmalarını tetikler. Seramik malzeme genellikle kırılgan olduğu için, bu kırılma mekanizmaları çatlakların oluşmasına ve malzemenin parçalanmasına yol açar. Bu da hasarın artmasına ve daha geniş bir alanda yayılmasına neden olur. Burada seramik boyutları büyük tutulduğu için bu hasarlar görülmemiştir.

5- Sonuçlar

Merminin seramik üzerinde bıraktığı hasar, çeşitli faktörlere bağlı olarak değişebilir. Bu faktörler arasında mermi hızı, kalınlığı, malzeme yapısı, açısı ve etkileşimin süresi gibi etkenler yer alır.

Mermi açısı arttıkça, seramik üzerindeki hasarın artmasının temel nedenleri enerji transferindeki değişim, daha uzun etki süresi ve farklı kırılma mekanizmalarıdır. Mermi açısının etkisi incelenmiş olup hasar alan bölgenin kesit alanları incelenmiştir. Bunun yanı sıra mermi çıkış hızlarındaki düşüş, çok katmanlı balistik savunma çözümlerinde önemlidir. Açılı gelen bir merminin seramiğe daha fazla hasar vermesinin dezavantajı, çok katmanlı tasarlanan plakalarda avantaj olarak sağlanabilir. Savunma araçları tasarlanırken açının ve katmanların önemi burada tekrar ön plana çıkmaktadır.

Referanslar

Army U., *Interior Ballistics of Guns. Engineering Design Handbook: Ballistics Series, United States Army Materiel Command*. 1965.

Candan C., "Kompozit zırh imalat parametrelerinin terminal balistik özellikler üzerine etkileri," Selçuk Üniversitesi, 2005.

Carton E. P., Weerheijm J., Ditzhuijzen C., and Tuinman I., "Fragment and particle size distribution of impacted ceramic tiles," in 28th International Symposium on Ballistics, Atlanta, Georgia, USA, 22-26 September 2014, 1254-1265, 2014.

Crouch I., The science of armour materials. Woodhead Publishing, 2016.

Holmquist T. J., Templeton D. W., and Bishnoi K. D., "Constitutive modeling of aluminum nitride for large strain, high-strain rate, and high-pressure applications," Int. J. Impact Eng., vol. 25, no. 3, pp. 211–231, 2001.

Johnson G. R. and Cook W. H., "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures," Eng. Fract. Mech., vol. 21, no. 1, pp. 31–48, 1985.

Kocer C., "Using the Hertzian fracture system to measure crack growth data: A review," Int. J. Fract., vol. 121, no. 3–4, pp. 111–132, 2003.

Lamberts A., Geers M. G. D., Dommelen J. A. W., Lange H. C., Huizinga A., and BV P. D. E. A., "Numerical simulation of ballistic impacts on ceramic material," Eindhoven Univ. Technol., 2007.

Tasdemirci A. and Hall I. W., "Numerical and experimental studies of damage generation in multi-layer composite materials at high strain rates," Int. J. Impact Eng., vol. 34, no. 2, pp. 189–204, 2007.

The Editors of Encyclopædia Britannica, T.E.o.E. 2017.

Wang Y.-F. and Yang Z.-G., "Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials," Wear, vol. 265, no. 5–6, pp. 871–878, 2008.

Westerling L. and Lundberg T., "The influence of confinement on the protective capability of ceramic armour at two different velocities," in 15th Int. Symp. on Ballistics, 1995, pp. 283–290.

Zack Gable J. W., Hurley J., Chojnicki T., "Physics 001," Sci. Ballist., 2007.

Zook J. A., Frank K., and Silsby G. F., "Terminal ballistics test and analysis guidelines for the penetration mechanics branch," Army Ballistic Research Lab Aberdeen Proving Ground, 1992.

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

UMAGD, (2023) 15(2), 794-803.

10.29137/umagd.1314713

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Temmuz/July 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

RF Enerji Hasatlama Uygulamaları için Üç Bantlı Anten ve Doğrultucu Tasarımı

Tri-Band Antenna and Rectifier Design for RF Energy Harvesting Applications

Muhammet Emin İnce[1], Çetin Kurnaz [2], Ertuğrul Çam [1]

[1]Samsun Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,55420, Samsun, TÜRKİYE
[2]Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,55139, Samsun, TÜRKİYE

***Başvuru/Received**: 14/06/2023 **Kabul / Accepted**: 11/07/2023 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 11/07/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 15/07/2023*

Öz

Çok bantlı RF enerji hasadı, aynı anda birden fazla radyo frekansı (RF) bandından enerji hasadını içeren bir tekniktir. Bu yaklaşım, daha yüksek enerji hasadı verimliliğine ve daha geniş bir RF kaynağından enerji yakalama yeteneğine sahiptir. Bu çalışmada GSM900, GSM1800 ve UMTS2100 hücresel sistem frekanslarında enerji hasatlama için kullanılmak üzere anten ve doğrultucu tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan anten 0,94, 1,8 ve 2,15 GHz orta frekanslarında çalışmakta olup bu frekanslarındaki geri dönüş kayıpları sırasıyla -18 dB, -27 dB ve -31dB'dir. Tasarlanan antenin bu frekanslardaki kazançları ise yine sırasıyla 3,74 dBi, 2,3 dBi ve 1,76 dBi'dır. Antenin 0,94 GHz'deki en yüksek verimi %78 iken, 1,8 GHz ve 2.15 GHz'deki en yüksek verim değerleri sırasıyla %79 ve %75'tir. Anten tasarımından sonra GSM900, GSM1800 ve UMTS2100 frekanslarındaki tüm sinyal güçlerini toplamak için T tipi eşleme kullanılarak bir doğrultucu tasarımı yapılmıştır. Gerilim doğrultucu çıkışında maksimum 5.6 V değeri 3 dBm giriş gücünde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

"RF enerji hasatlama, Üç bantlı mikroşerit anten, Doğrultucu, CST, ADS"

Abstract

Tri-band RF energy harvesting is a technique that involves harvesting energy from multiple radio frequency (RF) bands simultaneously. This approach offers higher energy harvesting efficiency and the ability to capture energy from a broader range of RF sources. In this study, antenna, and rectifier design were carried out for energy harvesting in the GSM900, GSM1800, and UMTS2100 cellular system frequencies. The designed antenna operates at frequencies of 0.94 GHz, 1.8 GHz, and 2.15 GHz, with return losses of -18 dB, -27 dB, and -31 dB, respectively. The gains of the designed antenna at these frequencies are 3.74 dBi, 2.3 dBi, and 1.76 dBi, respectively. The antenna achieves the highest efficiency of 78% at 0.94 GHz, while the highest efficiency values at 1.8 GHz and 2.15 GHz are 79% and 75%, respectively. Following the antenna design, a rectifier was designed using T-type matching to combine the power from the GSM900, GSM1800, and UMTS2100 frequencies. A maximum output voltage of 5.6 V was obtained at a 3 dBm input power level.

Key Words

"RF energy harvesting, Tri-band microstrip antenna, Rectifier, CST, ADS"

***Sorumlu Yazar: muhammet.ince@samsun.edu.tr**

1. Giriş

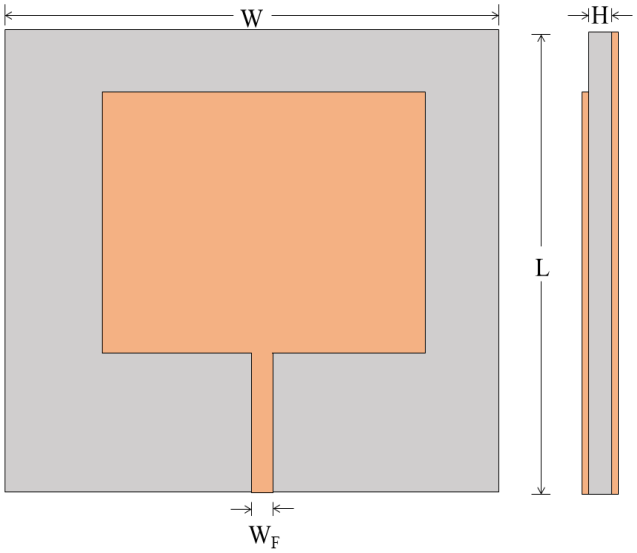
RF enerji hasadı, özellikle nesnelerin interneti (IoT) ile kablosuz ağlardaki enerji kısıtlaması sorunlarını ele almayı amaçlayan umut verici bir teknolojidir. Güç verimliliği sağlayan IoT uygulamalarına yönelik artan talep, bu cihazlara güç sağlamak için alternatif bir yaklaşım olarak, RF enerji hasadının araştırılmasına yol açmıştır. RF enerji hasadı, radyo frekansı (RF) dalgalarının elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlar ve bu enerji daha sonra pillere veya harici güç kaynaklarına ihtiyaç duyulmadan IoT cihazlarına güç sağlamak için kullanılabilir (Wang et al., 2021). Bu teknoloji esnekliği, taşınabilirliği ve uzun süreli çalışma potansiyeli nedeniyle dikkat çekmiş ve zorlu ortamlarda konuşlandırılan veya güç kaynaklarına sınırlı erişimi olan IoT cihazları için özellikle uygun hale gelmiştir (Sherazi et al., 2022). RF enerji hasadındaki en önemli zorluklardan biri, özellikle hasat edilen RF gücü küçük olduğunda, RF'den DC'ye enerji dönüşüm verimliliğinin düşük olmasıdır (Lu et al., 2015). Bununla birlikte, son gelişmeler RF enerji hasat sistemlerinin performansını artırmaya odaklanmıştır. Örneğin, tek bantlı sistemlerin sınırlamalarının üstesinden gelmek ve enerji hasadı verimliliğini artırmak için çok bantlı RF enerji hasadı ön uç sistemlerinin geliştirilmesi araştırılmıştır. Bu sistemler, enerji hasadı sürecini optimize etmek için antenler, empedans eşleştirme ağları ve RF-DC doğrultucular gibi devreler içermektedir (Lee et al., 2023). Çok bantlı RF enerji hasadı kavramı, birden fazla frekans bandından gelen radyo frekansı (RF) dalgalarının elektrik enerjisine dönüştürülmesini içerir. Bu enerji daha sonra kablosuz sensörler, IoT cihazları ve iletişim sistemleri gibi çeşitli cihazlara güç sağlamak için kullanılabilir. Birden fazla frekans bandından enerji hasat ederek, genel enerji hasat verimliliği artırılabilir ve sistem farklı çevresel koşullara ve RF kaynaklarına uyum sağlayabilir.

Çok bantlı RF enerji hasadını uygulamak için çeşitli bileşenler ve teknikler kullanılır. Bunlar arasında çok bantlı antenler, empedans eşleştirme ağları ve RF-DC doğrultucular yer almaktadır (Lee et al., 2023). Çok bantlı antenler, farklı bantlardan RF enerjisinin yakalanmasına izin verecek şekilde birden fazla frekansta rezonansa girecek şekilde tasarlanmıştır (Sabaawi et al., 2022). Empedans eşleştirme ağları, anten ile enerji toplama devresi arasındaki enerji transferini optimize etmek için kullanılır. RF-DC doğrultucular, RF enerjisini kullanılabilir DC gücüne dönüştürmekten sorumludur (Adam et al., 2018). (Boursianis et al., 2021)'de dış mekan RF enerji uygulamaları için üç bantlı tek katmanlı bir anten önerilmiştir. Önerilen sistem LoRa, GSM-1800 ve UMTS-2100 frekans bantlarında çalışmaktadır. Önerilen antenin nihai geometrisi Moth Search algoritması kullanılarak elde edilmiştir. RF-DC doğrultucu Greinacher topolojisine dayalı olarak tasarlanmıştır. (Kuhn, Lahuec, Seguin & Person, 2015)'de ise, kablosuz haberleşme ağlarında RF enerji hasadı için GSM-900, GSM-1800, UMTS-2100 ve WiFi bantlarını kapsayacak şekilde bir sistem tasarlanmıştır. Üretilen prototipde, dört RF kolunun her birinde ayarlanan 0 dBm giriş gücünde %84 RF-DC dönüşüm verimliliği elde edilmiştir. Tek bantlı bir sistem ile karşılaştırıldığında verimlilik, iki katından fazladır.

Bu çalışmada CST Microwave Studio (CST) kullanılarak standart dikdörtgen yama antenlerden farklı olarak yarıklı besleme hattı kullanılan ve dikey ve yatay oluklar açılarak üç bantlı anten tasarlanmıştır. Ayrıca bu bantları kapsayan empedans eşlemeli doğrultucu tasarımı yapılmıştır. Bu doğrultucu Advanced Design System (ADS) programında hücresel sistemlerde sıklıkla kullanılan 900 MHz, 1800 MHz ve 2100 MHz frekanslarında (Korunur Engiz &Kurnaz, 2016) kapsayacak, üç katlı olacak şekilde tasarlanmıştır.

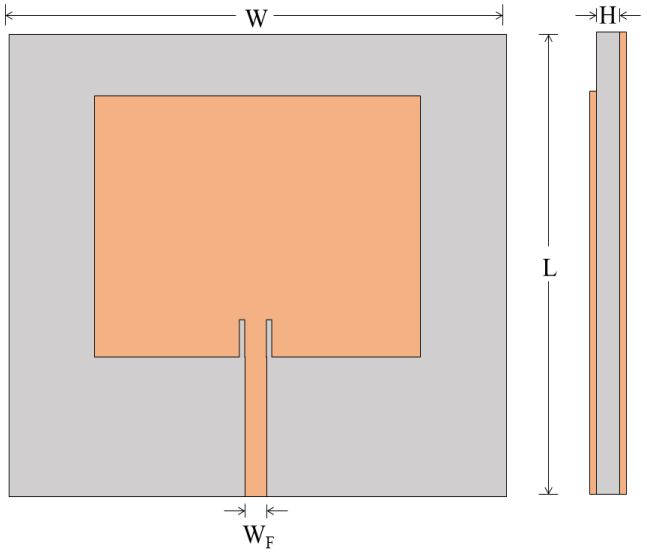
2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, GSM900, GSM1800 ve UMTS2100 frekans bantlarında (aşağı hat, downlink) RF enerji hasatlama uygulamaları için bir dikdörtgen mikroşerit yama anten önerilmiştir. Ayrıca belirtilen frekanslarda doğrultucu tasarımı da yapılmıştır. Standart dikdörtgen yama antenlerin dört tane tasarım parametresi vardır. Bu parametreler mikroşerit yama uzunluğu ve genişliği, toprak düzleminin uzunluğu ve genişliği, dielektrik malzemenin uzunluğu ve genişliği ve dielektrik malzemenin kalınlığıdır. Standart yama antenin görüntüsü Şekil 1' de verilmiştir.



Şekil 1. Standart mikroşerit yama antene ait görüntü.

Şekil 1'deki gibi standart mikroşerit anten beslemesi yüksek bir giriş empedansı sağlamaktadır. Bu yüzden yama merkeze daha yakın beslenirse giriş empedansı (Z=V/I) azaltılabilir. Bunun, Şekil 2'de gösterildiği gibi bir yarıklı besleme yöntemi kullanılmaktır.



Şekil 2. Yarıklı beslemeli mikroşerit anten.

Eşitlik (1)'de antenin yama genişliğine ait matematiksel ifade verilmiştir.

$$W = \frac{c}{2f_r}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \quad \textbf{(1)}$$

Eşitlik (2)' de ise mikroşerit antenin yama uzunluğunun ifadesi verilmiştir.

$$L = \frac{c}{2f_r\sqrt{\varepsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad \textbf{(2)}$$

Buradaki c ışık hızı, ε_r dielektrik sabiti, ε_{eff} dielektrik sabitinin efektif değerini, f_r rezonans frekansını ve ΔL ise yama uzunluğunun değişimini ifade eder.

Antenin toprak düzleminin uzunluğu (Lg) ve genişliği (Wg) (3) ve (4) eşitliklerinde verildiği gibidir.

$$L_g = 6h + L \quad \textbf{(3)}$$

$$W_g = 6h + W \quad \textbf{(4)}$$

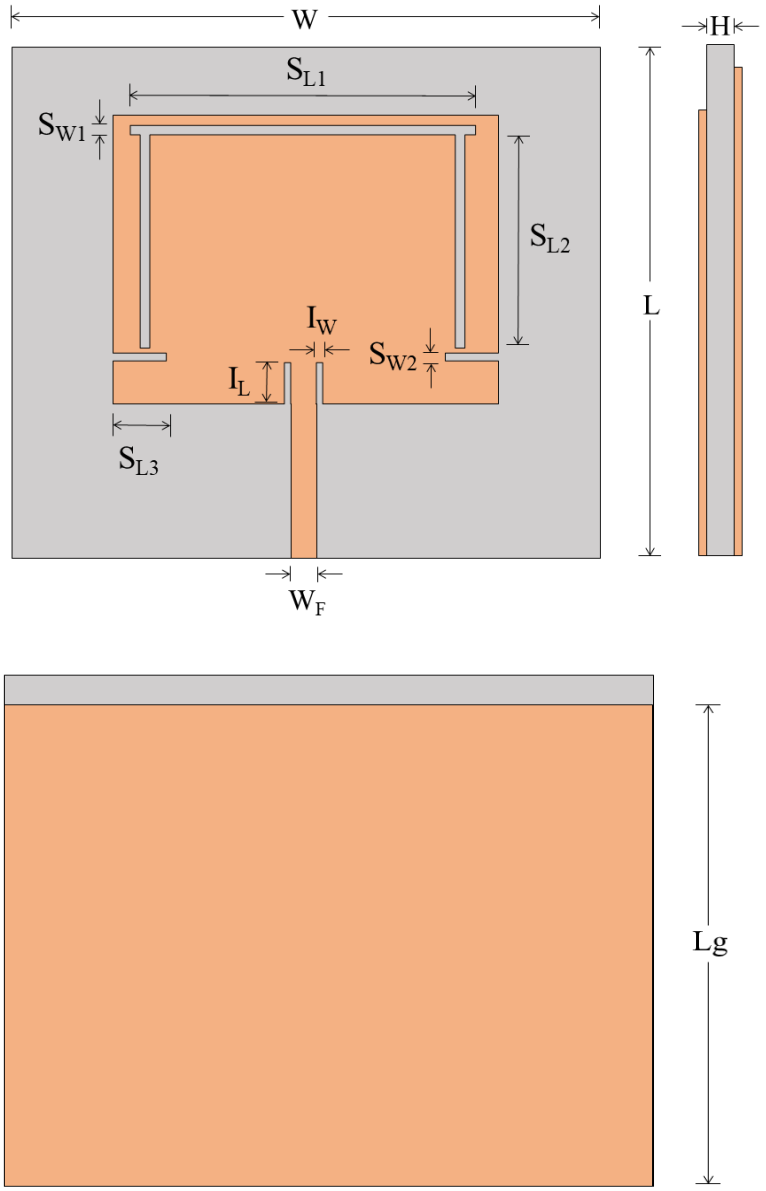
Buradaki h dielektrik malzemenin kalınlığını ifade etmektedir.

Antenin üç bantlı tasarımı aşamalarından ilkinde bant sayısını ikiye çıkarmak amacıyla antenin sağına ve soluna iki adet dikey yarık açılmıştır. Bu yarıklar sonrasında antenin 1800 MHz ve 2100 MHz' de çalışması sağlanmıştır. En yoğun kullanılan kablosuz haberleşme frekanslarından biri olan 900 MHz frekansı için mikroşerit yamanın üst kısmına yatay yarık açılmıştır. Antenin geometrik parametreleri ve bunlara karşılık gelen değerler Şekil 3'de, değerler ise Tablo 1'de verilmiştir. Toprak ve yama malzemesi olarak 0.035 mm kalınlığında bakır kullanılmıştır. Dielektrik malzeme olarak ϵ_r= 4,2 olan 1,5 mm kalınlığında FR-4 kullanılmıştır.

Tablo 1. Önerilen anten için ölçüler.

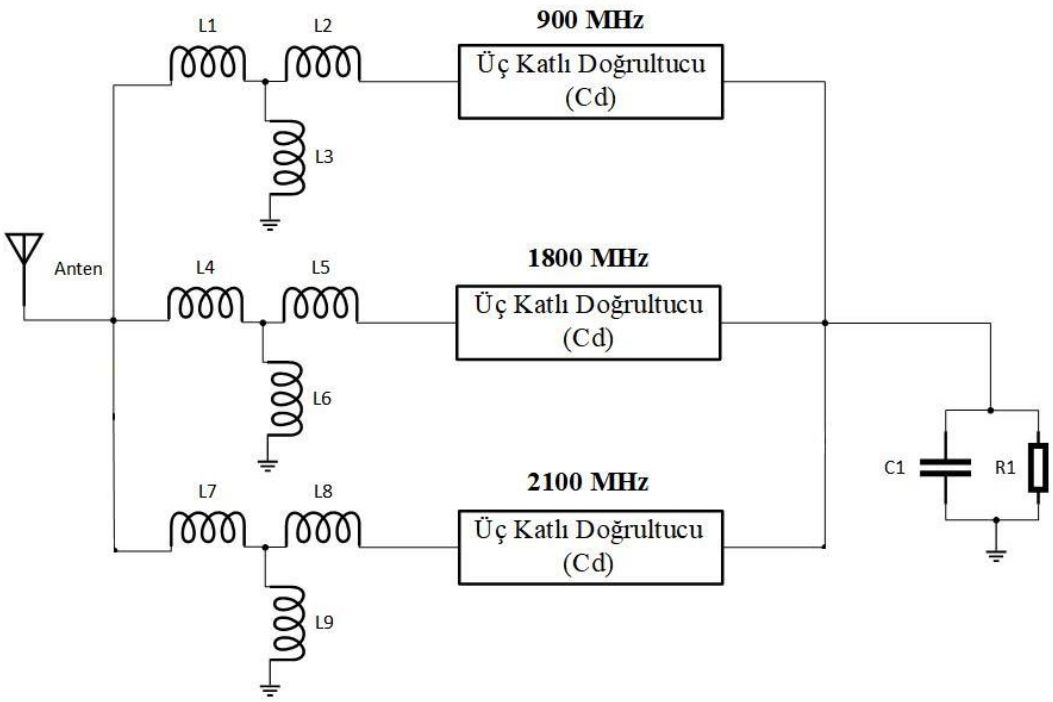
Parametre	Boyut (mm)	Parametre	Boyut (mm)
W	56,2	S_{W1}	1,5
L	57,8	S_{W2}	1
L_g	54,3	I_L	4,56
S_{L1}	42,65	I_W	0,65
S_{L2}	26,1	H	1,5
S_{L3}	6,9	W_F	2,8

Anten ölçüleri ve açılan yarık ölçüleri CST Studio programında "Trust Region Framework" algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Optimize edilen antenin ön ve arka yüzü Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Önerilen antenin ön ve arka yüzü.

Önerilen üç bantlı anten tarafından toplanan sinyalleri doğrultup DC gerilime çevirmek için eşleştirme ağı ve üç katlı Villard doğrultucu tasarımı yapılmıştır. Doğrultucu 5-7 katlı olduğunda RF-DC verimliliği önemli derecede düşmektedir. Kat sayısı 1-2 olduğunda ise istenilen DC çıkış elde edilememektedir. Bu yüzden doğrultucu üç katlı olarak seçilmiştir. Doğrultucu 900 MHz, 1800 MHz ve 2100 MHz frekanslarını temsil eden üç kol şeklinde tasarlanmıştır. Tasarımın diyagramı Şekil 4'te gösterilmiştir.



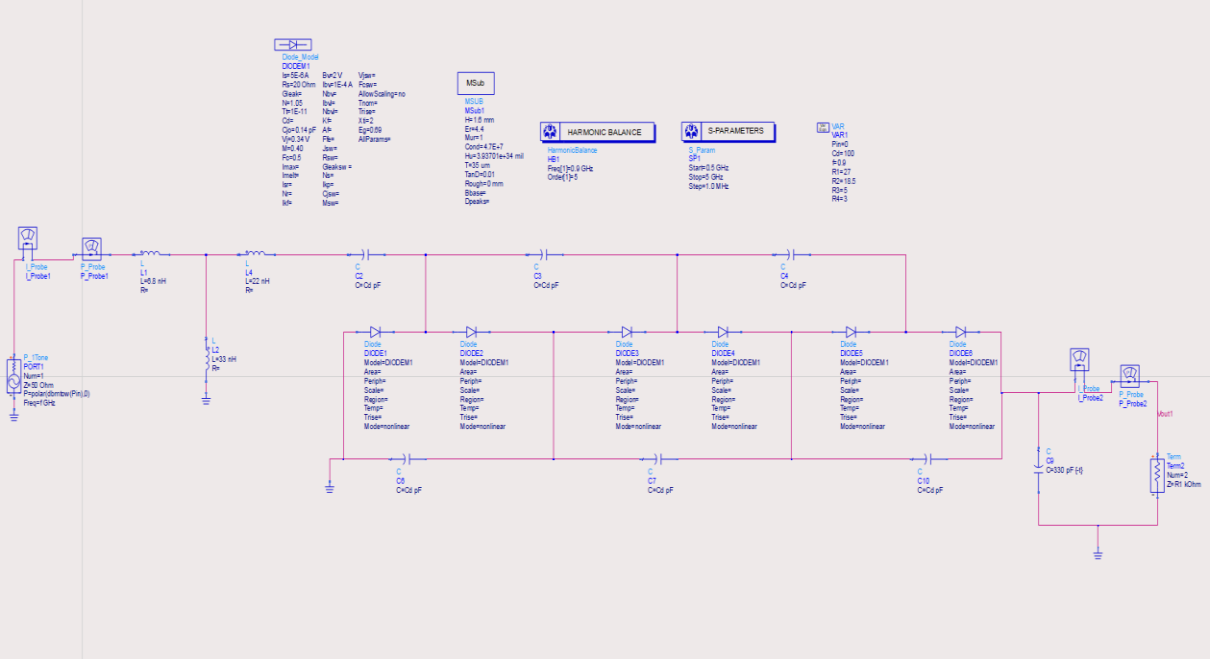
Şekil 4. Üç bantlı doğrultucu tasarımı

Üç katlı doğrultucu ve anten arasında T tipi toplu elemanlı eşleme ağı kullanılmıştır. Eşleme ağı belirtilen frekanslarda doğrultucu rezonansa sokarak verimliliği artırmaktadır. Şekil 4'te görülen kapasitör indüktör ve direnç değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Doğrultucu kısmında verilen Cd kapasitörleri, kuplaj kapasitörlerini göstermektedir.

Tablo 2. Önerilen doğrultucu için eleman değerleri.

Parametre	Değer	Parametre	Değer
L1	6,8 nH	L7	5,6 nH
L2	22 nH	L8	3,3 nH
L3	33 nH	L9	4,7 nH
L4	3,3 nH	Cd	100 pF
L5	5,6 nH	C1	330 pF
L6	4,7 nH	R1	30 kΩ

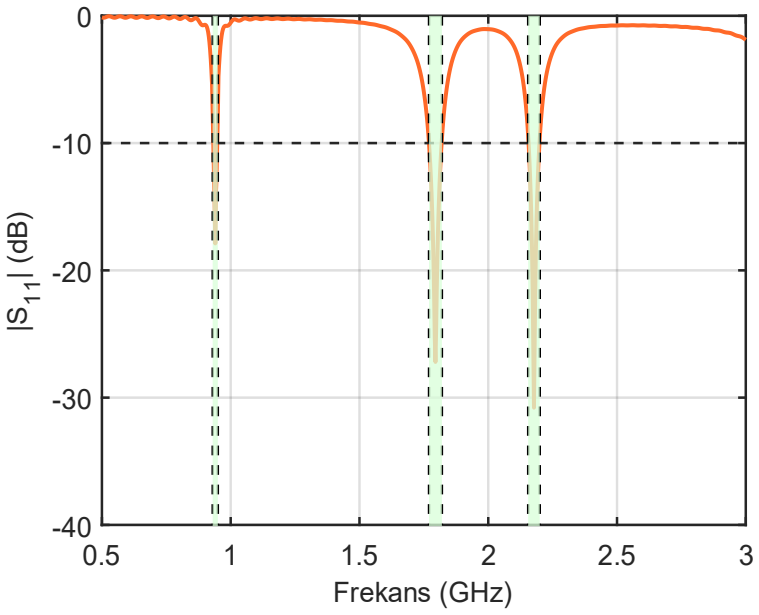
Yüksek frekanslarda doğrultma yapılacağı için tasarımda hızlı anahtarlama yapabilen Shottky diyotlar kullanılması gerekmektedir. Bu yüzden tasarımda çift diyotlu SMS7690-005LF elemanı kullanılmıştır. Diyot modeli ile tasarlanan doğrultucunun Advanced Design System programında 900 MHz kolu için tasarımı Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Önerilen doğrultucunun ADS programındaki görüntüsü.

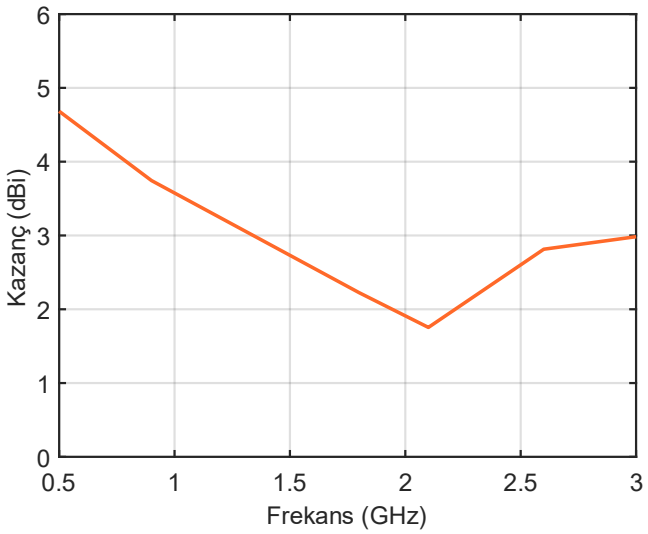
3. Benzetim Sonuçları

Önerilen antenin geri dönüş kaybı Şekil 6' da gösterilmiştir. Antenin 0,93-0.95 GHz aralığında 1,78-1,82 aralığında ve 2,13-2,17 aralığında geri dönüş kaybı -10 değerinin altındadır. Ayrıca antenin rezonans frekanslarındaki geri dönüş kaybı 0,94 için -18 dB, 1,8 GHz için -27 dB ve 2,15 için -31 dB'dir.



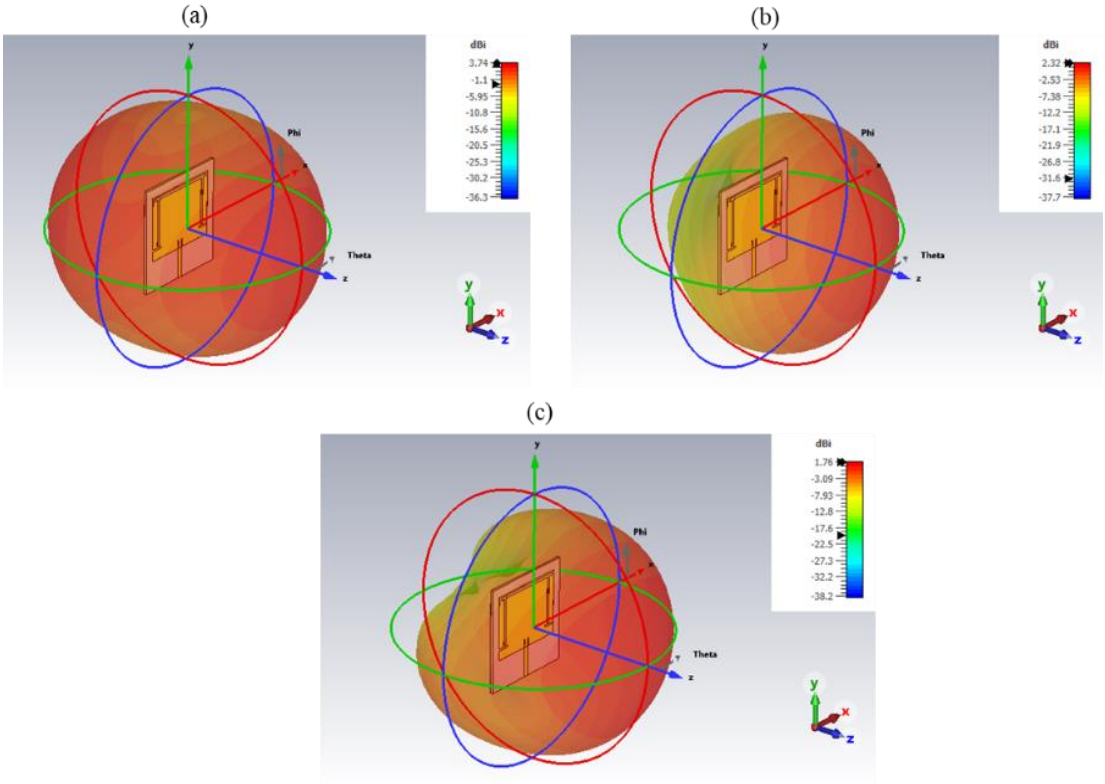
Şekil 6. Önerilen antenin geri dönüş kaybı.

Önerilen antenin frekansa göre kazanç değişimi Şekil 7' de verilmiştir. Bu antende kazanç 0,94 GHz için 3,74 dBi, 1,8 GHz için 2,3 dBi ve 2,15 GHz için ise 1,76 dBi değerindedir.



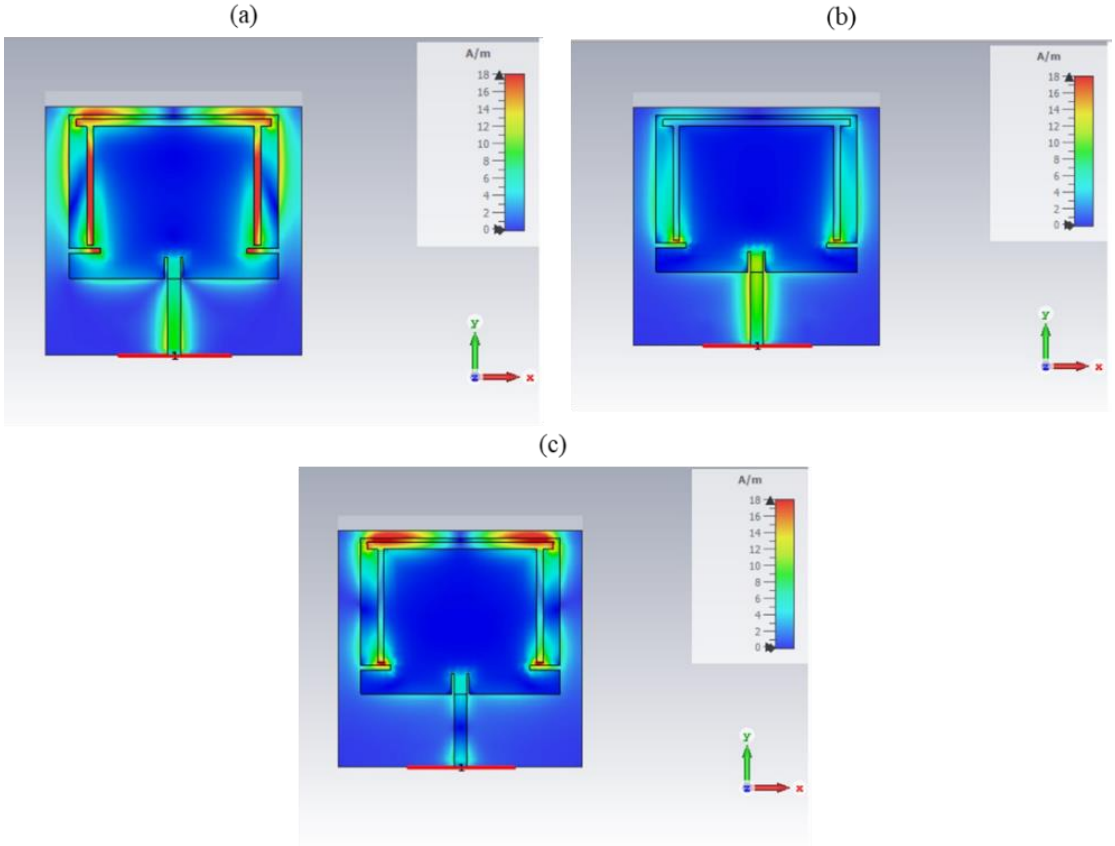
Şekil 7. Önerilen üç bant antenin kazancın frekansla değişimi.

Önerilen antenin ışıma desenlerin üç boyutlu olarak Şekil 8' de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi tasarlanan anten üç bant için de eşyöneldir.



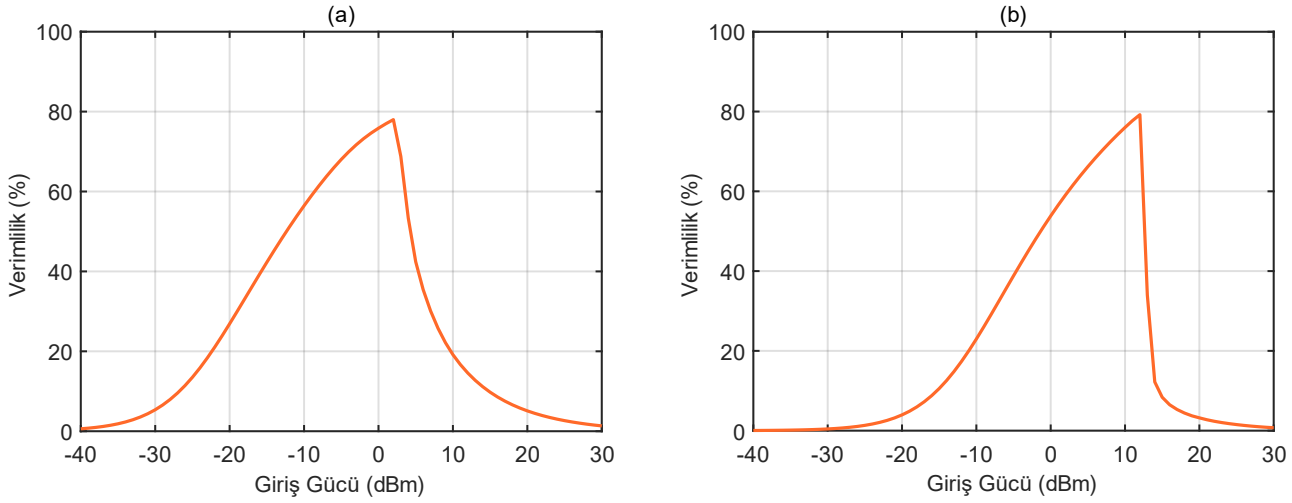
Şekil 8. Önerilen üç bant antenin üç boyutlu ışıma deseni a) 0,94 GHz, b) 1,8 GHz, c) 2,15 GHz.

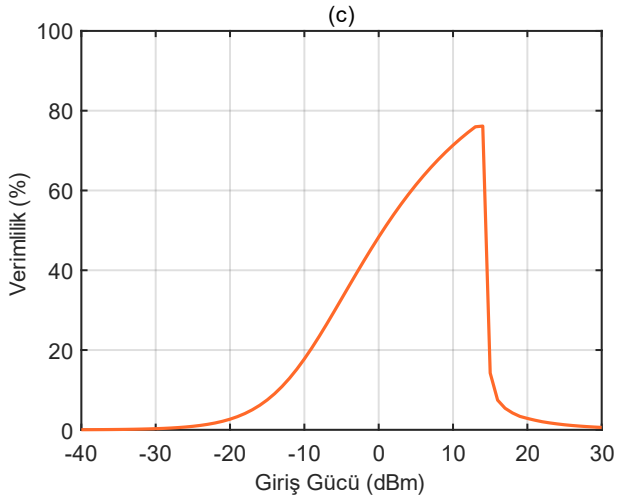
Tasarlanan antenin yüzey akım yoğunlukları Şekil 9' da gösterilmiştir. Yüzey akımları 0,94 GHz'de antenin alt kısımlarında yoğunken 1,8 ve 2,15 GHz'de yüzey akımları yan ve üst yarık çevresinde daha yoğundur.



Şekil 9. Önerilen üç bant antenin yüzey akımlarının gösterimi a) 0,94 GHz, b) 1,8 GHz, c) 2,15 GHz.

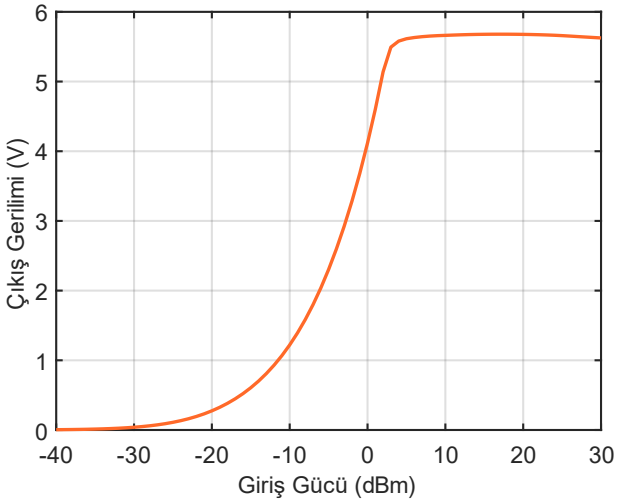
Tasarlanan doğrultucuda kolların verimlilikleri Şekil 10'da verilmiştir. 0,94 GHz'de giriş gücünün 2 dBm olduğu değerde verimlilik en yüksek değerine ulaşmıştır. GSM-900' de verimliliğin tepe değeri %78'dir. 1,8 GHz' de giriş gücünün 12 dBm olduğu değerde verimlilik en yüksek değerine ulaşmıştır. GSM1800' de verimliliğin tepe değeri yaklaşık %79'dir. 2,15 GHz'de ise giriş gücü 14 dBm olduğunda verimlilik en yüksek değeri %75 değerine ulaşmıştır.





Şekil 10. Üç bantlı doğrultucunun verimliliği a) 0,94 GHz, b) 1,8 GHz, c) 2,15 GHz.

Tasarlanan gerilim doğrultucusu çıkışı Şekil 11'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi gerilim doğrultucu çıkışında en yüksek çıkış değeri 5,6 V olarak 3 dBm giriş gücü için elde edilmiştir.



Şekil 11. Üç bantlı doğrultucunun çıkış gerilimi grafiği.

4. Sonuç

Bu çalışmada, RF enerji hasatlama uygulamaları için üç bantlı dikdörtgen mikroşerit yama anten tasarlanmıştır. Tasarlanan anten 0,93 – 0,95 GHz, 1,78 – 1,82 GHz ve 2,13 – 2,17 GHz aralığında çalışmaktadır. Geri dönüş kayıpları sırayla 0,94, 1,8 ve 2,15 GHz için sırayla en düşük -18, -27, -30 dB' dir. Antenin en yüksek kazancı 0,94 GHz'de 3,74 dBi'dır. Tasarlanan doğrultucu T tipi empedans eşleme ağı ise belirtilen üç farklı frekansta çalışabilmektedir. Doğrultucunun 0,94, 1,8, 2,15 GHz için verimlilikleri sırasıyla %78, %79 ve %75'dir. Ayrıca doğrultucu Çıkışında gerilim maksimum 5,6 V olarak analiz edilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre önerilen üç bantlı anten GSM900, GSM1800 ve UMTS2100' ün aşağı hat (downlink) frekanslarını büyük bir kısmını kapsamaktadır. Üç bantlı doğrultucu ise belirtilen frekanslarda doğrultma yaparak tüm RF enerji hasatlama uygulamalarında kullanılabilir.

Referanslar

Adam, I., Yasin, M., Rahim, H., Soh, P., Abdulmalek, M. (2018). A Compact Dual-band Rectenna for Ambient Rf Energy Harvesting. Microw Opt Technol Lett, 11(60), 2740-2748. https://doi.org/10.1002/mop.31475

Boursianis, A. D., Papadopoulou, M. S., Koulouridis, S., Rocca, P., Georgiadis, A., Tentzeris, M. M., & Goudos, S. K. (2021). Triple-band single-layer rectenna for outdoor RF energy harvesting applications. Sensors, 21(10), 3460.

Das, D., Xu, Z., Nasrollahpour, M., Martos-Repath, I., Zaeimbashi, M., Khalifa, A., & Onabajo, M. (2023). Circuit-level Modeling and Simulation of Wireless Sensing and Energy Harvesting with Hybrid Magnetoelectric Antennas for Implantable Neural Devices. IEEE Open J. Circuits Syst., (4), 139-155. https://doi.org/10.1109/ojcas.2023.3259233

Jung, J., Kwon, I. (2022). A Capacitive DC-DC Boost Converter with Gate Bias Boosting and Dynamic Body Biasing for an RF Energy Harvesting System. Sensors, 1(23), 395. https://doi.org/10.3390/s23010395

Korunur Engiz B., & Kurnaz, Ç. (2016). Comparison of Signal Strengths of 2G/3G/4G Services on a University Campus. International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers, Special Issue (2016), 37-42. DOI: 10.18100/ijamec.270710

Kuhn, V., Lahuec, C., Seguin, F., & Person, C. (2015). A multi-band stacked RF energy harvester with RF-to-DC efficiency up to 84%. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 63(5), 1768-1778.

Lee, Y., Ramiah, H., Choo, A., Churchill, K., Lai, N., Lim, C., & Martins, R. (2023). High-performance Multiband Ambient Rf Energy Harvesting Front-end System for Sustainable IoT Applications—a Review. IEEE Access, (11), 11143-11164. https://doi.org/10.1109/access.2023.3241458

Lu, X., Wang, P., Niyato, D., Kim, D., Han, Z. (2015). Wireless Networks with RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey. IEEE Commun. Surv. Tutorials, 2(17), 757-789. https://doi.org/10.1109/comst.2014.2368999

Mouapi, A. (2022). Radiofrequency Energy Harvesting Systems for Internet of Things Applications: A Comprehensive Overview of Design Issues. Sensors, 21(22), 8088. https://doi.org/10.3390/s22218088

Rao, A., Aziz, A., Aljaloud, K., Qureshi, M., Muhammad, A., Rafique, A., & Hussain, R. (2022). Concomitance Of Radio Frequency Energy Harvesting and Wearable Devices: A Review of Rectenna Designs. Int J RF Mic Comp-Aid Eng, 12(32). https://doi.org/10.1002/mmce.23536

Sabaawi, A., Sultan, Q., Najm, T. (2022). Design and Implementation of Multi-band Fractal Slot Antennas for Energy Harvesting Applications. Period. Polytech. Elec. Eng. Comp. Sci., 3(66), 253-264. https://doi.org/10.3311/ppee.20301

Sherazi, H., Zorbas, D., & O'Flynn, B. (2022). A Comprehensive Survey on RF Energy Harvesting: Applications and Performance Determinants. Sensors, 8(22), 2990. https://doi.org/10.3390/s22082990

Singla, J., Mahajan, R., Bagai, D. (2022). An Energy-efficient Technique for Mobile-wireless-sensor-network-based IoT. ETRI Journal, 3(44), 389-399. https://doi.org/10.4218/etrij.2021-0084

Soares, S., Carvalho, M. (2022). An Analytical Model for the Aggregate Throughput of IEEE 802.11ah Networks Under the Restricted Access Window Mechanism. Sensors, 15(22), 5561. https://doi.org/10.3390/s22155561

Wang, M., Zhang, Y., Tang, K., Yan, N., Min, H. (2021). A Wide Input Range Energy Harvesting System for AM Broadcast with Capacitor Load. Electronics Letters, 12(57), 469-471. https://doi.org/10.1049/ell2.12101

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

UMAGD, (2023) 15(2), 804-819.

10.29137/umagd.1298311

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Temmuz/July 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Fractional Order PID Controller Design Using Reference Model on Inverted Pendulum System

M. Serhat Can*[1], Emrah Sürücü[1]

[1]*Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 60250, Tokat, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 14/06/2023* ***Kabul / Accepted**: 11/07/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 11/07/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 14/07/2023*

Abstract

The proportional Integral Derivative (PID) controller has three basic parameters: Proportional gain (K_p), Integral gain (K_i) and Derivative gain (K_d). In a conventional PID controller, integral and derivative operators are integer order. The researchers proposed a fractional order PID ($PI^{\lambda}D^{\mu}$) controller by using the fractional integral and derivative operators instead of the integer order integral and derivative operators in the traditional PID controller because it improves the control performance. The $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller has an additional fractional integrator degree (λ) and fractional derivative degree (μ). In this study, the focus is on the design of a fractional-order PID controller according to a reference model in the time domain. Bode's ideal transfer function was used as the reference model. It is aimed to obtain $PI^{\lambda}D^{\mu}$ parameters by minimizing the error between the time domain response of Bode's ideal transfer function model and the output of the system to be controlled by using the optimization method. Genetic Algorithm (GA) optimization was used as the optimization method. The study was carried out as a simulation study on an inverted pendulum system with a single-input multiple-output (SIMO) structure.

Key Words

"Fractional order PID controller, model reference design, inverted pendulum, single input multi output system."

***Sorumlu Yazar:** mehmetserhat.can@gop.edu.tr*

1. Introduction

The proportional Integral Derivative (PID) controller is frequently used in many control applications. It can be designed in P, PI, or PID forms according to the application. In PID form, the error signal is multiplied by the proportional gain (K_p), the error is integrated and multiplied by the integral gain (K_i), the derivative of the error is multiplied by the derivative gain (K_d), and the control signal is obtained by summing these three product values. The K_p, K_i, and K_d gains are the basic characteristics of the PID controller and the performance of the PID controller depends on these three coefficients. The degrees of derivative and integral operators in a conventional PID controller are real and integer values. In the fractional degree PID approach, the degrees of the derivative and integral operators are not integers but are expressed as fractional numbers, and thus the traditional PID controller is expressed as $PI^{\lambda}D^{\mu}$. In this notation, λ and μ are degrees of integral and derivative operators, respectively. The $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller has a total of five parameters with gain parameters K_p, K_i, K_d, and additional λ and μ parameters. The addition of λ and μ parameters increase the closed-loop performance and durability of the traditional PID controller (O'Dwyer, 2006; Shah & Agashe, 2016).

The operations I^{λ} and D^{μ} are fractional integral and fractional derivative operators and fall under fractional order mathematics. The main issue in fractional mathematics is the use of fractional and even complex numbers, rather than the use of integers of the degree of derivative in the derivative operator. The foundations of fractional mathematics are based on the work of Leibniz and L'Hospital. The work of Leibniz and L'Hospital is followed by the work of Liouville in 1832, Holmgren in 1864, and Riemann in 1953. His work on the fractional control structure in the position control of heavy objects, carried out by Tustin in 1958, is the first work presented to the literature in the field of control in engineering. Tustin's work is followed by Manabe's work in 1961 and 1963. In these studies, Manabe touched upon issues related to system control involving fractional integrals. $PI^{\lambda}D^{\mu}$ was proposed by Podlubny and in Podlubny studies, it achieved more effective results with controllers than with conventional PID controllers (Podlubny, 1999). Following Podlubny's studies, many studies have been conducted on $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller design and applications. Some of these are presented in Table 1 below.

Table 1. Tuning studies for the $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller

Luo & Chen, (2009)	Gain crossover frequency and phase margin method
Castillo et al., (2010a)	Time domain method
Castillo et al., (2010b)	Frequency properties method
Hamamcı & Köksal, (2010)	Stability region analysis method
Bouafoura & Braiek, (2010)	Algebraic equations method
Yeroglu & Tan, (2011)	Zigler-Nichols rule and ÅströmHägglund method, and Bode envelopes method
El-Khazali, (2013)	Frequency response method
Azarmi et al., (2015)	Fractional set-point weighted structure method
Muresan et al., (2016)	Vector-based method
Keyser et al., (2016)	Auto-tuning method based on modulus, phase and phase slope of the process method
Deniz et al., (2017)	Fourier eeries method
Keyser et al., (2018)	Robust auto-tuning method based on modulus, phase, phase slope, Nyquist plane method
Deniz et al., (2019)	Standart forms method
Ozyetkin et al., (2020)	Weighted geometrical center method
Shankaran et al., (2022)	Stability region method
Muresan et al., (2022)	Ziegler–Nichols method

In control applications, performance indicators based on the integral of the error variable are used to measure the performance of the designed controller. Integral square error (ISE), Integral absolute error (IAE), Integral time squared error (ITSE), Integral time absolute error (ITAE) are well-known performance indicators based on integral of error. During controller design, controller parameters are changes to minimize the preferred performance index. Optimization method for this process is a very convenient method and optimization method is used in many studies (Doğruer et al. 2017a; Doğruer & Tan, 2020). The error value in the performance indexes can be a direct control system error variable. Or, instead, the error value between the output of a system model that can give the desired value of the system output and the controlled system output can be taken. In the model reference control, an ideal model that provides the desired system output is predetermined and the error between the ideal model and the system output is reduced to zero by adjusting the controller parameters. In the optimization method, one of the performance indexes mentioned above is chosen as the fitness function. During the optimization, the fitness function is minimized by changing the controller parameters (Doğruer et al. 2017b). Thus, the most suitable controller parameters to provide the desired system output are obtained.

In this study, a model-based controller design for the control of a single-input and multiple-output (SIMO) system is discussed. Work was carried out on the inverted pendulum system due to its SIMO structure. The position control of the carrier car (cart) in the inverted pendulum system and the angular position of the pendulum are provided by two separate fractional PID controllers. Bode's fractional order ideal transfer function is used both in the controller design of the cart and in the design of the pendulum controller. Thr Genetic

algorithm optimization algorithm was used to find the most suitable controller parameters. For the fitness function, the ITAE values of the difference between the reference models used for the cart and the pendulum and the outputs of these units were formed by summing the α and β weighting values.

2. Material and Method

2.1. Fractional derivative/integral operators and PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$ controller

The first thoughts on the fractional derivative and integral go back to Leibniz and L'Hospital. Although there are many suggestions in the literature regarding the definition of the fractional operator, the definitions of Grünwald–Letnikov, Riemann–Liouville and Caputo are frequently used (Valério & Costa, 2011). The fractional derivative and integral are expressed as follows.

$$ {}_aD_t^{\alpha} = \begin{cases} \dfrac{d^{\alpha}}{dt^{\alpha}} & R(\alpha) > 0 \\ 1 & R(\alpha) = 0 \\ \displaystyle\int_a^t (d\tau)^{-\alpha} & R(\alpha) < 0 \end{cases} \tag{1} $$

In the notation in Equation 1, the expression ${}_aD_t^{\alpha}$ is the fractional operator. α the fractional degree, *a* and *t* are limits of the operation. The definition of Grünwald-Letnikov is as follows;

$$ {}_aD_t^{\alpha} = \lim_{h\to 0} \frac{1}{h^{\alpha}} \sum_{i=0}^{\left[\frac{t-a}{h}\right]} (-1)^i \binom{n}{i} g(t-ih), \qquad n-1 < \alpha < n \tag{2} $$

In Equation 2, $\left[\frac{t-a}{h}\right]$ is an integer, and *a* and *t* represent its limit. $\binom{n}{i}$ are binomial coefficients and are expressed as follows;

$$ \binom{n}{i} = \frac{\Gamma(n+1)}{\Gamma(i+1)\Gamma(n-i+1)} \tag{3} $$

Gamma function in Equation 3 is defined as;

$$ \Gamma(n) = \begin{cases} \displaystyle\int_0^{\infty} t^{n-1} e^{-t} dt & n \in R \\ (n-1)! & n \in N \end{cases} \tag{4} $$

Riemann–Liouville definition;

$$ {}_aD_t^{\alpha} = D^n J^{n-\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \left(\frac{d}{dt}\right)^n \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau, \quad n-1 < \alpha < n \tag{5} $$

In Equation 5, *n* is an integer, *α* is a real number, *a* and *t* are the limits of integration and *J* is the integral operator.

Another widely used definition is defined by Caputo;

$$ {}_aD_t^{\alpha} = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_a^t \frac{f^n(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau, \quad n-1 < \alpha < n \tag{6} $$

In Equation 6, *n* is an integer, *a* and *t* are the limits of integration and *α* is a real number.

The traditional integer PID controller is frequently used in industrial process applications because it provides the desired performance such as easy design, low overshoot, and small settling time (Astrom, 1995). It can be designed in P, PI, or PID forms depending on the type of application. In the form of a general closed-loop PID controller, the error signal is multiplied by the proportional gain (K_p), the error is integrated and multiplied by the integral gain (K_i), the derivative of the error is multiplied by the derivative gain (K_d), and the control signal is obtained by adding these three product values. The K_p, K_i, and K_d gains are the basic characteristics of the PID controller

and the performance of the PID controller depends on these three coefficients. The representations of the integer conventional PID and the $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller in Laplace space, respectively, are shown in Equation 7 and Equation 8 below.

$$C_{PID}(S) = K_p + \frac{K_i}{S} + K_d S \tag{7}$$

$$C_{PI^{\lambda}D^{\mu}}(S) = K_p + \frac{K_i}{S^{\lambda}} + K_d S^{\mu} \tag{8}$$

The degrees of derivative and integral operators in a conventional PID controller are real and integer values. In fractional order PID controller design, derivative and integral operators are expressed using expressions from Equation 1-Equation 6, thus conventional PID controller is expressed as $PI^{\lambda}D^{\mu}$. In this notation, λ and μ denote the degrees of the integral and derivative operators, respectively. $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controllers are less sensitive to parameter changes of the controller and the controlled system than traditional PID controllers (Chao et al., 2010). This is the superiority of $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controllers. Although they perform better than PID controllers, the fractional derivative and fractional integral operations given in Equation 1-Equation 6 have additional and not easy mathematical operations. To avoid these mathematical difficulties, researchers have proposed some integer approximations (Carlson and Halijak 1964; Charef et al., 1992; Matsuda and Fujii, 1993; Oustaloup et al., 2000; Podlubny et al., 2002). In this study, Matsuda's 6. degree approximate model was used.

2.2. Inverted pendulum system

A classical Inverted pendulum system basically has two components. These; are a pendulum and a carrier car. The pendulum carrier is attached to a freely rotatable hinge on the upper center of the car. The state of motion of the pendulum and the carriage depends on the force applied to the carriage. In the inverted pendulum problem, the aim is to bring the pendulum to a certain reference point by keeping it in a vertical position with the force applied to the carrier car. In this respect, this problem is a single-input-multiple-output (SIMO) control problem. The free-body diagram for the inverted pendulum system is given in Figure 1 below. Here, the inverted pendulum system consists of a wheeled vehicle (cart) that can move in the *x*-axis direction on the ground and a rod (pendulum) that can move freely in the *y*-section at the midpoint of this vehicle. The pendulum has two parameters denoted by *l* and *m*. *l* is the length of the pendulum's center of mass of the pendulum, and *m* is the mass of the pendulum. The wheeled vehicle is expressed with the mass *M*. The angle that the pendulum makes with the *y*-axis at the center point of the cart is represented by the variable θ, while the amount of displacement of the cart in the *x*-axis relative to a fixed reference point is expressed by the variable *x*. The coefficient of friction between the vehicle and the ground is *b*.

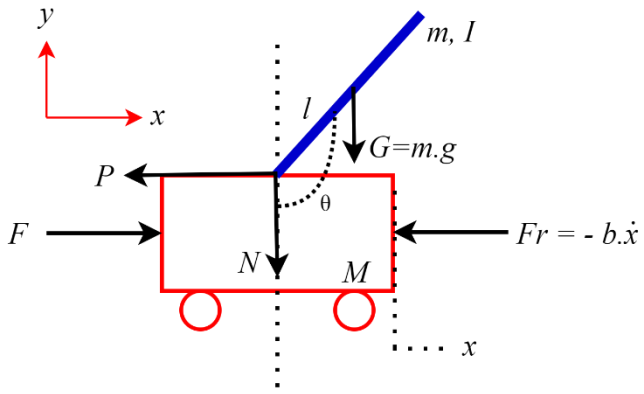


Figure 1. Free body diagram of an inverted pendulum system on a cart.

The symbols used in Figure 1 and the equations below and the values used in the simulation studies are given in Table 2 below.

Table 2. Symbols, descriptions, values, and units used in the study

Symbol	Explanation	Value	Unit
g	Gravitational acceleration	9.8	m/s^2
L	Length of pendulum	0.61	*m*
l	The distance from the center of mass of the pendulum to the car	0.305	*m*

M	Mass of the cart	0.455	kg
m	Mass of the pendulum	0.21	kg
G	Weight of the pendulum	2.058	N
F	Force applied to the cart		N
F_r	Frictional force	-	N
b	Coefficient of friction	-	$N \times s/m$
N	Weight component on the x-axis		N
P	Weight component on the Y-axis		N
I	Moment of inertia of the pendulum		$kg \times m^2$
$\ddot{\theta}$	Angular acceleration of the pendulum		rad/s^2
$\dot{\theta}$	Angular velocity of the pendulum		rad/s
θ	Angular position of the pendulum		rad
$\ddot{x}$	Cart acceleration		m/s^2
$\dot{x}$	Speed of the cart		m/s
x	Position of the cart		m

In this section, the nonlinear model of the inverted pendulum is found using Newton's laws and linearized around the defined operating point (Michigan, 2022). When Newton's second rule is applied to motion in the x direction;

$$\ddot{x} = \frac{1}{M}\sum_{c} F_x = \frac{1}{M}(F - N - b\dot{x}) \tag{9}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{I}\sum_{p} \tau = \frac{1}{I}(-Pl\,sin\,\theta - Nl\,cos\,\theta) \tag{10}$$

The dynamic equations of the pendulum in the x and y directions are as follows.

$$N = \sum_{p} F_x = m\ddot{x}_s \tag{11}$$

$$P = mg + \sum_{p} F_y = mg + m\ddot{y}_s \tag{12}$$

The x and y position coordinates of the pendulum can be represented by equations as follows.

$$x_p = x + l\,sin\,\theta \tag{13}$$

$$\ddot{x}_p = \ddot{x} - l\dot{\theta}^2\,sin\,\theta + l\ddot{\theta}\,cos\,\theta \tag{14}$$

$$y_p = -l\cos\theta \tag{15}$$

$$\ddot{y}_p = l\ddot{\theta}\sin\theta + l\dot{\theta}^2\cos\theta \tag{16}$$

The following equations were obtained by using the equivalents in Equation 14 and Equation 16 instead of $\ddot{x}_{pendulum}$ and $\ddot{y}_{pendulum}$ values in Equations 11 and 12.

$$N = m\ddot{x} - ml\dot{\theta}^2 sin\theta + ml\ddot{\theta}cos\theta \tag{17}$$

$$P = mg + m(l\ddot{\theta}\sin\theta + l\dot{\theta}^2\cos\theta) \tag{18}$$

The following equations were obtained by using the equivalents in Equation 17 and Equation 18 instead of *N* and *P* values in Equation 9 and Equation 10.

$$M\ddot{x} + m\ddot{x} - ml\dot{\theta}^2 sin\theta + ml\ddot{\theta}cos\theta + b\dot{x} = F \tag{19}$$

$$Psin\theta + Ncos\theta - mgsin\theta = ml\ddot{\theta} + m\ddot{x}cos\theta \tag{20}$$

$$-Plsin\theta - Nlcos\theta = I\ddot{\theta} \tag{21}$$

$$I\ddot{\theta} + ml^2\ddot{\theta} + mglsin\theta = -ml\ddot{x}cos\theta \tag{22}$$

In order to get rid of the nonlinearity caused by the sin and cos functions in the above equations, the following approximations are made, assuming that the pendulum changes in a small range of ϕ in the equilibrium state.

$$cos\theta = cos(\pi + \phi) \approx -1 \tag{23}$$

$$sin\theta = sin(\pi + \phi) \approx -\phi \tag{24}$$

$$\dot{\theta}^2 = \dot{\phi}^2 \approx 0 \tag{25}$$

Thus, the following equations are obtained. (Also, *u* is used instead of *F*).

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} - ml\ddot{\phi} = u \tag{26}$$

$$(I + ml^2)\ddot{\phi} - mgl\phi = ml\ddot{x} \tag{27}$$

$$(M + m)X(s)s^2 + bX(s)s - ml\Phi(s)s^2 = U(s) \tag{28}$$

Taking the Laplace transform at zero initial conditions;

$$(I + ml^2)\Phi(s)s^2 - mgl\Phi(s) = mlX(s)s^2 \tag{29}$$

The transfer functions of the cart and pendulum obtained using Equation 28 and Equation 29 are obtained as shown below.

$$TF_c(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{\frac{(I + ml^2)s^2 - gml}{q}}{s^4 + \frac{b(I + ml^2)}{q}s^3 - \frac{(M + m)mgl}{q}s^2 - \frac{bmgl}{q}s} \quad \left[\frac{m}{N}\right] \tag{30}$$

$$TF_p(s) = \frac{\Phi(s)}{U(s)} = \frac{\frac{ml}{q}s}{s^3 + \frac{b(I + ml^2)}{q}s^2 - \frac{(M + m)mgl}{q}s - \frac{bmgl}{q}} \quad \left[\frac{rad}{N}\right] \tag{31}$$

Here q;

$$q = \left((M + m)(I + ml^2) - (ml)^2\right) \tag{32}$$

To do simulation work, an inverted pendulum model with a cart can be constructed using Equations 30 and Equations 31. The mathematical expressions created in the literature for the inverted pendulum system are given in the section so far. These statements are essential for analytics-based controller designs and analysis. These expressions were used during the modeling of the inverted pendulum system in Simulink and the realization of simulation studies.

2.3. Design of PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$ controller based on reference model and optimization

In the study, the optimization-based model reference-based design of the PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$ controller was carried out in the Simulink environment. The block diagram used is shown in Figure 2.

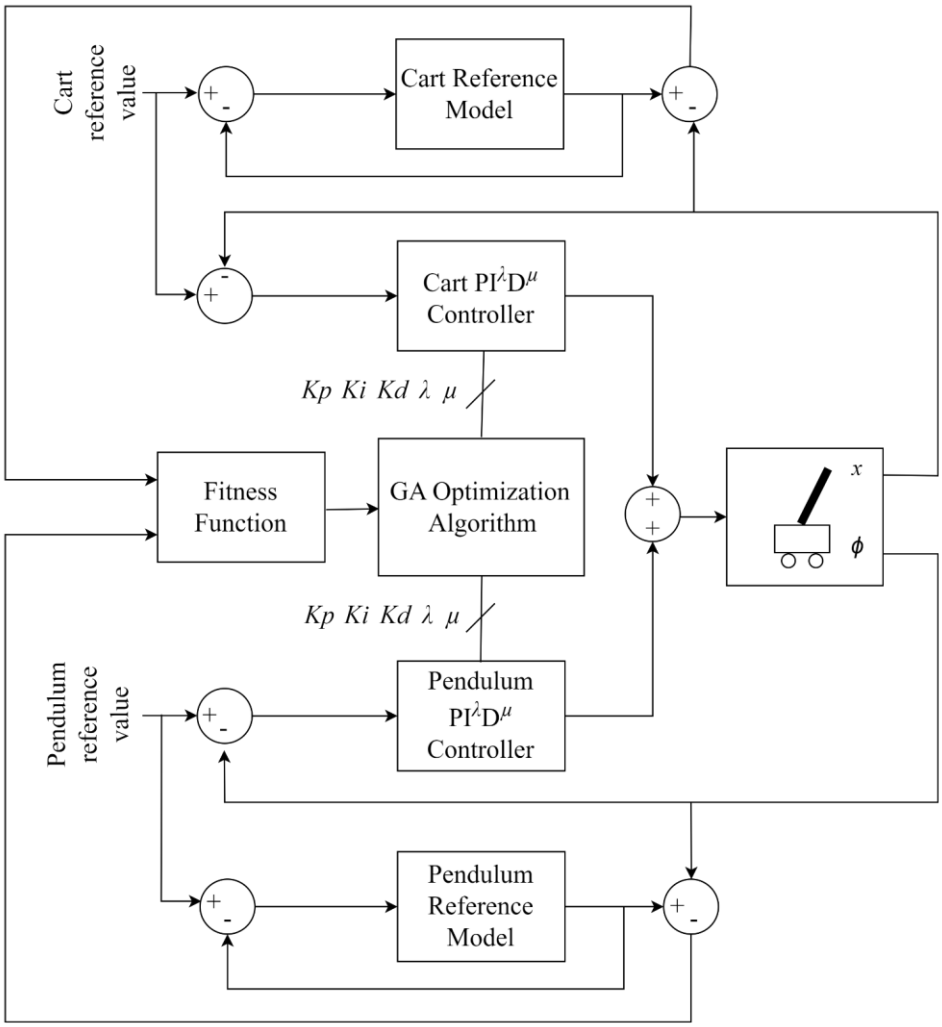


Figure 2. Block diagram representation of the study.

In the block representation in Figure 2, the angular position control of the bar and the vehicle position control were performed with two separate PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$ controllers. In addition, two predetermined reference models are used for the desired output response of the vehicle position and for the output response of the bar position. The objective function is formed by taking the instantaneous position of the vehicle and the instantaneous position of the bar and the differences between these two reference model outputs. The optimization algorithm tries to reach the objective function to zero value by changing the K_p, K_i, K_d, λ, and μ parameters of the PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$ controllers by looking at the change of the objective function in each cycle. When the objective function reaches the closest possible value to zero, the vehicle position and the position of the bar converge to the reference model response. Thus, the most suitable K_p, K_i, K_d, λ, and μ parameters for PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$ controllers are reached. The genetic algorithm was used as the optimization algorithm in the study.

In control systems based on the reference model, it is important to determine the response of an ideal system. Bode's ideal transfer function was used to create the reference models. Bode in 1945, defined the open-loop transfer function of a feedback control system expressed as in Equation 33.

$$L(s) = \left(\frac{\omega_c}{s}\right)^{\gamma}, \quad \gamma \in R \tag{33}$$

In Equation 33, ω_c is the gain crossover frequency and hence $|L(j\omega_c)| = 1$ The parameter γ is the slope of the amplitude curve and can be expressed as a fractional or integer on a logarithmic scale. The transfer function $L(s)$ is a fractional derivative for $\gamma < 0$ and a fractional integrator for $\gamma > 0$. The closed-loop transfer function with negative unit feedback for Bode's fractional ideal transfer function shown in Equation 34 is given in Figure 3 (Barbosa et al., Doğruer et al.).

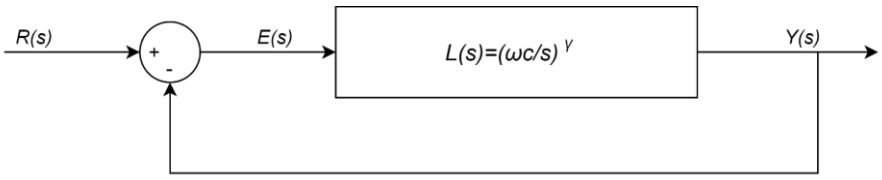


Figure 3. Bode's ideal fractional degree transfer function.

$$T(s) = \frac{L(s)}{1 + L(s)} = \frac{1}{(s/\omega c)^{\gamma} + 1}, \qquad \gamma \in R^{+} \tag{34}$$

In Equation 33, frequency and time domain characteristics can be obtained for different values of ω_c and γ. The following formulas can be used for the unit step characteristics of $T(s)$ (Barbosa et al, 2004).

Overshoot ratio M_p;

$$M_p = \frac{y_{max} - y(\infty)}{y(\infty)} \quad M_p \approx 0.8(\gamma - 1)(\gamma - 0.75)\ 1 < \gamma < 2 \tag{35}$$

Peak time T_p (1%);

$$T_p \approx \frac{1.106(\gamma - 0.255)^2}{(\gamma - 0.921)\omega_C}\ 1 < \gamma < 2 \tag{36}$$

Rising time T_r (1%);

$$T_r \approx \frac{0.131(\gamma + 1.157)^2}{(\gamma - 0.724)\omega_C}\ 1 < \gamma < 2 \tag{37}$$

Time constant T_c (2%);

$$T_r \approx \frac{0.2(\gamma - 1)^2 + 1}{\omega_C} \quad 1 < \gamma < 2 \tag{38}$$

Settling time T_s (2% and 5%);

$$T_s(2\%) \approx \frac{4}{cos(\pi - \frac{\pi}{\gamma})\omega_c} = \frac{4}{\zeta\omega_c} \qquad 1.39 < \gamma < 2 \tag{39}$$

$$T_s(5\%) \approx \frac{3}{cos(\pi - \frac{\pi}{\gamma})\omega_c} = \frac{3}{\zeta\omega_c} \qquad 1.44 < \gamma < 2 \tag{40}$$

In Equation 39 and 40, ζ = cos (π - π / γ) is the damping ratio.

In the study, Bode's ideal transfer function was used as reference model for both the cart and the pendulum. It is aimed that the cart and the pendulum move according to the time domain response appropriate to this model.

3. Simulation Studies

In this section, the determination of the K_p, K_i, K_d, λ and μ parameters of the $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controllers that will control the cart and the pendulum and the results obtained are presented. In the study, for the purpose of comparison, a traditional, in other words, fixed coefficient PID controller was also studied and the results obtained were presented. GA optimization is used for $PI^{\lambda}D^{\mu}$ and PID controller parameters. The reason why GA optimization is preferred is that it is preferred in many studies. Reference model blocks were created for the cart and pendulum using Bode's ideal transfer function with ω_c ve γ parameter values. After the reference models were created, the GA

optimization process was started. In the optimization process, $PI^{\lambda}D^{\mu}$ and PID controller parameters' lower and upper limit values were taken as given in Table 3.

Table 3. Using lower and upper limit values in optimization

Limit values	Cart					Pendulum		
	K_p	K_i	K_d	λ	μ	K_p	K_d	μ
Lower limit values	-5	-5	-5	0.01	0.01	-5	-5	0.01
Upper limit values	5	5	5	1	1	5	5	1

In the optimization, the population number is set to 30 and the stopping criterion is set to 200 iterations. Equation 41 was used as the fitness function. ITAE was used as a performance criterion.

$$J_{min} = \alpha * ITAE_{cart} + \beta * ITAE_{pendulum} \tag{41}$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \tag{42}$$

In equation 42, t is time, and $e(t)$ is the difference between the output of the cart pendulum and the reference model. α is the ITAE weight for the cart position and β is the ITAE weight for the pendulum position. In the study, optimization studies were carried out for different α and β weighting factors and for gain crossover frequency ω_c and γ parameters in the reference model in Equation 33. In order to provide real environmental conditions, [+10,-10] N control signal saturation block is placed at the input of the pendulum system modeled in the simulation environment. In addition, the working area of the card is determined as [+10,-10] m. When a 10 N input is applied to the cart, the cart travels 7.2 m. Based on this, a reference model was created for the cart by taking ω_c = 0.7 and γ = 1.01. Thus, sufficient rise time, settling time, and overshoot ratio values were obtained for cart position control. Compared to the cart, the pendulum's range of motion is much shorter. For the pendulum, it is aimed to cover an angle change of 90 in approximately 1 second. For this reason, ω_c =7.07 and γ =1.01 were chosen for the pendulum. In Figure 4 and Figure 5, the reference model's time responses obtained for values of ω_c and γ parameters are shown.

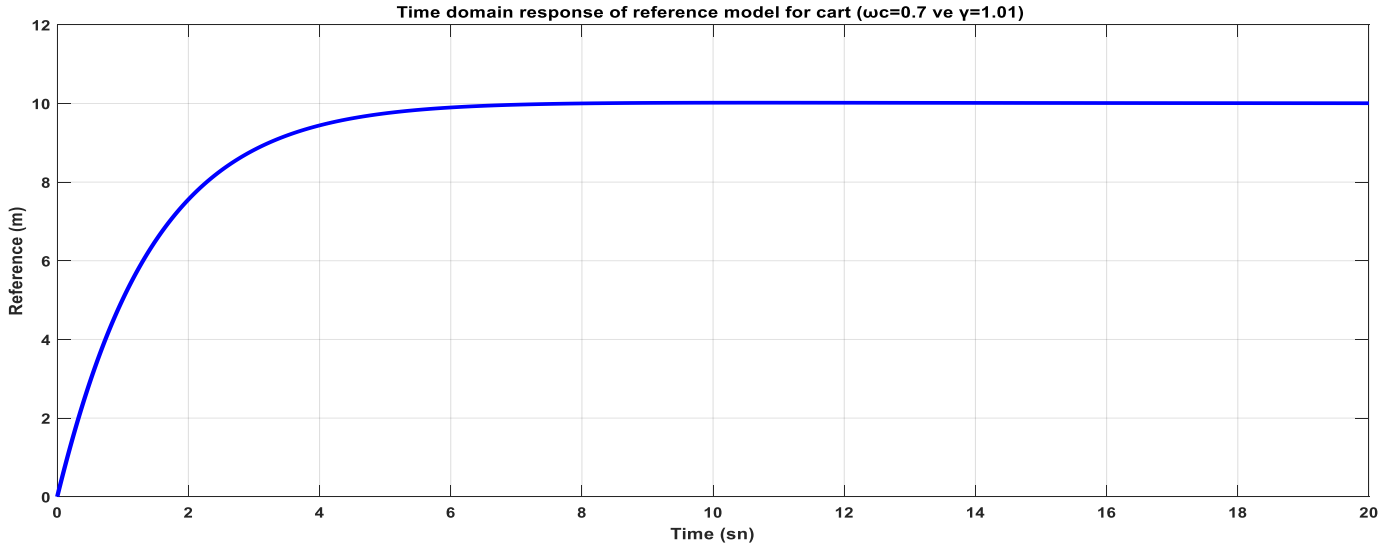


Figure 4. Time responses of the cart reference model for ω_c =0.7 and γ =1.01 values.

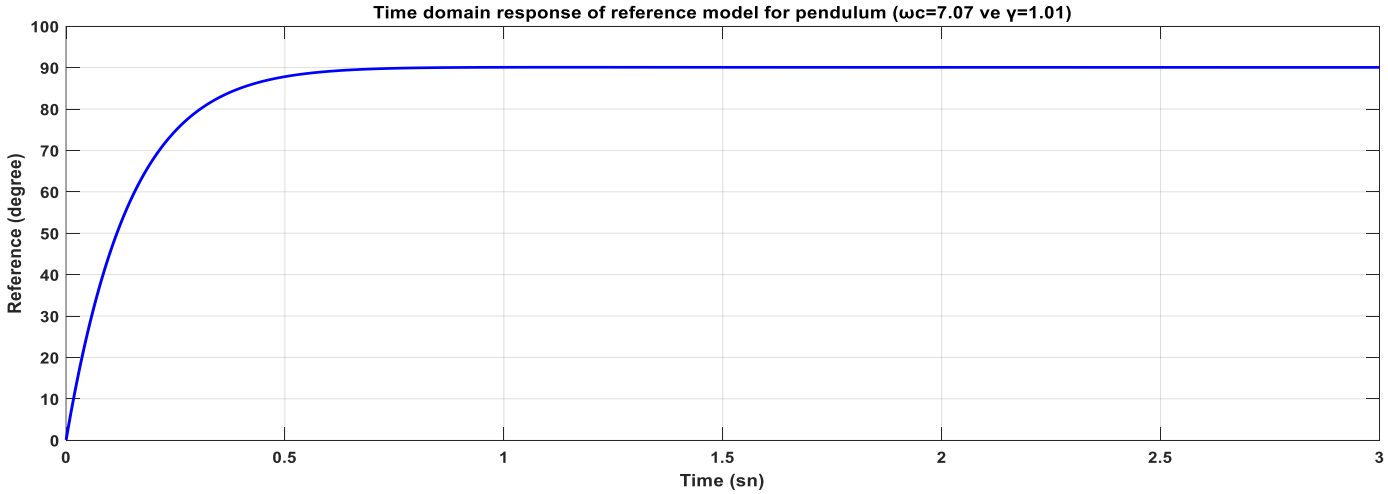
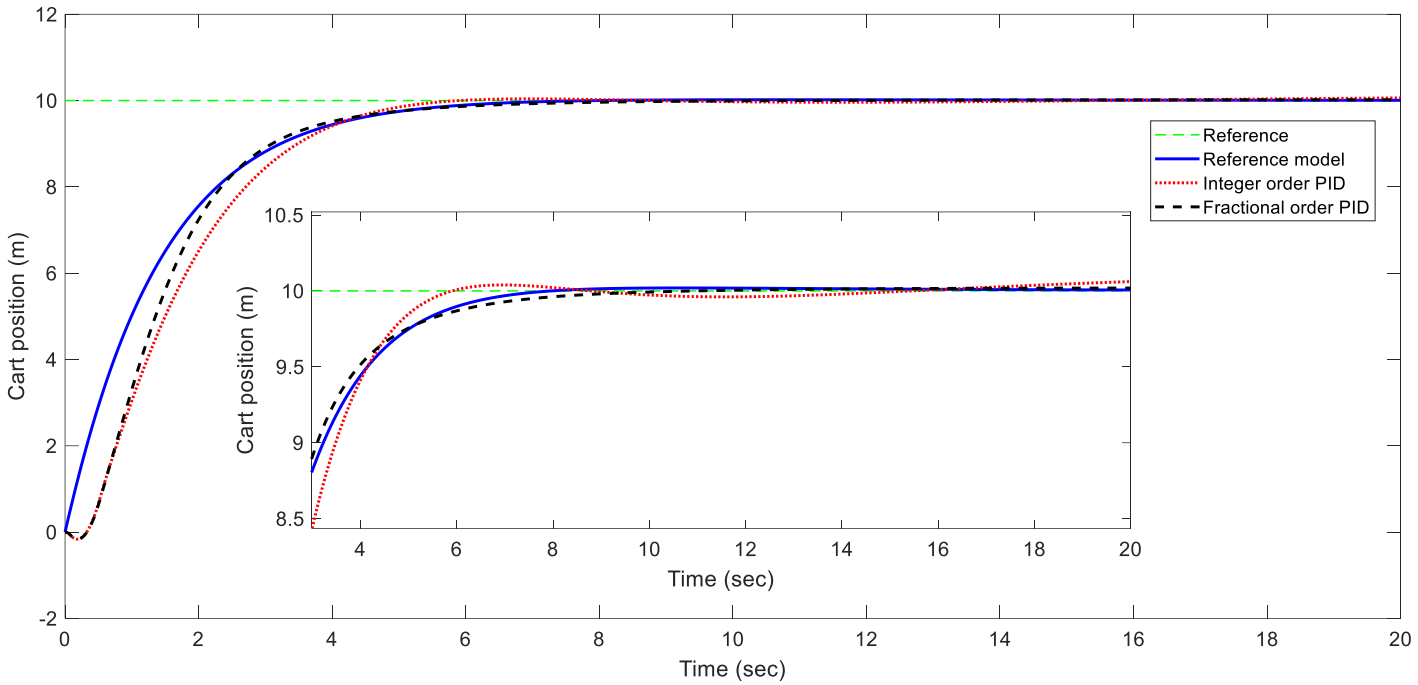


Figure 5. Time responses of the pendulum reference model for different ω_c =7.07 and γ =1.01 values.

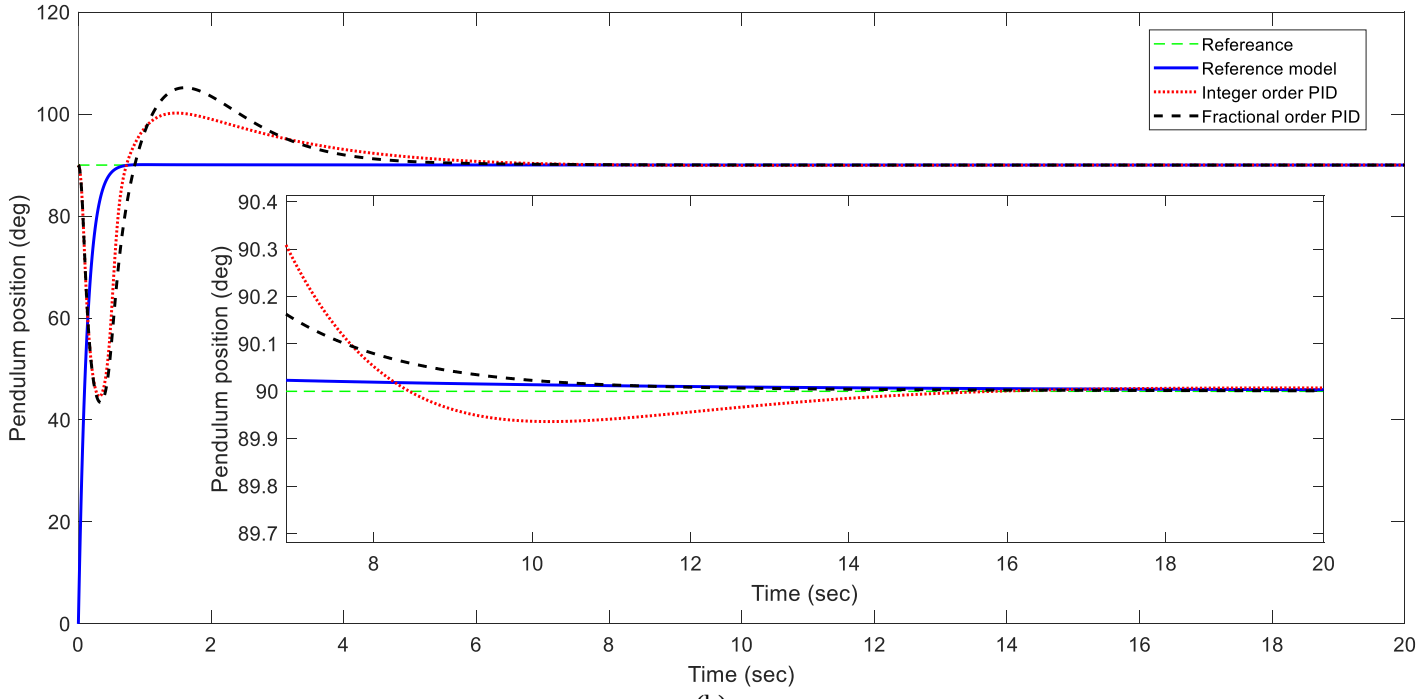
The simulation studies were repeated for different α and β parameters. Thus, the effects of α and β parameters in the fitness function given in Equation 41 on the controller design performance were investigated. As a result of repeated studies, it was seen that the fitness function was minimized at a good rate for the weight values of α=0.9 and β=0.1, and the cart and pendulum references could be captured well. Controller parameters obtained as a result of the GA optimization are given in Table 4. Obtained control results using the controller parameters in Table 4 for constant reference are also presented in Figure 6.

Table 4. Obtained controller parameters using the optimization

Controllers	Obtained parameters							
	Cart					Pendulum		
	K_p	K_i	K_d	λ	μ	K_p	K_d	μ
PID	-0.532	-0.0078	-2.771	-	-	0.720	0.111	-
$PI^{\lambda}D^{\mu}$	-1.364	-0.049	-3.575	0.342	0.951	0.571	0.130	0.916



(a)



(b)

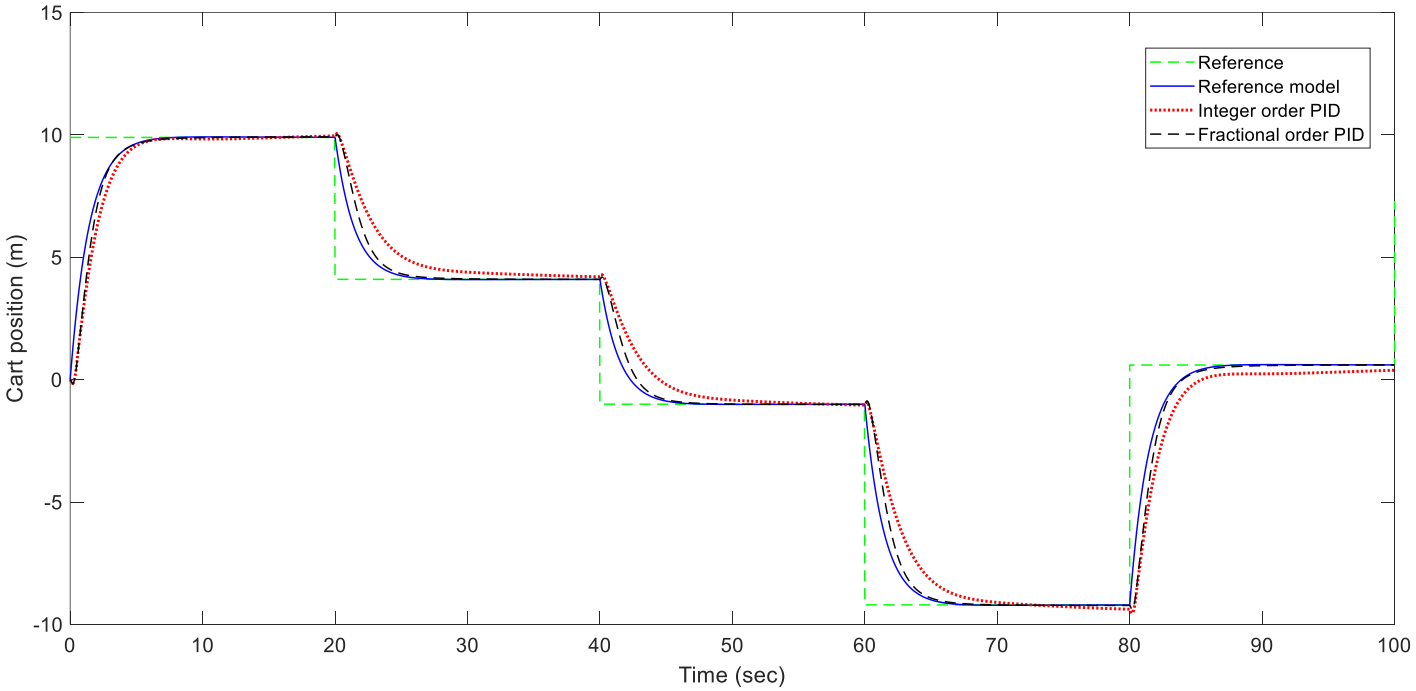
Figure 6. Cart and pendulum positions for constant reference value according to optimization results. (a) Cart position, (b) Pendulum position.

The position control graph of the cart is given in Figure 6.a, and the position control graph of the pendulum is given in Figure 6.b. As a result of the optimization, as seen in Figure 6.a, it was possible to approach the reference model more with the $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller. In Figure 6.b, the $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller has a larger overshoot than the other integer-order PID controller, but the reference model can be approached in a shorter time. In Table 5, ITAE values of the error between the position outputs and the reference model of the $PI^{\lambda}D^{\mu}$ and integer-order PID controllers are presented for comparison purposes. ITAE values show that the output obtained from the $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller is getting closer to the reference model.

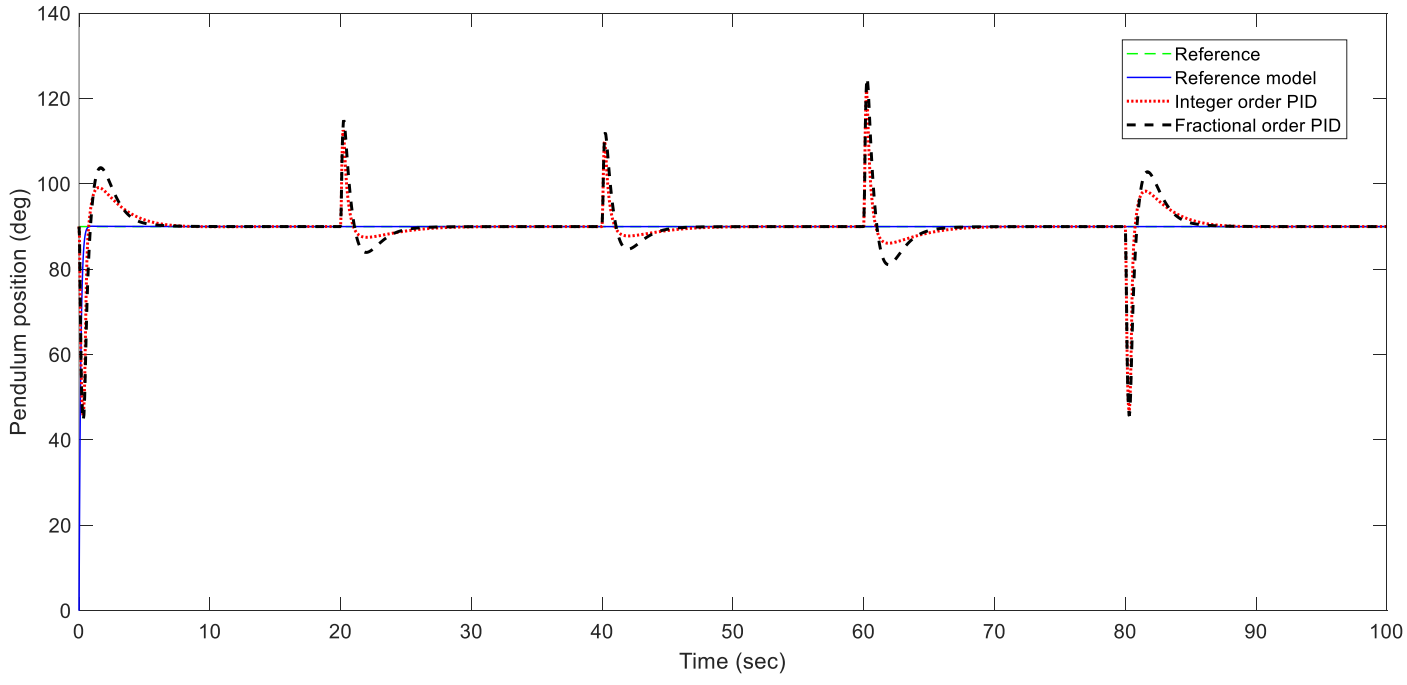
Table 5. ITAE performance indices of PID and $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controllers for constant references

Controllers	ITAE performance values	
	Cart	Pendulum
PID	27.9117	77.4239
$PI^{\lambda}D^{\mu}$	23.4737	76.4408

The study was repeated for different reference values. Cart and pendulum time response graphs according to different cart reference values are presented in Figure 7, and ITAE values are shown in Table 6 for comparison of the results obtained.



(a)



(b)

Figure 7. Cart and pendulum positions for different references according to optimization results. (a) Cart position, (b) Pendulum position.

Table 6. ITAE performance indices of PID and $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controllers for different references

Controllers	ITAE performance indices Cart	Pendulum
PID	4707.8	6032.0
$PI^{\lambda}D^{\mu}$	3097.2	7793.7

Figure 7.a shows the position change of the cart. Obviously, with the $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller, the reference value could be captured much better with short rising and settling times. It is seen that the rising time and settling time are longer in the output response obtained for the integer-order PID controller. For this reason, the ITAE value given in Table 6 is lower in the $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller. In the pendulum position change graph in Figure 7.b, it is seen that there is a little overshoot in both controllers, but the overshoot value is slightly larger in the $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller. Accordingly, as seen in Table 6, the ITAE value in the pendulum was also slightly higher.

4. Results and Discuss

This study, it is aimed to find the parameters of the $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller with the GA optimization method according to the time domain responses of reference models. The same study was also carried out for the PID controller for comparison purposes. The study was carried out as a simulation study on an inverted pendulum system with a single-input multiple-output (SIMO) structure. In the inverted pendulum system, two separate $PI^{\lambda}D^{\mu}$ and PID controllers and two separate reference models are used for the cart and the pendulum. With the GA optimization, the output response of the inverted pendulum system can be approximated to the reference model by adjusting the K_p, K_i, K_d, λ, and μ parameters of these two controllers. Bode's ideal transfer function of fractional order is used as the reference model. Reference models were obtained for different values of ω_c and γ parameters in Bode's ideal transfer function.

In the GA optimization, a fitness function based on the α-weighted ITAE value for the cart and the β-weighted ITAE value for the pendulum is used. Sequential simulation studies were carried out for different α and β parameters in the fitness function and for different ω_c and γ parameter values in the reference models. Thus, the effects of these parameters on the controller design performance were investigated. According to the results obtained by the simulation studies, it has been observed that the α and β parameters in the fitness function seriously affect the controller performance in the position control of the cart and the angle control of the pendulum in the inverted pendulum system. By increasing the α factor, the cart position output approaches the reference model created for the position. Similarly, by increasing the β weight factors, the angle output of the pendulum approaches its reference model. As a result of repeated studies, the best results were obtained for the weighting factors of α=0.9 and β=0.1 in the optimization function. The selection of α and β weight factors according to the desired performance expectations from the system is important in terms of design. As a continuation of the study, carrying out the proposed method on a real inverted pendulum system will be useful for the confirmation of the findings.

References

Astrom KJ. (1995). PID controllers: theory, design and tuning. Instrt Soc Am.

Azarmi R., Tavakoli-Kakhki M., Sedigh A. K. & Fatehi A. (2015). Analytical design of fractional order PID controllers based on the fractional set-point weighted structure: Case study in twin rotor helicopter, Mechatronics Volume 31, 222-233.

Barbosa R. S., Machado J. A. T. & Ferreıra I. M., (2004). Tuning Of Pıd Controllers Based On Bode's Ideal Transfer Function, Nonlinear Dynamics 38: 305–321.

Bouafoura M. K. & Braiek N. B. (2010). PIλDμ controller design for integer and fractional plants using piecewise orthogonal functions. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 15 (5), 1267-1278.

Carlson G. & Halijak C. (1964). Approximation of fractional capacitors (1/s)(1/n) by a regular Newton process, IEEE Transactions on Circuit Theory, 11:2, 210-213.

Castillo F.J., Feliu V., Sánchez L., Rivas R. & Jaramillo V.H. (2010). Robust PDα Time-Domain Tuning Rules for Controlling DC-Motors. The 4th IFAC Workshop Fractional Differentiation and its Applications, Badajoz, Spain.

Castillo F.J., Feliu V., Sánchez L., Rivas R. & L.Sánchezc. (2010). Design of a class of fractional controllers from frequency specifications with guaranteed time domain behavior. Computers & Mathematics with Applications, 59(5), 1656-1666.

Charef A., Sun H., Tsao Y. & Onaral B. (1992). Fractal system as represented by singularity function, IEEE Transactions on Automatic Control, 37:9, 1465-1470.

Chao H., Luo Y., Di L. & Chen Y.Q. (2010). Roll-channel fractional order controller design for a small fixed-wing unmanned aerial vehicle. Control Eng Prac 18(7), 761–72.

Deniz F. N., Yüce A. & Tan N. (2019). Tuning of PI-PD Controller Based on Standard Forms for Fractional Order, 8 (1), 5-21.

Deniz F. N., Yüce A., Tan N. & Atherton D. P. (2017). Tuning of Fractional Order PID Controllers Based on Integral Performance Criteria Using Fourier Series Method, IFAC PapersOnLine 50-1, 8561–8566.

Doğruer T., Yüce A. & Tan N. (2017). PID Controller Design Using Optimization Method for Fractional Order Control Systems with Time Delay, Gaziosmanpasa Journal of Scientific Research, 6, Special Issue, (ISMSIT2017), 30-39.

Doğruer T., Yüce A. & Tan N. (2017). PID Controller Design Based on Reference Model in Fractional Order Control Systems, Bilge International Journal of Science and Technology Research, 1 (1), 52-58.

Doğruer T. & Tan N., (2020). Real Tıme Control of Twin Rotor Mimo System With PID and Fractional Order PID Controller, Mugla Journal Of Science And Technology 6, 1-9.

El-Khazali R. (2013). Fractional-order PIλDμ controller design, Computers & Mathematics with Applications Volume 66, Issue 5, 639-646.

Hamamci S. E & Koksal M. (2010). Calculation of all stabilizing fractional-order PD controllers for integrating time delay systems. Computers & Mathematics with Applications, 59 (5), 1621-1629.

Keyser R. D., Muresan C. I. & Ionescu C. M. (2016). A novel auto-tuning method for fractional order PI/PD controllers, ISA Transactions Volume 62, 268-275.

Keyser R. D., Muresan C. I. & Ionescu C. M. (2018). "Autotuning of a Robust Fractional Order PID Controller", IFAC PapersOnLine 51-25, 466–471.

Luo Y. & Chen Y.Q. (2009). Fractional-order [Proportional Derivative] Controller for Robust Motion Control: Tuning Procedure and Validation, 2009 American Control Conference, St. Louis, Missouri, USA.

Matsuda K. & Fujii H. (1993). H (infinity) optimized wave-absorbing controlAnalytical and experimental results, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 16:6, 1146-1153.

Michigan. (2022). Author. Retrieved from https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=InvertedPendulum&section=SystemModeling

Muresan C. I., Dulf E. H. & Both R. (2016). Vector-based tuning and experimental validation of fractional-order PI/PD controllers, Nonlinear Dyn, 84, 179–188.

Muresan C. I. & Keyser R. D., (2022). Revisiting Ziegler–Nichols. A fractional order approach, ISA Transactions Volume 129, Part A, 287-296.

O'Dwyer A.. (2006). Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules, Imperial College Press, http://dx.doi.org/10.1142/9781860949104

Oustaloup A., Levron F., Mathieu B. & Nanot F. M.. (2000). Frequency-band complex noninteger differentiator: characterization and synthesis, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 47:1, 25-39.

Ozyetkin M. M, Onat C. & Tan N. (2020). PI-PD controller design for time delay systems via the weighted geometrical center method. Asian Journal of Control, 22 (5), 1811-1826.

Podlubny I. (1999). Fractional-Order Systems and PIλDμ-Controllers, IEEE Transactions on Automatic Control, 44(1), 208 - 214.

Podlubny I., Petráš I., Vinagre B. M., O'leary P. & Dorčák Ľ. (2002). Analogue realizations of fractional-order controllers, Nonlinear dynamics, 29,1-4, 281-296.

Shah P. & Agashe S. (2016). Review of fractional PID controller, Mechatronics 38, 29–41,

Shankaran V. P., Azid S. I. & Mehta U., (2022).Fractional-order PI plus D controller for second-order integrating plants: Stabilization and tuning method, ISA Transactions Volume 129, Part A, 592-604.

Valério D. & da Costa JS. (2011). Introduction to single-input, single-output fractional control. IET Control Theory Appl 5(8), 1033–57.

Yeroglu C. & Tan N.. (2011). Note on fractional-order proportional–integral–differential controller design, Volume 5, Issue 17, 1978 – 1989.

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development
UMAGD, (2023) 15(2), 820-827.
10.29137/umagd.1298404
Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Temmuz/July 2023
Araştırma Makalesi / Research Article

5G Yukarı Link Haberleşmesinde Makine Öğrenmesi ile Dalga Şekli Karar Yöntemi

Waveform Decision Method with Machine Learning for 5G Uplink Communications

Ayça Hançer[1], Ahmet Yazar [2*]

[1]Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 26040 Eskişehir, TÜRKİYE
[2]Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, 26040 Eskişehir, TÜRKİYE

***Başvuru/Received**: 17/05/2023* ***Kabul / Accepted**: 30/06/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 11/07/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 14/07/2023*

Öz
5. Nesil (5G) iletişim sistemleri öncesinde hücresel haberleşme yukarı linkinde sadece tek bir dalga şekli kullanılmaktaydı. İlk kez 2018 yılında standartları yayımlanmaya başlayan 5G iletişim sistemlerinde ise yukarı link için iki farklı dalga şekli kullanılabilmesi esnekliği getirilmiştir. Bununla beraber, bu esnekliğin yönetimini sağlayacak metotlar standartlarda geliştiriciye bırakılmıştır. Bu çalışmada, 5G iletişim sistemlerindeki yukarı link dalga şeklinin seçtirilmesine yönelik makine öğrenmesi tabanlı özgün bir metot geliştirilmiştir. Geliştirilen bu metot, çevresel farkındalığı yüksek seviyede olacak şekilde tasarlanmıştır.

Anahtar Kelimeler
"5G, Çevresel farkındalık, Dalga şekli, Makine öğrenmesi, Yukarı link haberleşmesi."

Abstract
Prior to 5th generation (5G) communications systems, only a single waveform was used in the cellular communications uplink. In 5G communications systems, the standards of which were released for the first time in 2018, the flexibility of using two different waveforms for the uplink has been introduced. However, the methods to ensure the management of this flexibility are left to the designer in the standards. In this study, a novel machine learning-based method is developed for uplink waveform selection in 5G communications systems. The proposed method is designed to have a high level of environmental awareness.

Key Words
"5G, Environment awareness, Waveform, Machine learning, Uplink communications."

***Sorumlu Yazar:** ahmet.yazar@ogu.edu.tr*

1. Giriş

Gelişen teknoloji ile birlikte mobil iletişim altyapılarına ihtiyaç duyan uygulamaların çeşitliliğinin giderek daha fazla arttığı görülmektedir (Yazar, 2021). 5. Nesil (5G) ile beraber ilk defa birden fazla uygulama grubu tanımlanarak gelişmiş mobil genişbant (eMBB), ultra güvenilir ultra düşük gecikmeli haberleşme (URLLC) ve çok sayıda makine tipi haberleşme (mMTC) olmak üzere üç grup yeni iletişim teknolojilerinin geliştirilmesine temel olarak kullanılmaya başlanmıştır (ITU, 2015). Bu uygulama çeşitliliğine cevap verebilmek adına 5G iletişim sistemleri ile beraber alt teknolojilerde esnek tasarımların kullanılması önem kazanmıştır (Yazar vd., 2020). 5G sonrasında ise daha fazla uygulama çeşitliliği ve bunun sonucu olarak daha fazla esnek tasarımlı teknolojilerin görüleceği öngörülmektedir (Yazar vd., 2020). Literatürde uygulama çeşitliliklerine yönelik araştırmalar yapılarak 6. Nesil (6G) için farklı uygulama gruplarının tanımlanması amacıyla ön çalışmalar sürdürülmektedir (Dang vd., 2020; Saad vd., 2020; Zhang vd., 2019; Zong vd., 2019). Bunun haricinde, geliştirilmeye çalışılan esnek teknoloji konularından önemli bir tanesi de dalga şekli tasarımlarıdır.

Dalga şekli tasarımları, kablosuz iletişimde kritik öneme sahip alt sistemler olarak geçmektedir. Vericiden gönderilecek kiplenmiş sinyallerin, kablosuz haberleşme kanalına karşı dayanıklı hale getirecek şekilde paketlenmesi ve diğer yandan radyo spektrumunun en verimli şekilde kullanılması dalga şekli teknikleri ile tasarlanmaktadır (Yazar ve Arslan, 2020b). Bu kapsamda, 5G haberleşmesinin standartlaştırma çalışmaları öncesinde farklı dalga şekillerinin karşılaştırılmasına yönelik birçok çalışma yapılmıştır (Yazar vd., 2016). Bu çalışmalarda farklı dalga şekillerinin üstünlükleri incelenerek en uygun 5G dalga şekli belirlenmeye çalışılmıştır (Femenias vd., 2017). Standartlaştırma sürecinde ise, 5G haberleşmesinde kullanılan dalga şekli tekniklerine yönelik özellik tanımlamaları 3GPP TR 38.211 standart dokümanı altında yapılmıştır (3GPP, 2022). Aşağı link iletişiminde ön ekli dikgen frekans bölmeli çoklama (CP-OFDM) dalga şekli ve ilişkili numerolojileri tercih edilmiştir. Yukarı link iletişiminde ise CP-OFDM haricinde tek taşıyıcılı frekans bölmeli çoklama (SC-FDM) dalga şekli de kullanılabilecektir. Görüldüğü üzere, 5G yukarı link iletişiminde iki farklı dalga şeklinin kullandırılabilmesi mümkündür. Daha önceki hücresel haberleşme standartlarında yukarı link iletişiminde tek tip bir dalga şekli tercih edilerek kullanılmaktaydı. Bu kapsamda 5G ile beraber yeni bir esneklik boyutu kazandırıldığı görülmektedir (Yazar vd., 2020).

Bahsedilen esnek alt teknoloji tasarımları çerçevesinde, 5G haberleşmesinde aşağı link için dalga şeklinin farklı parametreleri aynı kapsama alanı altında farklı kullanıcılara atanabilmektedir (3GPP, 2022). Bu noktada farklı dalga şekli parametreleri anlamına gelen numeroloji gruplarının kullanıcılara atanması sırasında optimizasyon yapılmasına yönelik literatürde çalışmalar bulunmaktadır (Yazar ve Arslan, 2018; Marijanovic vd., 2018; Correia vd., 2021; Kotagiri vd., 2022). Bunlar arasında, kullanılan numeroloji çeşitliliğinin ne kadar sayıyla sınırlandırılması gerektiğine yönelik olarak bir optimizasyon çalışması yapılmıştır (Yazar ve Arslan, 2018). Diğer bir çalışmada numeroloji seçimleri kaynak tahsisi optimizasyonu ile beraber yaptırılmak istenmiştir (Marijanovic vd., 2018). Farklı bir optimizasyon çalışması olarak, veri tabanlı olarak numeroloji tahsisi yapılan çalışmalar da bulunmaktadır (Correia vd., 2021; Kotagiri vd., 2022). Ayrıca bu çalışmalara ek olarak makine öğrenmesi kullanılan numeroloji tahsis yöntemleri de mevcuttur (Yazar ve Arslan, 2019; Lee vd., 2019; Yazar ve Arslan, 2020a). Makine öğrenmesinden yararlanmak için bu çalışmalarda ölçülen kanal bilgisi genelde doğrudan veri kümesi olarak ele alınmıştır. Her ne kadar dalga şekli ile yoğun şekilde ilgili olmasa da, literatürde yukarı link için radyo kaynaklarının dinamik yönetimine dair farklı çalışmalar da bulunmaktadır (Mathur vd., 2017; Tang vd. 2020).

5G yukarı link iletişimi için SC-FDM ve CP-OFDM tekniklerinin beraber kullanılabileceği, 3GPP organizasyonunun standart dokümanlarında belirtilmiştir (3GPP, 2022). Fakat literatür incelendiğinde, değişen şartlar altında bu dalga şekilleri arasından seçim yaptırıcı yönde optimizasyon yöntemlerinin henüz geliştirilmediği görülmektedir. Bu çalışmada bahsi geçen problem tanımı Şekil 1'de özet olarak verildiği üzere ele alınarak özgün bir yöntem geliştirilmiştir. Problem tanımlaması kapsamında, mevcut bölge şartlarında 5G yukarı link iletişiminde hangi dalga şekli daha uygundur sorusuna cevap aranmaktadır.



Şekil 1. Geliştirilen yöntem için problem tanımı özeti

Bu çalışma ile literatüre yapılan özgün katkılar şunlardır:

1. 5G yukarı link iletişiminde dalga şekli seçtirilmesine yönelik özgün bir yöntem geliştirilmiştir.
2. Çevre farkındalığı yüksek öznitelikler barındıran yeni bir yapay veri kümesi oluşturulmuştur.
3. Geliştirilen özgün yöntem kapsamında makine öğrenmesi tekniklerinden yararlanılmış, bu kapsamda kablosuz haberleşme sistemleri açısından örnek bir makine öğrenmesi uygulaması geliştirilmiştir.

Makalenin kalan kısımlarında incelenen konular şu şekildedir: 2. Bölüm kapsamında geliştirilen yönteme dair detaylar ve yapay veri kümesinin üretim süreci açıklanmıştır. Makine öğrenmesi sonuçları 3. Bölüm içerisinde verilmiştir. Son olarak, 4. Bölüm kapsamında yapılan çıkarımlar sunulmuştur.

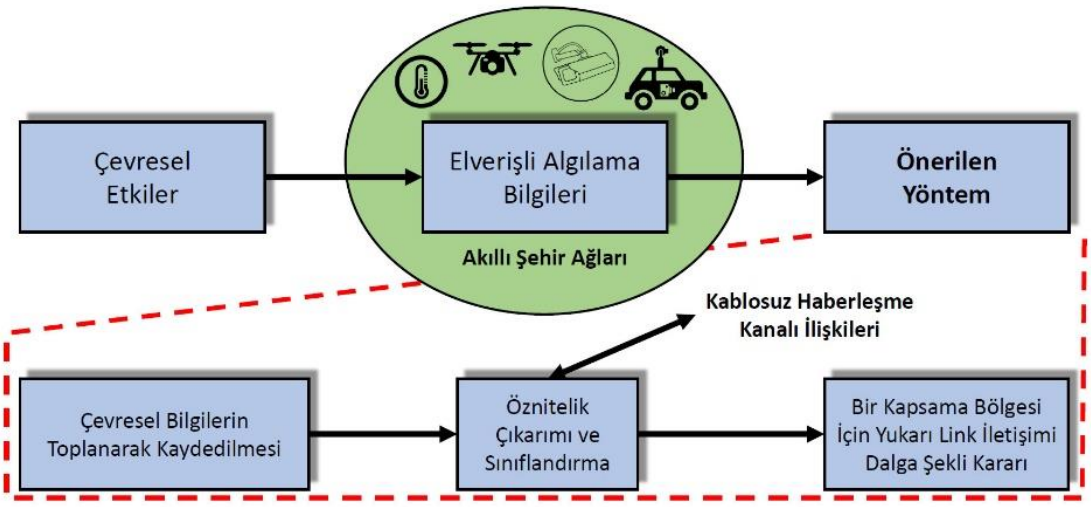
2. Materyal ve Metot

2.1. Dalga şekli karar yöntemi

Tek taşıyıcılı ve çok taşıyıcılı dalga şekillerinin birbirlerine karşı farklı üstünlükleri olabilmektedir. Tek taşıyıcılı dalga şekillerinin tepe güç ortalama güç oranı (PAPR) performanslarının daha iyi olması ve daha az hesaplama karmaşıklığı gerektirmesi sebebi ile yukarı link haberleşmede genelde tek taşıyıcılı dalga şekilleri tercih edilmektedir. 5G öncesinde 4. Nesil (4G, LTE) haberleşme sistemlerinin yukarı linki için bu sebeple tek taşıyıcılı bir dalga şekli olan SC-FDM kullanılmıştır. 5G iletişim ağlarında ise her ne kadar PAPR ve hesaplama karmaşıklığı açısından olumsuzlukları varsa da, ikinci bir yukarı link dalga şekli olarak CP-OFDM de kullanılması mümkün olmuştur. Çok taşıyıcılı bir dalga şekli olan CP-OFDM ile daha yüksek veri hızlarına çıkılabilmektedir. Dolayısıyla 5G yukarı link iletişiminde hem tek taşıyıcılı hem de çok taşıyıcılı dalga şekli kullanma esnekliği bulunmaktadır. Bir başka deyişle, bu çalışmada geliştirilen dalga şekli seçim karar yöntemi, aynı zamanda tek taşıyıcılı ve çok taşıyıcılı dalga şekilleri arasında seçim yapılabilmesini sağlamaktadır.

Geliştirilen yöntemin blok diyagramı Şekil 2 üzerinde sunulmaktadır. Öncelikle çevresel bilgilerin toplanarak kaydedilmesi sağlanmaktadır. Çevresel bilgiler kapsamında bir bölgeye ait coğrafi karakteristik, yerleşim planlaması, açık-kapalı (indoor-outdoor) mekan yoğunluğu, küçük hücre yoğunluğu, nüfus yoğunluğu ve hareketlilik ortalaması gibi özet bilgiler değerlendirmeye alınmaktadır. Bu bilgilerin akıllı şehir ağları üzerinden otomatik olarak toplandığı varsayımı kabul edilmiştir.

Kablosuz haberleşme kanalı ilişkilerinden yararlanılarak çevresel bilgiler üzerinden öznitelik çıkarımı yapılmaktadır. Dolayısıyla, çevresel etkiler, kablosuz haberleşme kanalı ve sınıf etiketi olan dalga şekli seçenekleri (CP-OFDM/Sınıf 1 ve SC-FDM/Sınıf 2) arasında ilişkiler kurulmaktadır. Bu çalışmada iki farklı sınıf etiketi kullanılmıştır. Önerilen yöntem bu sınıflardan bir tanesini seçerek bir kapsama bölgesinde yukarı link iletişimi için dalga şekli kararı almaktadır.



Şekil 2. Geliştirilen yöntem için blok diyagram

2.2. Yapay veri kümesi üretimi

Dalga şekli karar yönteminin güdümlü öğrenme tabanlı uygulanabilmesi için bir veri kümesine ihtiyaç olmuş, bu kapsamda yapay bir veri kümesi üretilmiştir. Literatürdeki mevcut veri kümeleri incelendiğinde bu çalışmanın ele aldığı konuya yönelik örnek bir veri kümesine rastlanılamamıştır. Gerçek dünya verisine dayalı bir veri kümesi oluşturulmamasının sebebi ise, yapay veri kümelerinin hem daha hızlı ve az iş gücü ile üretilebilmesi, hem de yapay veri kümelerinde gerçek dünyada az rastlanan senaryo durumlarının istenildiği kadar oluşturulabilmesi sebebiyle daha dengeli bir veri kümesi üretilebilmesidir. Literatürde özellikle son yıllarda yapay veri kümeleri öne çıkmaktadır (Emam, 2020; Nikolenko, 2021).

Yapay veri kümesi oluşturulması sırasında ilk öncelikle her örneklem için sınıf etiketi oluşturulmaktadır. Bu sınıf etiketi üretildikten sonra özniteliklerin oluşturulması sağlanmaktadır. Özniteliklerin 1-10 arasında normalize edilmiş değerleri şu üç etkene bağlı şekilde elde edilmektedir: 1) Öznitelik karakteristiği, 2) kablosuz haberleşme kanalı ilişkisi, 3) sınıf etiketi ilişkisi. Öznitelik karakteristikleri ve kablosuz haberleşme kanalı ilişkileri Tablo 1 üzerinde özet olarak sunulmaktadır. Aynı tabloda ayrıca öznitelikler için normalize değer aralıkları ve bilgi kazanımı değerleri verilmektedir. Aşağıda ise detay açıklamalar yapılmıştır.

Tablo 1. Öznitelik Tanımları ve Kablosuz Haberleşme Kanalı İlişkileri

Öznitelik No	Öznitelik Tanımı	Temel Kablosuz Haberleşme Kanalı İlişkisi	Normalize Değer Aralığı	Bilgi Kazanımı
1	Coğrafi Karakteristik	• Zorlu çevre koşullarında zengin çoklu yol etkileri ortaya çıkmaktadır	Basit (1) – Zorlu (10)	0.146
2	Yerleşim Planlaması	• Kentsel senaryolarda zengin çoklu yol etkilerinin oluşma ihtimali artmaktadır. • Yol kaybı karakteristiği çokça değişim göstermektedir.	Kırsal (1) – Kentsel (10)	0.138
3	Açık-Kapalı Mekan Yoğunluğu	• Yol kaybı karakteristiği çokça değişim göstermektedir. • Yüksek girişim ihtimali artmaktadır.	Açık (1) – Kapalı (10)	0.153
4	Küçük Hücre Yoğunluğu	• Yol kaybı karakteristiği çokça değişim göstermektedir. • Yüksek girişim ihtimali artmaktadır.	Seyrek (1) – Yoğun (10)	0.149
5	Nüfus Yoğunluğu	• Spektral verimlilik önemli bir kriter olmaktadır. • eMBB hizmet sınıfı ile yakın ilişkili olmaktadır. • Kanal kapasitesinin arttırılmasını gerektirmektedir.	Seyrek (1) – Yoğun (10)	0.144
6	Hareketlilik Ortalaması	• Yüksek hareketlilik Doppler yayılımı oluşturmaktadır. • URLLC hizmet sınıfı ile yakın ilişkili olmaktadır. • URLLC gereksinimlerinin karşılanabilmesi için, daha az gecikme yayılımı ve Doppler yayılımı olmalıdır.	Yavaş (1) – Hızlı (10)	0.152

*eMBB : gelişmiş mobil genişbant, URLLC: ultra güvenilir ultra düşük gecikmeli haberleşme

İlk öznitelikler olarak coğrafi karakteristik ve yerleşim planlaması ele alınmaktadır. Bir bölgenin coğrafi karakteristiğinin değişimi kablosuz haberleşme kanalına doğrudan etki eden faktörlerden önemli bir tanesidir. Zorlu coğrafya şartları genelde zengin çoklu yol (multipath) etkilerini beraberinde getirmektedir. Dağlık arazi, ormanlık bölge, deniz ya da büyük bir göle yakınlık gibi coğrafi özellikler haberleşme kanalına etki edebilmektedir (Yarkan ve Arslan, 2008). Benzer şekilde bir bölgedeki yerleşim planlamasının da çoklu yol etkileri açısından ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Kentsel bir yerleşim planlamasında çoklu yol etkileri kırsal alan yerleşim planlamasına kıyasla daha fazla olmaktadır (Yarkan ve Arslan, 2008). Buna ek olarak, yerleşim planlamasının yapısına göre yol kaybı karakteristiği de değişim göstermektedir. İlk iki öznitelik için görüldüğü üzere çoklu yol ve yol kaybı etkileri ile yakın bir ilişki bulunmakta, sonuç olarak da zorlu coğrafya şartlarında ve kentsel yerleşim planlamalarında yukarı link iletişimde CP-OFDM (Sınıf 1) dalga şeklinin kullanımı tercih edilebilmektedir. Normalize edilmiş öznitelik değerleri Tablo 1 üzerinde verilen sınır değerleri çerçevesinde 1-10 değerleri arasında değişecek şekilde yapay veriler üretilmiştir.

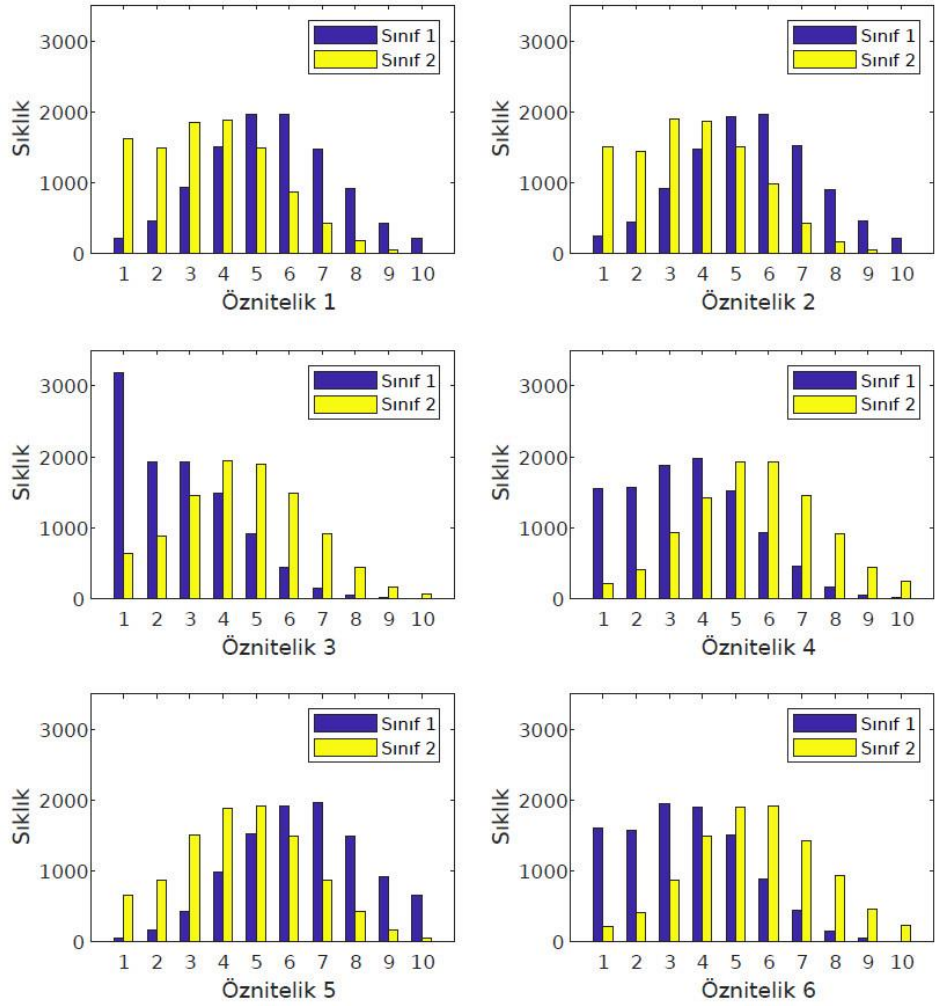
Bir bölgedeki açık-kapalı mekan yoğunluğu diğer bir öznitelik olarak veri kümesi üretimine dahil edilmiştir. Çarşı, pazar, yollar ve stadyum gibi yerlerde açık mekan yoğunluğu daha fazlayken, yüksek sayıda yerleşim olan bölgelerde kapalı mekan yoğunluğu daha fazla olabilmektedir. Bu yoğunluk dağılıma göre yol kaybı karakteristiği de oldukça değişmektedir. Kapalı mekan yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde yol kayıpları daha fazla olacak şekilde bir ilişki ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, kapalı mekan yoğunluğu olan bölgelerde SC-FDM (Sınıf 2) dalga şekli daha ön planda olacak şekilde tercihlerin yapılması makuldur.

Diğer bir öznitelik olarak, bir bölge kapsamında küçük hücre yoğunluğu yukarı linkte dalga şekli seçimine etki edebilecektir. Bu yoğunluk yüksek olduğunda girişim olasılıkları daha fazla ortaya çıkacaktır. Bununla beraber, küçük hücre yapıları ile daha uyumlu olarak kullanılabilecek milimetre dalga frekansları için yol kaybı etkileri büyük önem taşımaktadır. Yüksek frekanslarda doğal olarak

yol kaybı etkilerinde artış gerçekleşmektedir. Bu sebeple küçük hücre iletim noktalarının yaygın olduğu bölgelerde milimetre dalga iletişiminin daha etkin olacağı temel alındığında, SC-FDM (Sınıf 2) dalga şeklinin tercih edilmesi mümkündür.

Beşinci öznitelik olarak, bir bölgedeki nüfus yoğunluğu bilgisi ise spektrum verimliliği ve iletişim kapasitesi üzerinden kablosuz haberleşme kanalı ile ilişkilendirilebilmektedir. Yoğun nüfuslu bölgelerde çok taşıyıcılı dalga şekillerinden yararlanmak daha uygun görülmekte, CP-OFDM (Sınıf 1) bu anlamda öne çıkmaktadır. Çok taşıyıcılı dalga şekillerinin ölçeklenebilir yapısı sayesinde daha fazla kişiye daha yüksek kapasitede hizmet sunulabilmektedir. Ek olarak, eMBB uygulamaları da yoğun nüfusta daha fazla rol oynayacaktır.

Son öznitelik, bir bölgedeki genel hareketlilik ortalaması bilgisi olarak ele alınmıştır. Hareketliliğin yüksek olması mobil haberleşme kanalı açısından Doppler yayılımı olarak karşımıza çıkabilmektedir. Dolayısıyla haberleşme kanalı üzerinden genel hareketlilik ortalamasının önemli bir yeri vardır. Bu öznitelik ile ilgili olarak SC-FDM (Sınıf 2) dalga şekli tercih edilebilecektir.



Şekil 3. Kullanılan özniteliklerin sınıf etiketleri için dağılım çizimleri

3. Bulgular ve Tartışma

Veri kümesi önceki bölümde anlatıldığı şekilde MATLAB platformu kullanılarak 20000 örneklem ile oluşturulmuştur. Bu veri kümesine yönelik olarak, kullanılan özniteliklerden her biri için sınıf etiketi baz alınarak oluşturulan sıklık dağılım grafikleri Şekil 3'te verilmiştir. Görüldüğü gibi bu çalışmada tek bir öznitelik dikkate alınarak bir sınıflandırma yapılması çok mümkün değildir. Başarı oranını artırmak için özniteliklerin çoğunun kullanılması ve dengeli bir dağılım yapılması gerekmektedir. Tablo 1 ile verilen bilgi kazancı değerleri üzerinden de bu yönde bir değerlendirme yapmak mümkündür.

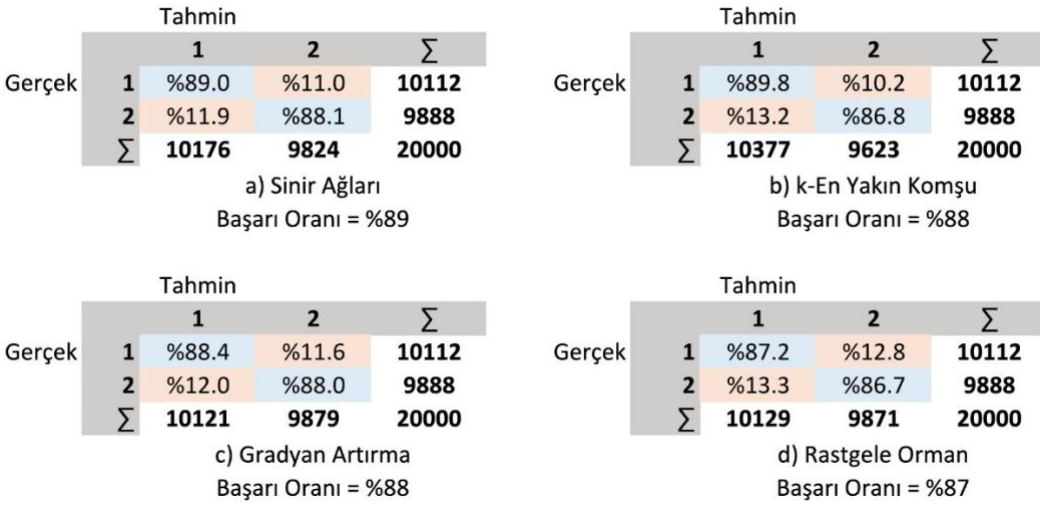
Tablo 2. En iyi Hiperparametreler ve Karşılık Gelen Başarı Oranları

Sınıflandırma Modeli	Hiperparametreler	Başarı Oranı	F1 Değeri
Sinir Ağları	En Fazla Döngü Sayısı = 200 Gizli Katman Sinir Sayısı = 10	0.886	0.886
k-En Yakın Komşu	Komşu Sayısı = 20	0.883	0.883
Gradyan Artırma	Ağaç Sayısı = 100 Öğrenme Oranı = 0.1	0.882	0.882
Rastgele Orman	Ağaç Sayısı = 15	0.869	0.869

Veri kümesi üzerinde herhangi bir öznitelik seçimi ya da öznitelik indirgeme işlemi yapılmadan, özniteliklerin hepsi dahil edilerek makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmış, bu kapsamda Sinir Ağları, k-En Yakın Komşu, Gradyan Artırma ve Rastgele Orman modelleri tercih edilmiştir. Bu modellerin eğitimi sırasında 5-katlamalı çapraz doğrulama yöntemi kullanılmış ve sonrasında elde edilen sonuçlar dikkate alınarak hiperparametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte en iyi hiperparametreler deneme yanılma yoluyla belirlenmiştir (Yang ve Shami, 2020; Yu ve Zhu, 2020). Bu kapsamda her bir öğrenme modeli için en iyi sonucu veren hiperparametreler ve karşılık gelen başarı sonuçları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Sinir Ağları modeli için en fazla döngü sayısı 200 ve gizli katman sayısı 10 seçildiğinde %89, k-En Yakın Komşu modeli için komşu sayısı 20 seçildiğinde %88, Gradyan Artırma modelinde ağaç sayısı 100 ve öğrenme oranı 0,1 seçildiğinde %88, Rastgele Orman modeli için ağaç sayısı 15 seçildiğinde %87 oranında başarı sağlanmıştır. Yapay veri kümesi üzerinden çalışıldığından ve bu sebeple veri kümesi üzerinde daha homojen bir dağılımın oluşması sebebiyle F1 değerleri başarı yüzdeleri ile benzer oluşmuştur. Tüm bu sonuçlara beraber bakıldığında, her model için uygun hiperparametreler seçildiğinde birbirine yakın başarı oranları elde edilmiştir. Bununla beraber, Sinir Ağları daha iyi sonuç veren bir makine öğrenmesi modeli olmuştur.

Şekil 4, Kullanılan makine öğrenmesi modelleri için elde edilen karmaşıklık matrislerini göstermektedir. Sinir Ağları (Şekil 4-a) modelinde 20000 tahmin içerisinde 1. sınıf etiketi (CP-OFDM) için %89.0, 2. sınıf etiketi (SC-FDM) için %88.1'lik doğruluk oranı hesaplanırken sırasıyla; k-En Yakın Komşu (Şekil4-b) modelinde 1. sınıf etiketi için %89.8, 2. sınıf etiketi için %86.8; Gradyan Artırma (Şekil4-c) modelinde 1. sınıf etiketi için %88.4, 2. sınıf etiketi için %88.0; Rastgele Orman (Şekil4-d) modelinde 1. sınıf etiketi için %87.2, 2. sınıf etiketi için %86.7'lik doğruluk oranı hesaplanmıştır. Yapay sinir ağlarının diğer algoritmalara göre daha iyi performans göstermesinin nedeni, lineer olmayan ilişkileri modelleyebilmesi, veriler arasındaki kompleks ilişkileri yakalayabilmesi ve yeterli genişlikteki veri kümeleri üzerinde yüksek performans gösterebilmesidir (Abd El-Hamid vd., 2019). Bununla beraber, diğer makine öğrenmesi algoritmaları da uygun hiperparametreler kullanıldığında Sinir Ağları ile alınan sonuçlara yakınlaşabilmiştir. Klasik bir makine öğrenmesi tekniği olmasına karşılık, k-En Yakın Komşu algoritması 1. sınıf etiketi için en iyi doğruluk oranı performansını göstermiş, fakat 2. sınıf etiketi için bu kadar başarılı olamamıştır.



Şekil 4. Karmaşıklık matrisleri

4. Sonuç

Yapılan çalışmanın sonuçlarına bakıldığında, 5G hücresel iletişim sistemlerinin yukarı linklerinde kullanılan farklı dalga şekilleri arasında otomatik seçim yaptırılabilmesini sağlayan işlevsel bir yöntemin geliştirildiği görülmektedir. Bu kapsamda makine öğrenmesinin kullanılması, farklı bilgi kaynaklarından gelen verilerin ortak analiz edilmesi sebebiyle anlamlı olmuştur.

6G haberleşmesinde daha fazla sayıda dalga şeklinin beraber çalışabilmesi öngörüsü ele alındığında, gelecek çalışmalarda ikiden daha fazla dalga şekli arasında seçim yaptırılabilmesine olanak tanıyan yöntemlerin geliştirilmesi söz konusu olabilecektir. Bununla beraber bu çalışmada kullanılan bilgi kaynaklarına kıyasla daha fazlasının girdi olarak sisteme dahil edilmesi sonrasında yeni yöntemlerin tasarlanması gerekebilecektir. Dolayısıyla, makine öğrenmesi açısından hem daha çok öznitelik, hem de daha çok sınıf etiketi ortaya çıkacaktır. Gelecek çalışmaların bu öngörü çerçevesinde şekillenmesinin faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma 122E400 no'lu Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) projesi kapsamında desteklenmiştir.

Referanslar

3GPP. 2022. "NR; Physical channels and modulation", Teknik Rapor, TR 38.211.

Abd El-Hamid, H. E. M. A. A., Khalifa, W., Roushdy, M. I., Salem, A. M. 2019. "Machine Learning Techniques for Credit Card Fraud Detection", Future Computing and Informatics Journal, 4(2), 98-112.

Correia, N., Al-Tam, F., Rodriguez, J. 2021. "Optimization of Mixed Numerology Profiles for 5G Wireless Communication Scenarios", Sensors, 21(4), 1-22.

Dang, S., Amin, O., Shihada, B., Alouini, M. 2020. "What should 6G be?", Nature Electronics, 3(1), 20–29.

El Emam, K. 2020. Accelerating AI with Synthetic Data (1. Basım). ABD: O'Reilly Media.

Femenias, G., Riera-Palou, F., Mestre, X., Olmos, J.J. 2017. "Downlink scheduling and resource allocation for 5G MIMO-multicarrier: OFDM vs FBMC/OQAM", IEEE Access, 5(1), 13770–13786.

International Telecommunication Union (ITU). 2015. "IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond", ITU Publications, M.2083-0.

Kotagiri, D., vd. 2022 "Context-based Mixed-Numerology Profile Selection for 5G and Beyond", IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), 611-616.

Lee, H., Vahid, S., Moessner, K. 2019. "Machine Learning Based RATs Selection Supporting Multi-connectivity for Reliability", International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks, 31-41.

Marijanovic, L., Schwarz, S., Rupp, M. 2018. "Optimal Numerology in OFDM Systems Based on Imperfect Channel Knowledge", IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 1-5.

Mathur, R.P., Pratap, A., Misra, R. 2017. "Distributed algorithm for resource allocation in uplink 5G networks", MobiMWareHN, Mobility, Interf. Middlew. Manag. HetNets, 1–6.

Nikolenko, S. I. 2021. Synthetic Data for Deep Learning (1. Basım). Springer.

Saad, W., Bennis, M., Chen, M. 2020. "A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems", IEEE Network, 34(3), 134-142.

Tang, F., Zhou, Y., Kato, N. 2020. "Deep Reinforcement Learning for Dynamic Uplink/Downlink Resource Allocation in High Mobility 5G HetNet", IEEE J. Sel. Areas Commun., 38(12), 2773-2782.

Yang, L., Shami, A. 2020. "On Hyperparameter Optimization of Machine Learning Algorithms: Theory and Practice", arXiv:2007.15745 [cs.LG].

Yarkan, S., Arslan, H. 2008. "Exploiting Location Awareness toward Improved Wireless System Design in Cognitive Radio", IEEE Communications Magazine, 46(1), 128–136.

Yazar, A., Onat, F. A., Arslan, H. 2016. "New Generation Waveform Approaches for 5G and Beyond", IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU).

Yazar, A., Arslan, H. 2018. "A Flexibility Metric and Optimization Methods for Mixed Numerologies in 5G and Beyond", IEEE Access, 6(1), 3755-3764.

Yazar, A., Arslan, H. 2019. "Selection of Waveform Parameters Using Machine Learning for 5G and Beyond", IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 1-6.

Yazar, A., Dogan-Tusha, S., Arslan, H. 2020. "6G Vision: An Ultra-Flexible Perspective", ITU Journal on Future and Evolving Technologies – Volume 2020, Article 9, 1(1), 1-20.

Yazar, A., Arslan, A. 2020a. "A Waveform Parameter Assignment Framework for 6G With the Role of Machine Learning", IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 1(1), 156-172.

Yazar, A., Arslan, H. 2020b. "Introduction to Waveform Design", Flexible and Cognitive Radio Access Technologies for 5G and Beyond, The Institution of Engineering and Technology (IET), 3-27.

Yazar, A. 2021. "Requirement Analysis and Clustering Study for Possible Service Types in 6G Communications", IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU).

Yu, T., Zhu., H. 2020. "Hyper-Parameter Optimization: A Review of Algorithms and Applications", arXiv:2003.05689 [cs.LG].

Zhang, Z., vd. 2019. "6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies", IEEE Vehicular Technology Magazine, 14(3), 28-41.

Zong, B., Fan, C., Wang, X., Duan, X., Wang, B., Wang, J. 2019. "6G Technologies: Key Drivers, Core Requirements, System Architectures, and Enabling Technologies", IEEE Vehicular Technology Magazine, 14(3), 18-27.

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

UMAGD, (2023) 15(2), 828-839.

10.29137/umagd.1297672

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Temmuz/July 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Keçiören/Ankara Özelinde Konut Rayiç Değerlerinin Tahmininde Çoklu Regresyon Analizi ve Yapay Sinir Ağları Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Comparison of Multiple Regression Analysis and Artificial Neural Networks Methods in Estimation of Housing Fair Values in Kecioren/Ankara

Serkan Narin[1*], Orhan Doğan[2], Nassirou Bande[3], Yunus Genç[4]

[1,2,3,4] *Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitisü, 71400 ve Kırıkkale, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 19/05/2023 **Kabul / Accepted**: 04/07/2023 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 12/07/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 14/07/2023*

Öz

Satışı yapılacak konutların gerçek değerini etkileyen yüzlerce parametre olması nedeniyle piyasa rayiç değerinin belirlenmesi çok önemli bir konudur. Bu çalışma ile konutların birden çok parametreye bağlı olan rayiç değerlerinin tahmininin hızlı ve doğru şekilde yapılabilmesi için hem istatistiksel yöntemlerden biri olan Çoklu Regresyon Analizi (ÇRA) hem de yapay zekâ yöntemlerinden biri olan Yapay Sinir Ağı (YSA) ile modeller geliştirilmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, ÇRA ve YSA modellerini oluşturmak için Ankara'nın Keçiören ilçesine bağlı farklı mahallelerde yer alan, Türkiye'de gayrimenkul satışlarının yapıldığı bir e-ticaret sitesinde ilan edilmiş toplam 149 adet satılık konut dikkate alınmıştır. Bir konutun rayiç değerinin belirlenmesinde yüzlerce parametre içerisinden en etkili olan 6 adet parametre sayısallaştırılarak, ÇRA ve YSA modelleri kurulmuştur. Bu verilere bakıldığında seçilen bu YSA yönteminin ÇRA'ya kıyasla daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

"Yapay sinir ağları, Çoklu regresyon analizi, Konut, Rayiç değer, Gayrimenkul değerleme"

Abstract

Since there are hundreds of parameters that affect the real value of the houses to be sold, determining the fair value is a very important issue. In this study, models are developed and the results are compared with both Multiple Regression Analysis (MRA), which is one of the statistical methods, and Artificial Neural Network (ANN), which is one of the artificial intelligence methods, in order to estimate the fair values of houses that depend on multiple parameters quickly and accurately. For this purpose, a total of 149 houses for sale in different neighborhoods of Kecioren district of Ankara, which were advertised on an e-commerce website where real estate sales are made in Turkey, were taken into consideration to create the MRA and ANN models. The 6 most effective parameters among hundreds of parameters in determining the fair value of a house were digitized and MRA and ANN models were established. Considering these data, it is seen that this selected ANN method gives more successful results compared to MRA.

Key Words

"Artificial neural networks, Multiple regression analysis, House, Fair value, Real estate valuation"

Sorumlu Yazar: serkannarin@mail.ru

1. Giriş

Toplumlarda insanların barınma ihtiyacını karşılayan konutlar, aynı zamanda önemli bir ekonomik yatırım aracı olup pazarlanması ve satışı aşamasında rayiç fiyatının tahmin edilmesi oldukça önemlidir. Rayiç fiyat kavramı, gayrimenkulün özellikleri ve niteliklerine göre değerleme işleminin yapıldığı gün ulaşılması mümkün olan tahmini gerçekçi fiyat olarak tanımlanmıştır (Açlar,1989). Günümüzde gayrimenkul değerlemelerinde Gelir İndirgeme ve Maliyet Yöntemlerine kıyasla Emsal Karşılaştırma yöntemi tek başına yaygın olarak kullanılırken bu üç yöntemden ikisi veya her üçü birlikte de kullanılmaktadır.

Emsal Karşılaştırma yöntemi ile rayiç değeri belirlerken konuttan konuta değişkenlik gösteren yüzlerce faktörün olması hızlı ve gerçekçi sonuçların elde edilmesinde en büyük zaman alıcı zorluk olarak ortaya çıkmaktadır. Gayrimenkul değerlemesinde; binanın yapım yılı, tapu durumu, semt özelliği, mevkii, inşaat kalitesi, katı, daire alanı, oda sayısı, asansör, açık/kapalı otopark, balkon, sosyal tesisler, yeşil alan, deniz ve doğa manzarası, ısınma ve güneş alma durumu, ulaşım vb. konut değerini etkileyen başlıca özellikler (Saraç, 2012) hakkında yeterli bilgi sahibi olunduktan sonra objektif olarak sonuca ulaşılmaktadır (Güngör,1999).

Gayrimenkul değerinin belirlenmesinde bazı faktörlerin taşınmaz değeri üzerindeki etkileri çok yüksek seviyede olurken bazılarının etkileri çok az veya sınırlı kalmaktadır. Gayrimenkul değerlemede en çok kullanılan yöntemler Tablo 1'de verilmiştir (Yalpır, 2007). Konut fiyatlarının hızlı ve gerçekçi tahmininde, gelişen teknoloji ile birlikte bilgisayar destekli yöntemlerden başta çoklu regresyon analizi (ÇRA) ve yapay sinir ağları (YSA) yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. ÇRA makine öğrenimini gerçekleştirip bilgiyi saklayabilirken, YSA örnekleri kullanarak öğrenmesi ve görülmemiş örnekler hakkında bilgi vermesi bakımından konut değerlemede daha ön planda tutulmaktadır (Elmas, 2007; Öztemel, 2003). Farklı parametreler kullanılarak konut fiyatlarının ÇRA ve YSA ile tahmin edilmesi üzerine ayrı ayrı ve birlikte yapılmış birçok literatür çalışması bulunmaktadır.

Tablo 1. Gayrimenkul değerleme yöntemleri

Geleneksel Yöntemler	İstatiksel Yöntemler	Modern Yöntemler
Emsal Karşılaştırma	Nominal	YSA
Gelir indirgeme	ÇRA	Bulanık Mantık
Maliyet	Hedonik RA	Konumsal Analiz

Konut değerleme analizinde 334 veri seti ile yapılan bir çalışmada, ÇRA ile %89 ve YSA ile %81 doğruluk oranına erişildiği ve ÇRA'nın daha anlamlı sonuçlar verdiği görülmüştür (Rossini, 1997). Başka bir çalışmada YSA'nın tahmin başarısının ÇRA'ya göre daha iyi olduğunu (Wilkowski ve Budzyński 2006; Özkan vd., 2007) ve YSA'nın doğrusal olmayan ilişkileri tespit etme kabiliyetinin diğer geleneksel modellere göre daha iyi düzeyde olduğunu belirtmişlerdir (García vd., 2008). Ayrıca yeterli veri ve doğru analiz yapılması şartı ile YSA'ya ek olarak bulanık mantık metodunun da elverişli bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir (Zurada vd., 2006). Tabanoğlu (2019) konut fiyat tahmini için Düzce ilinde 150 adet konuta ait 22 değişken kullanmış ve YSA'nın %3.58 hata oranı ile ÇRA'ya göre gerçeğe daha yakın ve uygulanabilir nitelikte olduğunu belirtmiştir. Tabar vd. (2021) konut fiyat tahmini için Tokat ili, Merkez ilçesi, Karşıyaka Mahallesinde emlak satış sitesinden temin edilen 176 adet veriye ait 7 değişkeni kullanmış ve doğruluk oranını ÇRA'da %95.05, YSA'da ise %96.75 olarak bulmuştur.

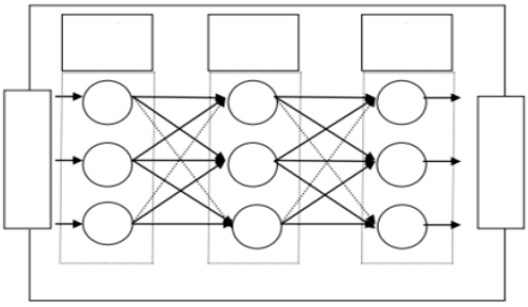
Bande vd. (2022) Ankara'nın Yenimahalle ilçesinde internette satış ilanlarından alınan toplam 220 adet satılık konuta ait 14 değişkeni kullanmış ve regresyonu (R) %94.83 ve doğruluk oranını %89.14 bulmuş, benzer şekilde yapılmış olan bu çalışmadaki sayısallaştırma değerlerini Doğan vd. (2023a) yeniden düzenleyerek YSA modelleri oluşturmuş, regresyonu (R) %95.99 ve doğruluk oranını %91.73 bulmuştur. Ayrıca, Doğan vd. (2022) YSA yöntemiyle Ankara'nın Keçiören ilçesinde internette satış ilanlarından alınan toplam 149 adet satılık konuta ait 11 değişkeni kullanmış ve regresyonu (R) %94.31 ve doğruluk oranını %91.59 bulmuş, benzer şekilde yapılmış olan bu çalışmadaki sayısallaştırma değerlerini Doğan vd. (2023b) yeniden düzenleyerek YSA modelleri oluşturmuş, regresyonu (R) %95.10 ve doğruluk oranını %93.02 bulmuştur. Sonuç olarak, YSA mimarisinin konut fiyatının tahmininde daha başarılı sonuçlar verdiğini görmüştür.

Bu çalışmada, bir e-ticaret sitesinden (Sahibinden.com, 2020) Ankara'nın Keçiören ilçesinde birbirlerine komşu olan Atapark, Ufuktepe ve Kanuni Mahallelerinde 2019 yılının aralık ayında ilanda bulunan toplam 149 adet satılık konutun rayiç değerlerinin belirlenmesinde en etkili olan 6 adet değişken [bina yaşı, bulunduğu kat, oda sayısı, dairenin net alanı (m^2), site durumu ve kapalı garaj durumu] kullanılarak oluşturulan ÇRA ve YSA modelleri karşılaştırılmıştır.

1.1. Yapay sinir ağları

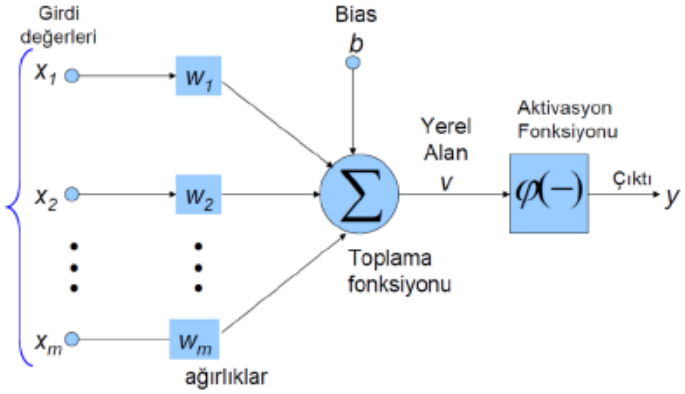
Yapay zekanın bir alt dalı olan YSA, insan beyninin çalışma prensibini kendine model edinen yapay sistemlerden biridir. Son yılların en yaygın konularından biri olan YSA, az bilgi ile çalışabilmesi, daha önce hiç karşılaşmadığı olayların sonuçlarını mevcut örneklerden faydalanarak belirleyebilmesi, belirsizlikler altından karar verebilmesi, hızlı çalışması ve tanımlama kolaylığı özelliklerine sahip olmasından dolayı tahmin, sınıflama ve görüntü tanıma başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır.

Çok katmanlı bir yapay sinir ağında, birbirleriyle bağlantılı sinir hücrelerinin yer aldığı girdi, çıktı ve gizli olmak üzere üç katman bulunmaktadır. İlk katman olan girdi katmanı, dışarıdan gelen verilerin YSA'ya alınmasını sağlar. Dış ortamla bağlantıları olmayan gizli katmandaki nöronlar, girdi katmanından gelen sinyalleri çıktı katmanına gönderirler. Son katman olan çıktı katmanı ise bilgilerin dışarıya iletilmesi işlevini görür. Modeldeki girdi ve çıktı katmanı haricindeki tüm diğer katmanlar gizli katman olarak isimlendirilir ve girdi ile çıktı katmanı arasında yer alır (Alşahin, 2015). Çok katmanlı bir yapay sinir ağı modelinin yapısı ve katmanları **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Örnek çoklu yapay sinir ağı modeli (Doğan vd., 2022)

Biyolojik sinir hücresine göre daha basit bir yapıya sahip olan ve birbirlerine bağlı, beraber çalışabilen hücrelerden meydana gelen YSA hücresinin nöron modeli Şekil 2'de verilmiştir. YSA'daki tüm nöronlar, aldığı girdi değerlerini tek bir çıktı değeri olarak verirler. Bir yapay sinir hücresi temel olarak giriş değerleri, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktı değeri olmak üzere 5 adet bileşenden meydana gelmektedir (Koçer, 2016).



Şekil 2. Bir YSA modelinin yapısı (URL-1, 2022)

Kullanılan aktivasyon fonksiyonlarının eksen verileri [-1,1] arasında değiştiği için, ağın daha verimli hale getirebilmek adına giriş ve çıkış değişkenlerine bazı normalizasyon teknikleri uygulamak gerekmektedir. Literatürde normalizasyon teknikleri olarak Medyan, Sigmoid, Z-Score, Minimum kuralı ve Maksimum kuralı bulunmaktadır. (Jayalakshmi ve Santhakumaran, 2011).

1.2. Çoklu regresyon analizi

Gayrimenkul değerlemelerinde, geleneksel ve modern değerleme yöntemlerinden farklı olarak istatiksel değerleme yöntemlerden biri olan ÇRA yöntemi de kullanılmaktadır. Geleneksel yaklaşımlardan farklı olarak ÇRA'nın kullanımı tarafsız karşılaştırılabilir özellikler sağlar ve süreç büyük bir doğrulukla tekrar tekrar gerçekleştirilebilir (Shawn vd., 2019).

Doğrusal regresyon analizi bağımlı ve bağımsız değişken/değikenlerden oluşur. Eğer tek bağımsız değişken var ise basit doğrusal regresyon, iki ya da daha fazla bağımsız değişken var ise çoklu doğrusal regresyon adı verilmektedir. Regresyon analizinde değişkenler arasındaki ilişkinin fonksiyonel olarak anlamlandırılması ve modellenmesi hedeflenmektedir (Chatterjee ve Hadi, 2015).

Mevcut verilerden yararlanılarak henüz bilinmeyen durumlar hakkında yapılan geleceğe yönelik öngörüde bulunma işlemine istatistikte yordama denir. Regresyon ise, modern istatistikte bilinen değerler kullanarak bilinmeyen değerlerinin bulunması olarak tanımlanmaktadır (Akış, 2013). Bu öngörüde, korelasyon değeri 0 olduğu durumda değişkenler arasında hiçbir ilişkinin olmadığı, ±1.00 olduğu durumda ise değişkenler arasındaki ilişkinin yüksek ve başarılı olduğu kabul edilir (Zeng ve Zhou, 2001).

Çoklu doğrusal regresyonda kullanılan gerçek ve öngörülen denklemler sırasıyla, Eşitlik 1 ve Eşitlik 2'de verilmiştir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1.X_1 + \beta_2.X_2 + \cdots + \beta_n.X_n + \varepsilon \quad (1)$$

$$\hat{Y} = b_0 + b_1.X_1 + b_2.X_2 + \cdots + b_n.X_n \quad (2)$$

Eşitlik (1) ve Eşitlik (2)'de yer alan; $\hat{Y}, Y$ bağımlı değişkenleri, $X_1, X_2, \ldots X_n$ bağımsız değişkenleri, $\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_n$ gerçek değer denkleminin katsayılarını, $b_1, b_2, \ldots, b_n$ öngörülen değer denkleminin katsayılarını, ε ise gerçek değer denkleminin hatasını ifade etmektedir.

2. Çalışma Yöntemi

2.1. Uygulama alanının belirlenmesi

Bu çalışmada; uygulama alanı olarak Türkiye'nin büyük ilçelerinden biri olan ve yoğun göç alan Atapark, Ufuktepe ve Kanuni Mahalleleri seçilmiştir (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**3). Seçilen mahallelerde binalar birçok özelliği ile birbirine yakın emsal oluşturacak niteliktedir. Ayrıca, nüfus olarak Atapark'ın 51.263; Ufuktepe'nin 17.981; Kanuni'nin 30.454 kişi olduğu ve yer aldıkları Keçiören ilçesinde konut satış hareketliliğinin 2021 yılı için 23.170 adetle oldukça yüksek olduğu görülmektedir (TÜİK, 2022). Mikro ölçekte her mahallenin ayrı ayrı ele alınmasının daha sağlıklı sonuçlar verdiği gerçeği göz önüne alındığında, bu çalışmada, yeterli sayıda veri elde edebilmek için birbirlerine komşu ve benzer özelliklerde olan üç adet mahalle birlikte ele alınmış ve konutların tahmini rayiç değerleri belirlenmiştir.



Şekil 3. Uygulama alanı

2.2. Veri setinin oluşturulması

Türkiye'nin gayrimenkul satışlarında ilk sıralarda yer alan e-ticaret sitesinden (Sahibinden.com, 2020), 2019 yılının Aralık ayında söz konusu mahallelerdeki toplam 149 adet satılık konut değerlendirmeye alınmıştır. Atapark'da 80, Kanuni'de 43, Ufuktepe'de 26 olmak üzere toplam 149 adet sahibinden satılık konutların özelliklerine ilişkin veri tabanı, e-ticaret sitesinden faydalanılarak oluşturulmuştur (Sahibinden.com, 2020).

Veri setinde; bina yaşı, bulunduğu kat, oda sayısı, dairenin net alanı (m^2), site durumu ve kapalı garaj durumunu içeren 6 adet giriş değişkeni ve konutun tahmini rayiç fiyatını içeren 1 adet de çıkış değişkeni kullanılmıştır.

2.3. Sayısallaştırma ve Normalizasyon İşlemleri

Elde edilen verilerin doğrudan kullanımı analiz için uygun olmadığından, 149 adet konuta ait 6 adet giriş ve 1 adet çıkış değişkenlerinin sayısallaştırılması ve normalizasyonu şu şekilde yapılmıştır:

Bina yaşı: Binanın yaşı için yapılan sayısallaştırma değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Bina yaşına ait sayısal değerler

Bina Yaşı	Sayısal Değeri
0	8
1-4	7
5-10	6
11-15	5
16-20	4
21-25	3
26-30	2
30 ve üzeri	1

Bulunduğu Kat: Dairenin zemin kotuna (0.00) binanın hangi katında yer aldığı ile ilgili yapılan sayısallaştırma değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Dairenin bulunduğu kata ait sayısal değerler

Bulunduğu Kat	Sayısal Değeri
2. Bodrum	1
1. Bodrum	2
Zemin	3
1-5	4
6-10	5
11-15	6
16-20	7
21-25	8
26 ve üzeri	9

Oda sayısı: Dairede bulunan oda sayısı şu şekilde sayısallaştırılmıştır. Oda sayısı, 3+1 bir daire için (4); 3+2 bir daire için (5); 2,5+1 daire için (3,5); vb.

Dairenin net alanı: Dairenin m^2 cinsinden net alanı şu şekilde sayısallaştırılmıştır. Dairenin net alanı, 110 m^2 bir daire için (110), 180m2 bir daire için (180); vb.

Site durumu: Dairenin bulunduğu bina site içerisinde yer almıyorsa (0), site içerisinde yer alıyorsa (2) verilerek sayısallaştırılmıştır.

Kapalı garaj durumu: Dairenin bulunduğu bina içerisinde kapalı garaj yer almıyorsa (0), kapalı garaj yer alıyorsa (1) seçilmiştir.

Fiyat: Dairenin TL cinsinden fiyatı şu şekilde sayısallaştırılmıştır. Fiyatı, 185.600 TL bir daire için (185.500); 212.000 TL bir daire için (212.000); vb.

Veri setinde yer alan tüm veriler, Eşitlik (3)'te verilen normalizasyon formülünden faydalanılarak [0,1] arasında normalize edilmiştir.

$$x_n = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \tag{3}$$

Eşitlik (3)'te yer alan; x_n niteliğin normalize edilmiş değerini, x_i niteliğin o anki aldığı değerini, x_{min} ve x_{max} da sırasıyla niteliğin aldığı en küçük ve en büyük değerlerini ifade etmektedir.

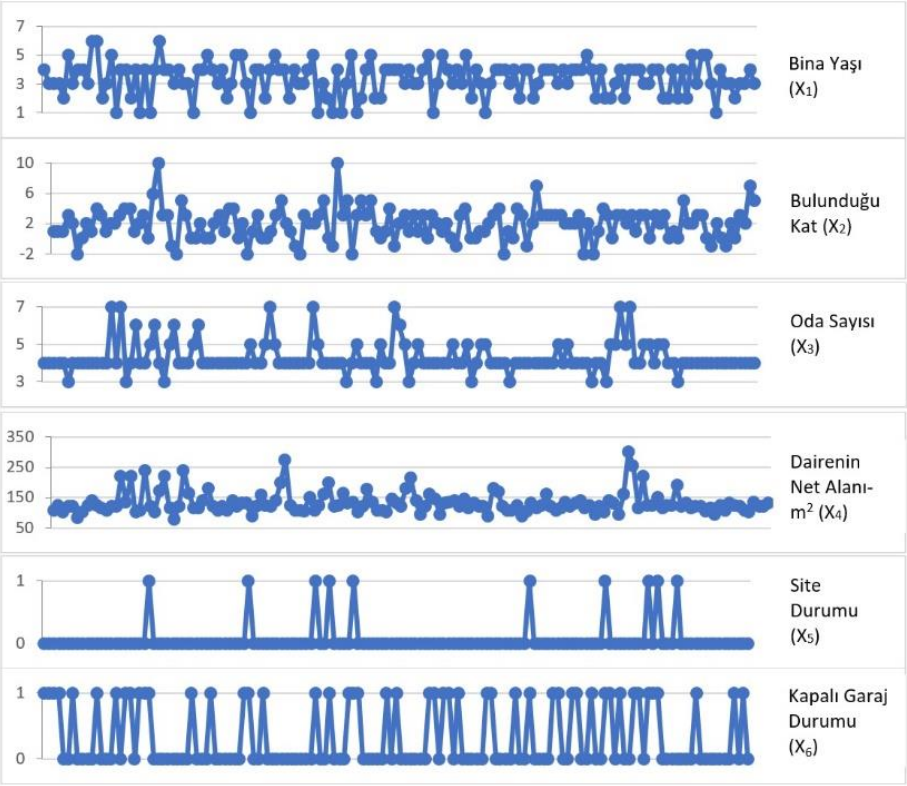
2.4. Giriş ve çıkış değişkenlerine ait istatistiki bilgiler

Tablo 4'te giriş ve çıkış değişkenlerinin sayısı (N), aralık, minimum, maksimum, ortalama, standart sapma ve varyans değerleri gibi istatistiki bilgiler verilmiştir.

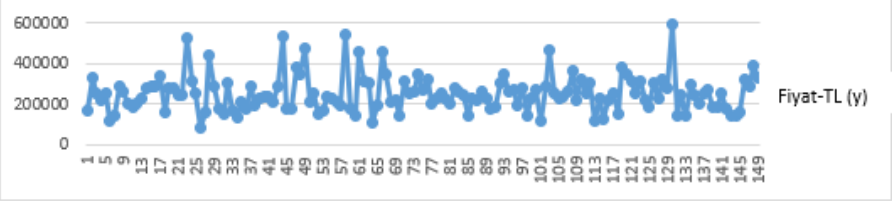
Tablo 4. Değişkenlere ait istatistiki bilgiler

Giriş (x) ve Çıkış (y) Değişkenleri		N	Aralık	Min.	Max.	Ortalama	Std. Sapma	Varyans
Bina Yaşı	x_1	149	5	1	6	3.36	1.16	1.35
Bulunduğu Kat	x_2	149	12	-2	10	1.93	2.11	4.44
Oda Sayısı	x_3	149	4	3	7	4.30	0.84	0.71
Dairenin Net Alanı (m^2)	x_4	149	220	80	300	132.99	36.81	1355.21
Site Durumu	x_5	149	1	0	1	0.07	0.25	0.06
Kapalı Garaj Durumu	x_6	149	1	0	1	0.33	0.47	0.22
Fiyat (TL)	y	149	504500	85500	590000	251000	89819	8.07E+09

Şekil 4'te her değişkenin tanımlayıcı istatistiki değerleri elde edildikten sonra, giriş değişkenlerinin veri dağılım grafiği, **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**Şekil 5'te de çıkış değişkeninin veri dağılım grafiği verilmiştir. Grafiklerdeki x ekseni veri sayısını, y ekseni ise her bir değişkenin değerini ifade etmektedir.



Şekil 4. Giriş değişkenlerinin veri dağılım grafiği



Şekil 5. Çıkış değişkeninin veri dağılım grafiği

2.5. YSA mimarisinin belirlenmesi

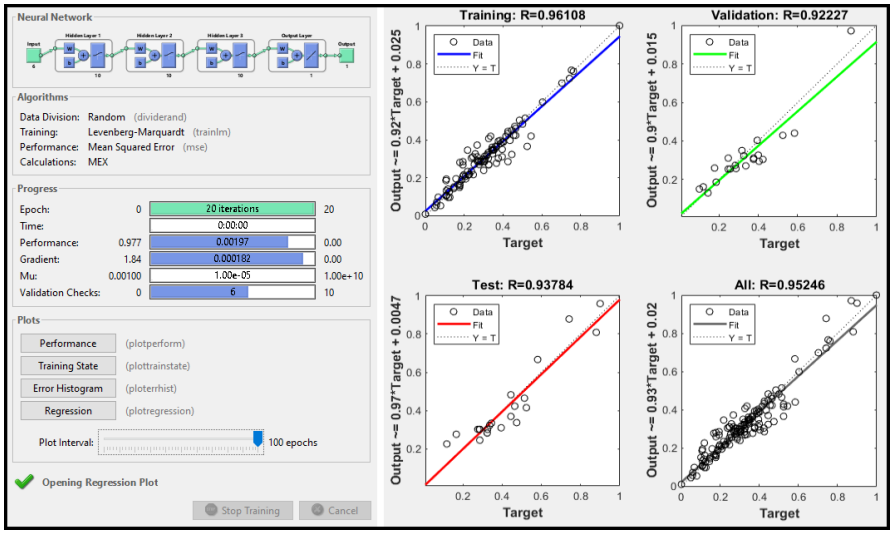
Çok karmaşık ve zor işlemleri basitleştirerek çözüme kavuşturması ve sonuçların hızlı ve sağlıklı bir şekilde elde edilmesi bakımından MATLAB R2021a programından faydalanılarak YSA ile konut taşınmazlarının rayiç değerlerinin tespiti yapılmıştır. Programda giriş veri setine 6x149, çıkış veri setine 1x149 olacak şekilde matris tanımlanmıştır. Çeşitli bilimsel çalışmalarda tercih edilen oranlardan faydalanılarak girilen 149 adet veriden eğitim için %70'i (105 adet), doğrulama için %15'i (22 adet), test için %15'i (22 adet) rastgele kullanılmış ve çözümlemeler yapılmıştır. Çalışmada, ağ yapısı için çok katmanlı ileri beslemeli geri yayılmalı ağ algoritması ve en hızlı geri yayılım algoritması olan "trainlm" komutu kullanılarak, Levenberg-Marquardt Algoritması (LMA) ile eğitilmiştir. Çıkış katmanında transfer fonksiyonu doğrusal "purelin" kullanılmıştır.

En iyi YSA mimarisini bulmak için deneme-yanılma yöntemi kullanılmış, ilk önce ara katman sayısı 1 kabul edilerek nöron sayısı arttırılmış akabinde aktivasyon fonksiyonu değiştirilmiştir. Daha sonra ara katman sayısı değiştirilerek aynı işlemler tekrarlanmıştır (Tablo 5). Performans fonksiyonu olan MSE 0'a yakın, parametreler arasındaki ilişkiyi ifade eden regresyon R'nin de 1'e yakın olması öğrenmenin başarı oranını göstermektedir.

Tablo 5. En iyi YSA mimarisinin belirlenmesi için deneme-yanılma sonuçları

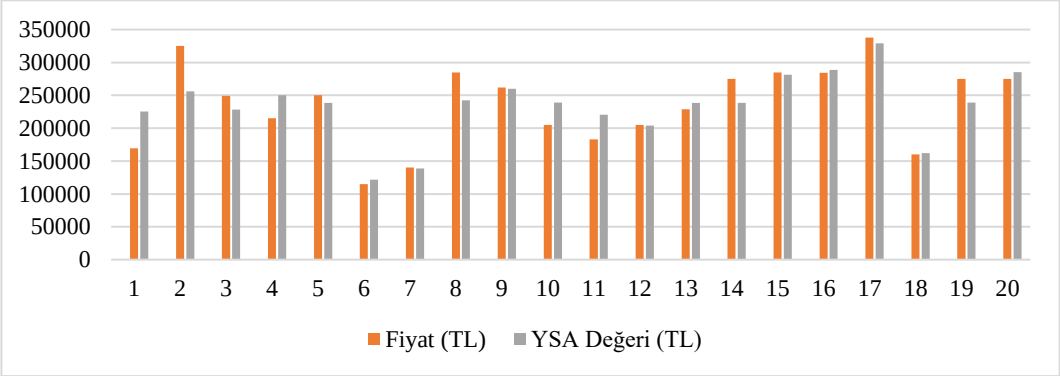
Ara Katman Sayısı	Aktivasyon Fonksiyonu	Katmanlardaki Nöron Sayısı	MSE Değeri	R Değeri
Tek Katmanlı	Sigmoid	1	0.0089300	0.847960
	Sigmoid	5	0.0027000	0.921780
	Sigmoid	10	0.0026200	0.919540
	Sigmoid	15	0.0026300	0.925670
	Hiperbolik Tanjant	15	0.0015600	0.928930
	Hiperbolik Tanjant	20	0.0013400	0.934870
İki Katmanlı	Sigmoid (1)-Sigmoid (2)	1-1	0.0097900	0.850160
	Sigmoid (1)-Sigmoid (2)	5-5	0.0025000	0.926850
	Sigmoid (1)-Sigmoid (2)	10-10	0.0024800	0.940920
	Sigmoid (1)-Sigmoid (2)	15-15	0.0017000	0.926120
	Sigmoid (1)-Hiperbolik Tanjant (2)	15-15	0.0014000	0.916830
	Hiperbolik Tanjant (1)-Hiperbolik Tanjant (2)	15-15	0.0018300	0.932350
	Hiperbolik Tanjant (1)-Hiperbolik Tanjant (2)	20-20	0.0016000	0.942060
Üç Katmanlı	Sigmoid (1)-Sigmoid (2)-Sigmoid (3)	1-1-1	0.0092400	0.849690
	Sigmoid (1)-Sigmoid (2)-Sigmoid (3)	5-5-5	0.0028600	0.934140
	Sigmoid (1)-Sigmoid (2)-Sigmoid (3)	10-5-5	0.0023700	0.938850
	Sigmoid (1)-Sigmoid (2)-Sigmoid (3)	10-10-5	0.0024400	0.928420
	Sigmoid (1)-Sigmoid (2)-Sigmoid (3)	**10-10-10**	**0.0019700**	**0.952460**
	Sigmoid (1)-Hiperbolik Tanjant (2)-Sigmoid (3)	10-10-5	0.0019900	0.940230
	Sigmoid (1)-Hiperb. Tanj. (2)-Hiperb. Tanj. (3)	10-10-5	0.0020900	0.932800

Yapılan denemeler sonucunda, üç ara katmanlıda ara katman nöron sayısı 10, aktivasyon fonksiyonları sigmoid olan ağ mimarisi performansının en uygun olduğu belirlenmiştir. Seçilen 20 iterasyon için programın yaptığı çözümleme neticesinde, performans fonksiyonu olan MSE 0.00197, tüm verilerin işlendiği eğitim grafiğinde R ise 0.95246 olarak bulunmuştur. Programın sonuç ekranı ve ağ çıktılarını eğitim-doğrulama-test grupları için hedef değerlere göre ayrı ayrı veren regresyon grafikleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Sonuç ekranı ve regresyon grafikleri

Veri setinde yer alan ilk 20 adet konutun rayiç ve YSA ile hesaplanan değerlerinin grafiksel gösterimi Şekil 7'de verilmiştir. Toplam test verisi için YSA değerleri ile rayiç değerleri arasındaki doğruluk oranı %92.81 olarak bulunmuştur.

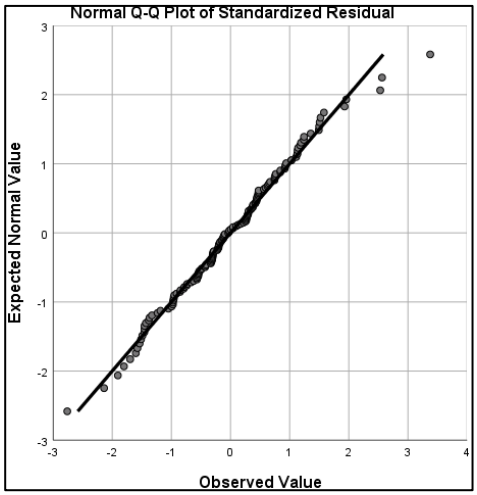


Şekil 7. Konut rayiç ve ysa değerlerinin grafiksel gösterimi (ilk 20 adet)

2.6. Çoklu regresyon analizi uygulaması

Bu çalışma için bağımlı değişken dairenin fiyatı seçilirken, binanın yaşı, dairenin bulunduğu kat, oda sayısı, dairenin net alanı (m2), site durumu ve kapalı garaj durumu ise bağımsız değişken olarak seçilmiştir. Metrik olmayan bu gözlemlerin metrik hale çevirebilmesi için veri setinde yer alan tüm veriler, Eşitlik (3)'de verilen normalizasyon formülünden faydalanılarak olumlu veriler için "1", olumsuz veriler için "0" olacak şekilde [0,1] arasında normalize edilmiştir.

Normalize edilmiş konut verileri SPSS yazılımına tanımlanarak, enter yöntemi ile regresyon eşitliği elde edilmiştir. Elde edilen bu regresyon eşitliğiyle konut değerleri hesaplanmıştır. Çalışmada ilk olarak veri setinde yer alan değişkenlerin dağılım durumları analiz edilmeye çalışılmıştır. Kurulan modelde kullanılan bina yaşı, bulunduğu kat, oda sayısı, daire net alanı, site durumu ve kapalı garaj durumu değişkenlerinin normallik dağılımı Şekil 8'de verilmiş olup değişkenlerin dağılımının normal olmadığı görülmüştür.



Şekil 8. Değişkenlerin normallik dağılımı

ÇRA modeline ait SPSS yazılımının verdiği uygulama sonuçları Şekil 9'da verilmiş olup en uygun modelin regresyonu R=0.815 ve R2=0.665 olarak bulunmuştur.

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics					Durbin-Watson
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change	
1	,815[a]	,665	,651	,1052293063	,665	46,942	6	142	,000	1,892

a. Predictors: (Constant), Kapalı Garaj Durumu, Oda Sayısı, Site İçerisinde mi?, Bulunduğu Kat, Bina Yaşı, Net Alanı (m2)

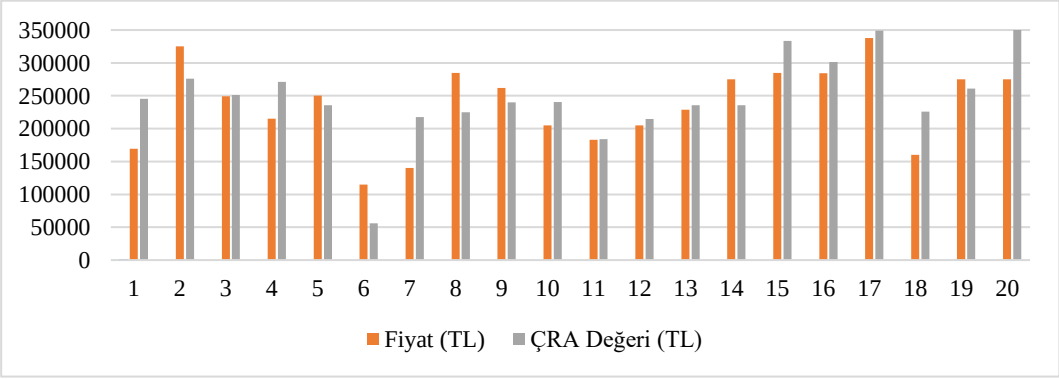
b. Dependent Variable: Fiyat (TL)

Şekil 9. ÇRA modeline ait sonuçlar

Yapılan analizler sonucunda bulunan ÇRA eşitliği Eşitlik 4'te verilmiştir. Konutun tahmini fiyatının normalize edilmiş değeri Eşitlik 4'ten faydalanılarak hesaplandıktan sonra, Eşitlik 3'te verilen normalizasyon formülünden tahmini fiyatı belirlenmektedir.

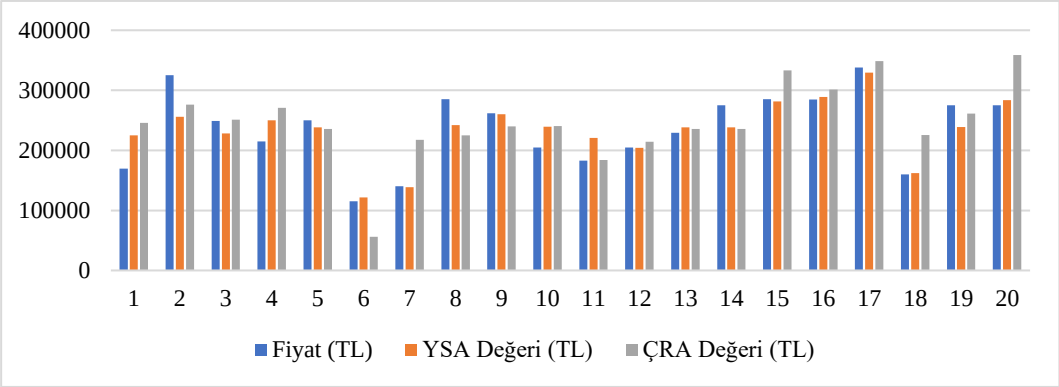
$$\boldsymbol{Fiyat} = \mathbf{-0,093} + \mathbf{0,123}xBina\ Yaşı + \mathbf{0,267}xBulunduğu\ kat + \mathbf{0,079}xOda\ sayısı + \mathbf{0,431}xNet\ Alanı + \mathbf{0,121}xSite\ Durumu + \mathbf{0,070}xKapalı\ Garaj\ Durumu \quad (4)$$

İlk 20 adet konutun rayiç değerleri ile ÇRA ile hesaplanan değerlerin grafiksel gösterimi Şekil 10'da verilmiştir. Toplam test verisi için ÇRA yöntemiyle hesaplanan konut değerleri ile rayiç değerleri arasındaki doğruluk oranı %84.91 olarak elde edilmiştir.



Şekil 10. Konut rayiç ve ÇRA değerlerinin grafiksel gösterimi (ilk 20 adet)

İlk 20 adet konutun rayiç, YSA ve ÇRA ile hesaplanan değerlerin grafiksel gösterimi Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. Konut rayiç, YSA ve ÇRA değerlerinin grafiksel gösterimi (ilk 20 adet)

3. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında konut rayiç değerlerinin tahmininde YSA ve ÇRA yöntemlerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Konut rayiç değerlerinin gerçeğe en yakın şekilde tahmin edilmesinin önemi, insanların elindeki kısıtlı maddi kaynakların en uygun yatırıma en doğru şekilde aktarılması zorunluluğundan kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte zaman da kısıtlı bir kaynaktır ve doğru tasarruf edilmesi gerekir. Bu çalışmada yalnızca 6 adet parametre kullanılarak %92.81 oranına ulaşılması yalnızca matematiksel olarak bir başarı değil, zaman tasarrufu açısından da büyük bir öneme sahip olup çalışmanın özgünlüğünü yansıtmaktadır. Doğan vd (2022) YSA yöntemiyle Ankara'nın Keçiören ilçesinde üç farklı ve komşu mahallesinde bulunan internette satış ilanlarından alınan toplam 149 adet satılık konut için 11 adet bağımsız değişken kullanmış ve regresyonu (R) %94.31, ortalama karesel hatayı (MSE) 0.000197 ve doğruluk oranı %91.59 bulmuştur. Bu çalışmadaki 149 adet satılık konut için, konut fiyatında etkili olabilecek en etkili 6 adet (bina yaşı, bulunduğu kat, oda sayısı, dairenin net alanı(m^2), site durumu ve kapalı garaj durumu) değişken kullanılarak, YSA ve ÇRA yöntemleri ile ayrı ayrı analizleri yapılmıştır.

Sonuç olarak, literatürde konutların sahip olduğu özelliklerine göre rayiç fiyatlarının YSA ve ÇRA ile tahmin edilmesi üzerine Wilkowski ve Budzyński (2006), Özkan vd. (2007), Tabanoğlu (2019) ve Tabar vd. (2021) tarafından yapılmış çalışmalarda olduğu gibi yapılan bu çalışma ile, YSA yönteminde ortalama hatanın karesi (MSE) 0.001970, regresyon (R) değeri %95.2460 ve doğruluk oranı %92.81 olarak bulunurken, ÇRA yönteminde ortalama hatanın karesi (MSE) 0.011073, regresyon (R) değeri %81.50 ve doğruluk oranı %84.914 olarak bulunmuştur. Bu verilere bakıldığında seçilen bu YSA yönteminin ÇRA'ya kıyasla daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Çalışma sonuçları, bulunan YSA ve ÇRA yöntemlerinin konut değerleme uygulamalarında kullanılabilirliğini ve değerlemenin hızlı ve yüksek doğrulukla yapılabilirliğini göstermiştir.

Bu çalışmayı diğer çalışmalardan özgün kılan, daha önce yapılmış çalışmalardan daha az fakat en etkili değişkenler kullanılarak oldukça başarılı YSA sonuçlarının elde edilmesidir. Örneğin; Doğan vd (2022) tarafından yapılan çalışmada dikkate alınan 11 adet değişken ile %94.31 doğruluk oranı bulunurken, değişken sayısı daha etkili olan 6 adede indirgenerek yine çok yakın bir değer olan %92.81 doğruluk oranının bulunmasıdır.

Bu çalışmaya ek olarak, bu çalışmada ortaya konan yapay sinir ağı modelinde 6 adet değişken dikkate alınarak başka bölgeler için de geliştirilebileceği gibi, ÇRA ile etkisi belirlenen kapalı garaj gibi tahmini fiyata etkisi en düşük olan değişkenler ihmal edilip, daha az sayıda değişkenle başka bölgeler için de geliştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, önerilen bu çalışmanın sonuçları ile bulanık mantık, destek vektör makinesi ve diğer yapay zekâ yöntemlerinin sonuçları ile kıyaslanması yapılabilir.

İlavaten, bu çalışmada mevcut parametreler içerisinde yer almayan "deprem riski" ve "binanın korozyon yaşı" kriterlerinin parametre olarak kullanılacağı gelecekteki çalışmalar, konut rayiç değerlerinin tahmininde daha yüksek yüzdelere ulaşılabileceğini ve satın alınan konutun insan hayatı için önemini de ortaya koyacaktır.

Referanslar

Açlar, A. (1989). Taşınmaz Değerlemesi Ders Notları.

Akış, B. (2013). İstatistiki Yöntemlerle Değer Belirleme Ve Değer Haritası Üretimi Selçuklu Örneği Selçuk Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği ABD, Konya, Türkiye.

Alşahin, S. (2015). Yapay Sinir Ağları İle Kiriş Tipi Yapılarda Hasar Tanımlama, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye.

Bande, N., Doğan, O., Genç, Y., & Akyön, F.Ç. (2022) Yenimahalle/Ankara Özelinde Konut Fiyatlarının Yapay Sinir Ağları Metodu İle Belirlenmesi, 7. Uluslararası Erciyes Bilimsel Araştırmalar Kongresi, Kayseri, Türkiye.

Bande, N. (2022). Yapay Zekâ Yaklaşımı ile Ankara'daki İki Farklı Lokasyonda Gayrimenkul Değerleme Üzerine Uygulamalar, Kırıkkale Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, Kırıkkale, Türkiye.

Chatterjee, S. & Hadi, A. S. (2015). Regression Analysis By Example: John Wiley & Sons.

Doğan, O., Bande, N., Genç, Y. & Akyön, F.Ç., Keçiören/Ankara Özelinde Konut Rayiç Değerlerinin Yapay Sinir Ağları Metodu Kullanılarak Tahmini, Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi, 2022 (35):113-128, 2022.

Elmas, Ç. (2007). Yapay Zekâ Uygulamaları, Ankara, Türkiye.

García, N., Gámez, M., & Alfaro, E. (2008). ANN+GIS: An Automated System for Property Valuation, Neurocomputing, 71(4), 733-742.

Google Earth Pro. (2020). Erişim Adresi: https://www.google.com.tr/intl/tr/earth/

Güngör, E. (1999). Gayrimenkul Değerlemesi ve Türkiye'de Sermaye Piyasalarında Gayrimenkul Ekspertiz Şirketlerine Yönelik Düzenlemeler Yapılmasına İlişkin Öneriler, T.C. Başbakanlık Sermaye Piyasası Kurulu Kurumsal Yatırımcılar Dairesi, Yeterlik Etüdü, Ankara, Türkiye.

Jayalakshmi, T., & Santhakumaran, A. (2011). Statistical Normalization and Back Propagation for Classification, International Journal of Computer Theory and Engineering, 3(1), 89-93.

Keçiören Belediyesi. (2019). Erişim Adresi: http://kentbs.kecioren.bel.tr/

Koçer, M. (2016). Fretli Kolonların Kesme, Eğilme ve Süneklik Kapasitelerinin Yapay Sinir Ağları ile Belirlenmesi, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.

Bande, N., Doğan, O., Genç, Y., & Akyön, F.Ç. (2022). Yenimahalle/Ankara Özelinde Konut Fiyatlarının Yapay Sinir Ağları Metodu İle Belirlenmesi. 7. Uluslararası Erciyes Bilimsel Araştırmalar Kongresi, 9-10 Mart 2022, Kayseri, Türkiye.

Doğan, O., Bande, N., Genç, Y., & Akyön, F.Ç. (2022). Keçiören/Ankara Özelinde Konut Rayiç Değerlerinin Yapay Sinir Ağları Metodu Kullanılarak Tahmini, Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi, (35), 113-128.

Doğan, O., Bande, N., Genç, Y., Akyön, F.Ç., & Tanç, R. (2023a). The Importance of Digitization in Estimating Housing Fair Value with the Artificial Neural Networks Method: The Case of Yenimahalle/Ankara/Türkiye, Brilliant Engineering, 1, 4768.

Doğan, O., Bande, N., Genç, Y., & Koç, F. (2023b). Yapay Sinir Ağları Metodu ile Konut Özellikleri Yeniden Sayısallaştırılarak Rayiç Değerinin Tahmin Edilmesi: Keçiören/Ankara Örneği, Türkiye Arazi Yönetimi Dergisi, 5(1), 09-19.

Özkan, G., Yalpır, Ş., & Uygunol, O. (2007). An Investigation on the Price Estimation of Residable Real Estates by Using Artificial Neural Network and Regression Methods, The 12th Applied Stochastic Models and Data Analysis International Conference (ASMDA), Chania, Crete, Greece.

Öztemel, E. (2003). Yapay Sinir Ağları, İstanbul, Türkiye.

Rossini, P.A. (1997). Artificial Neural Networks Versus Multiple Regression in the Valuation of Residential Property, Australian Land Economics Review, 3(1), 1-12.

Sahibinden.com. (2020). Erişim Adresi: https://www.sahibinden.com/

Saraç, E. (2012). Yapay Sinir Ağları Metodu İle Gayrimenkul Değerleme, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

Shawn L.R., McKnight, A., Misty R.P., & Rachel N.C. (2019). Considerations for a Regression-Based Real Estate Valuation and Appraisal Model: A Pilot Study, Accounting and Finance Research, Vol. 8, No. 2; 2019. URL: https://doi.org/10.5430/afr.v8n2p99

Tabanoğlu, M. (2019). Konut Yapılarının Rayiç Değerlerinin Yapay Sinir Ağları Metodu Kullanılarak Tahmin Edilmesi: Düzce İli Örneği, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, Türkiye.

Tabar, M.E., Başara, A.C., & Şişman, Y. (2021). Çoklu Regresyon ve Yapay Sinir Ağları ile Tokat İlinde Konut Değerleme Çalışması, Türkiye Arazi Yönetimi Dergisi, 3(1), 01-07.

TÜİK. Türkiye İstatistik Kurumu. (2022). Erişim Adresi: http://www.tuik.gov.tr/

URL-1. (2022) http://teknogezegen.com/yapay-sinir-aglari/

Wilkowski, W., & Budzyński, T. (2006). Application of Artificial Neural Networks for Real Estate Valuation, Shaping the Change XXIII FIG Congress, Munich, Germany.

Yalpır, Ş. (2007). Bulanık Mantık Metodolojisi ile Taşınmaz Değerlenme Modelinin Geliştirilmesi ve Uygulaması: Konya Örneği, Yayınlanmış Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.

Zeng, T.Q., & Zhou, Q. (2001). Optimal Spatial Decision Making Using GIS: A Prototype Of A Real Estate Geographical İnformation System (REGIS), International Journal of Geographical Information Science, 15(4), 307-321.

Zurada, J.M., Levitan, A.S., & Guan, J. (2001). Non-Conventional Approaches to Property Value Assessment, Journal of Applied Business Research, 22(3), 1-14.

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

UMAGD, (2023) 15(2), 840-847.

10.29137/umagd.1288835

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Temmuz/July 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Biyouyumlu Numunelerin Üretimi İçin 4D Eklemeli İmalat Cihazı Tasarımı ve Üretimi

Design and Manufacturing of 4D Additive Manufacturing Device For The Production of Biocompatible Materials

Yunus Kartal [1], Deniz Doğan[2], M. Taylan Daş[1], Ayşegül Ülkü Metin [2]

[1] Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE
[2] Kırıkkale Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

***Başvuru/Received**: 27/04/2023 **Kabul / Accepted**: 21/06/2023 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 13/07/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 14/07/2023*

Öz

Bu çalışmanın amacı biyouyumlu numunelerin üretimi için alışılagelmiş kartezyen eksenlerinin haricinde tablada bulunan ve ekseni etrafında dönen dördüncü eksene sahip dört boyutlu (4D) eklemeli imalat cihazı tasarımı ve üretimidir. Bu kapsamda 4D eklemeli imalat cihazının çalışma prensibi ve cihazı oluşturan bileşenlerden olan döner tabla, dış kabin, iklimlendirme şartları gibi bileşenlerin teorik detayları verilmektedir. Çalışma kapsamındaki 4D eklemeli imalat cihazı üretilen numunelerin özelliklerinin atmosfer koşullarından etkilenmesini engellemek amacıyla izole bir ortamda çalışmaktadır. Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen cihazda ultraviyole (UV) ışın altında poli(2-hidroksietil metakrilat) üretilmiş ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler

"Eklemeli imalat, döner eksen, biyouyumlu malzeme, kalıp içerisinde imalat, UV ışın ile polimerizasyon"

Abstract

The aim of this study is to design and manufacture a 4 Dimensional (4D) additive manufacturing device with a fourth axis rotating around its axis, in addition to conventional Cartesian axes, for the production of biocompatible materials. In this context, theoretical and technical details of various mechanical and electronic accessories or components are given. The four-dimensional printer within the scope of the study works in an isolated environment in order to prevent the properties of the produced materials from being affected by atmospheric conditions. In the device designed and manufactured, poly(2-hydroxyethyl methacrylate) was produced under ultraviolet light and its mechanical properties were investigated.

Key Words

"Additive manufacturing, spin coating, biocompatible material, in-mold manufacturing, UV polymerization"

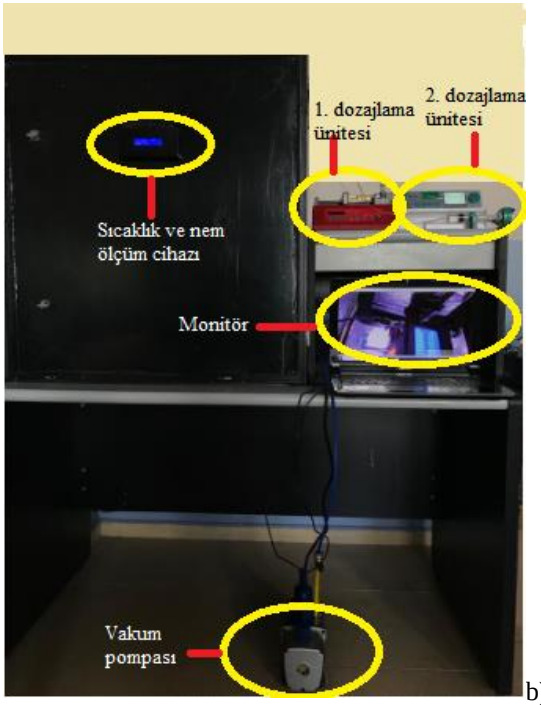
***Sorumlu Yazar: y.kartal@kku.edu.tr**

1. Giriş

Nesnelerin katman katman üretilmesi prensibine dayanan üç boyutlu baskı yönteminin yaygın kullanan bir diğer adı ise eklemeli imalat teknolojisidir. Üç boyutlu baskı yöntemi medikal (Vu vd. 2021), havacılık ve uzay (Rouf vd. 2022) ve otomotiv (Garmabi vd. 2022) sektöründe vb. pek çok sektörde kullanılmaktadır. Eklemeli imalat teknolojisinde yaygın olarak kullanılan malzeme grupları ise; metaller, termoplastikler, kompozitler ve seramiklerdir (Hachimi vd. 2021). Karmaşık geometriye sahip nesnelerin üretilebildiği eklemeli imalat yönteminde pahalı takımlar kullanılmamaktadır (Attaran, 2017).

Fotopolimerizasyon, malzeme ekstrüzyonu, toz yataklı eritme yöntemi eklemeli imalat yöntemlerine örnek olarak verilebilir (Sürmen, 2019). Hedeflenen polimerik numunelerin ışın enerjisi ile monomerden yola çıkarak ışın enerjisi ile üretilmesi prensibini temel alan fotopolimerizasyon yöntemi birçok çalışmayı kapsamaktadır (Izadifar vd. 2018, Invernizzi vd. 2016, Mantelli vd. 2021, Barkane vd. 2020, Kim vd. 2017). Fotopolimerizasyon yönteminde kullanılan ışın, lazer veya ultraviyole (UV) olabilir. Fotopolimerizasyon yöntemiyle gerçekleştirilen çalışmalar mürekkep adı verilen malzemelerin işlem parametrelerinin üretilen numune üzerine etkisi (Hong vd. 2018) ve üretilen numunelerin özellikleri (Lee vd. 2021) veya üretimde kullanılan malzeme gruplarına alternatif malzeme gruplarının belirlenmesi (Li vd. 2019) gibi çeşitli alanlarda gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin fotopolimerizasyon prensibine dayanarak eklemeli imalat yöntemiyle üretilmesinde önemli etkenlerden birisi de üretim sırasında kullanılan cihazın özellikleridir. Bu anlamda eklemeli imalat alanında gerçekleştirilen incelemelerin bir diğer odak noktası işlem sırasında kullanılan cihazların tasarımı (Zi vd. 2019, Eichholz vd. 2022, Guoqing vd. 2019, Ozkan vd. 2022) ve optimizasyonudur (Priavolou vd. 2022, Vavoulas vd. 2016, Le Duigou vd. 2023, Minetola vd. 2018). Üç boyutlu yazıcıyı atmosfer koşullarından izole eden Birkelid vd. yüksek performanslı polimer numune üretmeyi amaçlamışlardır (Birkelid vd. 2022). Üç boyutlu nesnelerin malzeme ekstrüzyonu prensibiyle üretilmesine dayanarak üretim yapan cihazda, Hachimi vd. yeni bir ekstrüder tasarlamış ve üretmiştir.

Çalışmada, sahip olduğu 105watt UV ışın gücü ile biyouyumlu nesneleri kürleyebilen, çalışma kapsamında tasarlanan ve üretilen döner eksen ile üretim sırasında polivinil alkol (PVA) kalıbı ve içerisindeki numuneyi UV ışın etrafında döndürme kabiliyetine imkan veren ve numunelerin mekanik özelliğinin literatüre uygun üretildiği eklemeli imalat cihazının ve kabininin tasarımı amaçlanmıştır. Çalışma sonunda polihema (pHEMA) içerikli numuneler başarıyla üretilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen cihazın performansını ölçmek amacıyla UV ışın ile kürlenen poli(2-hidroksietilmetakrilat), pHEMA, bazlı mürekkep kullanılmış ve üretilen numunenin çekme deneyi uygulanarak mekanik özellikleri elde edilmiş ve cihazın performansı test edilmiştir. Biyouyumlu nesnelerin eklemeli imalat yöntemiyle üretilmesinde kullanılması için tasarlanan cihazın görüntüsü Şekil 1.de gösterilmektedir.

a) 

b) 

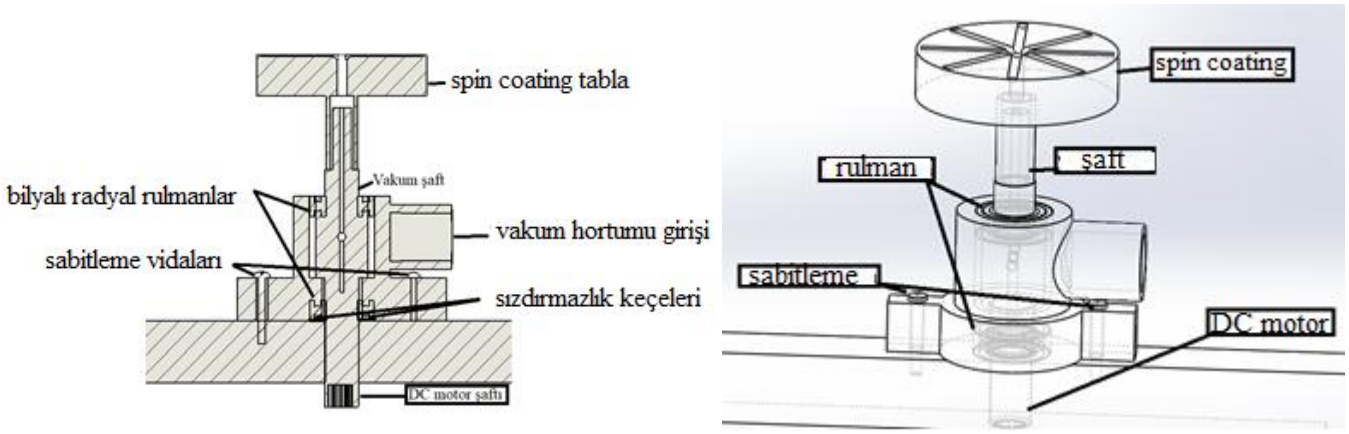
Şekil 1. 4D eklemeli imalat cihazının **a.** dış, **b.** iç görüntüsü.

Yukarıda açıklanan cihazın çalışma prensibine dayanarak, bu çalışmada tasarımı gerçekleştirilen cihazın dördüncü ekseni tasarımı, cihazı çevre şartlarından ayıran kabinin tasarımı, biyouyumlu nesnelerin eklemeli imalat yöntemiyle üretilebilmesini sağlayan dozajlama ünitesinin tasarımı ayrıntılı olarak materyal ve yöntem bölümünde açıklanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Döner Eksen Cihazı (Spin Coating) Tasarımı

Bu çalışmada iki mafsal ve iki sızdırmaz rulman kullanılarak döner eksen aparatı tasarlanmıştır. Tasarlanan döner eksen aparatı Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Döner eksen (spin coating) cihazı teknik görünüşleri

Tasarımı gerçekleştirilen döner eksen cihazı 0-2750 rpm çalışma aralığına sahiptir ve çalışma için gerekli kodlamalar Arduino kodlama sistemiyle gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında tasarlanan ve üretilen döner eksen cihazının görüntüsü Şekil 3.'te verilmiştir.



Şekil 3. Çalışma kapsamında tasarlanan ve üretilen döner eksen cihazı

Döner eksen cihazının alt kısmındaki butonun ekseni etrafında döndürülmesiyle çalışma kapsamında tasarlanan aparatın devir sayısı kontrolü yapılabilmektedir. Cihaz en yüksek devir sayısında (2750 rpm) dönerken 300 mA nominal akım değerine sahiptir. Çizelge 1'de DC motor voltaj ve hız ayar değer skalası verilmiştir.

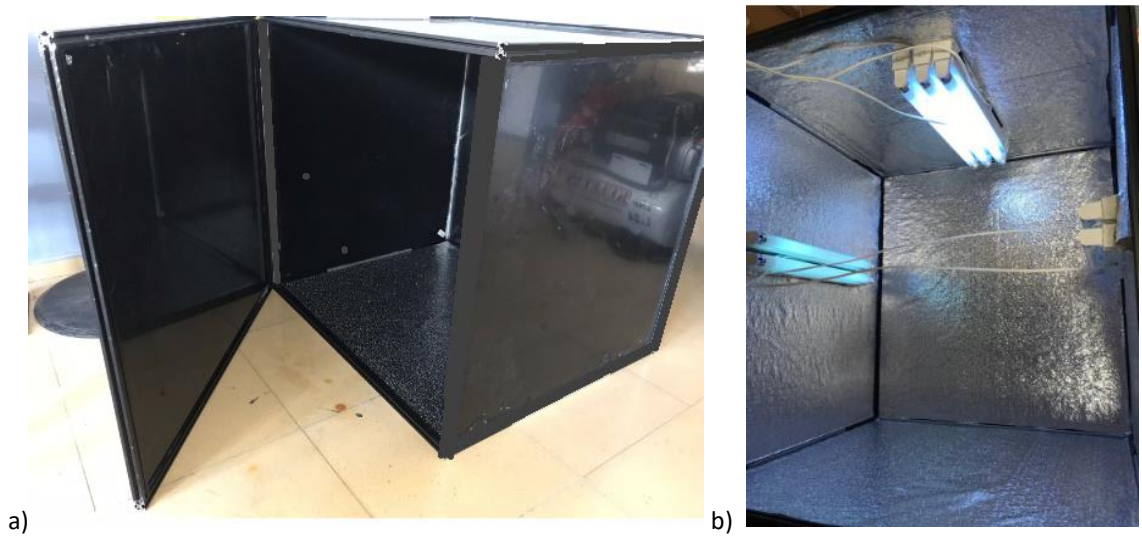
Çizelge 1. DC motor voltaj ve hız ayar değer skalası

Voltaj yüzdesi	Devir sayısı (rpm)	Voltaj yüzdesi	Devir sayısı (rpm)
% 5	137,5	% 55	1512,5
% 10	275	% 60	1650
% 15	412,5	% 65	1787,5
% 20	550	% 70	1925
% 25	687,5	% 75	2062,5
% 30	825	% 80	2200
% 35	962,5	% 85	2337,5
% 40	1100	% 90	2475
% 45	1237,5	% 95	2612,5
% 50	1375	% 100	2750

2.2. Kapalı Ortam Koşullarının Oluşturulması

Üretimin çevre koşullarından izole olarak gerçekleşebilmesi için, 700x750x800mm boyutunda kabin tasarlanmıştır. Tasarımda 4 mm kalınlığında siyah pleksi levhalar 20x20mm altı kanallı sigma profillere silikon yapıştırıcı ile birleştirilmiştir. Montaj işlemi tamamlandığında toplam 710x760x810mm boyutundaki kabin Şekil 4a.'da gösterilmiştir. Kabinin iç ortamının yansıtıcılığını artırmak

amacıyla kabinin iç yüzeylerine 0,3 mm kalınlığında yapışkan alüminyum folyo kullanılmıştır. Kürleme işleminin gerçekleştirilmesi amacıyla 15watt gücünde 7 adet Osram marka L-BL-T8 model UV ışın kaynağı kullanılmıştır. Işın kaynakları pleksi levhaya kullanılan ışık kaynaklarının tüm alanı eşit şekilde görebilmesi için kabinin iç tarafının yanal yüzeylerine 2 adet ve tavan kısmında 3 adet olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 4b).



Şekil 4.a. Montajı tamamlanan cihazın dış görüntüsü **b.** Montajı tamamlanan cihazın iç görüntüsü

Çalışma kapsamında üretimi gerçekleştirilen 4D eklemeli imalat cihazının atmosfer koşullarını kontrol edebilmek amacıyla vakum pompası (CL marka 215 model) ve kompresör (Kuletaş marka ZB2024 model) kullanılarak atmosfer koşullarından izole edilmiştir. Kullanılan cihazların kabine montajlanabilmesi için kabine 5mm çapında 4 adet delik açılmıştır. Bu açılan deliklerin birisi vakum hortumu, ikincisi spin coating vakum hortumu, üçüncüsü cihaz ışıklarının kablolarına güç kaynağının sağlanması ve dördüncüsü dozajlama ünitesinden çıkan hat için açılmıştır.

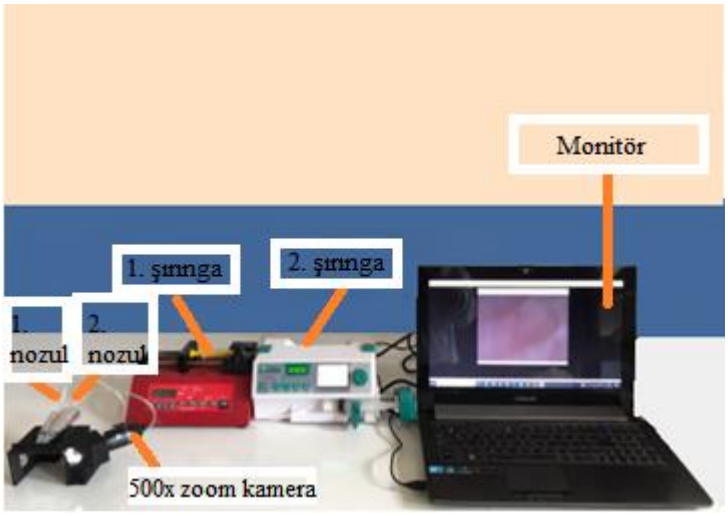
2.3. Dozajlama Ünitesi Tasarımı

Biyouyumlu nesnelerin eklemeli imalat ile üretimini sağlamak amacıyla dozajlama ünitesi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Dozajlama ünitesinin başlık kısmında montajlanmış halde bulunan ve dozajlama ünitesinin çalışması sırasında üretimi kontrol edebilmek amacıyla görüntüleri .jpeg ve .mp4 formatında kaydedebilen dijital kamera bulunmaktadır. Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen dozajlama ünitesinde 3 adet 0,4 mm çapında uçlar birer nozul olarak kullanılmaktadır. Dozajlama ünitesi başlığı sahip olduğu çoklu nozul yapısı sayesinde hem aynı yapıdaki polimer numuneleri hem de farklı yapıdaki polimerleri herhangi bir nozul değişimi olmaksızın üretebilmektedir. Dozajlama ünitesinin başlığının her iki yanında 30x25x5mm ve ön kısmında 50x20x5mm havalandırma boşlukları bulunmaktadır. Tasarlanan dozajlama ünitesinin başlığının üretimi eklemeli imalat yöntemiyle polilaktik asit (PLA) malzeme kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5a'da dozajlama ünitesinin başlığının teknik detayları, Şekil 5b'de dozajlama ünitesinin başlığının mürekkep numune serimi anındaki serim görüntüsü, Şekil 5c' de üretim sırasında dijital kameradan alınmış görüntü verilmiştir.



Şekil 5. a. Dozajlama ünitesi başlığının teknik detayları, **b.** Dozajlama ünitesi başlığının mürekkep numune serimi anındaki görüntüsü, **c.** Üretim sırasında dijital kameradan alınmış görüntü.

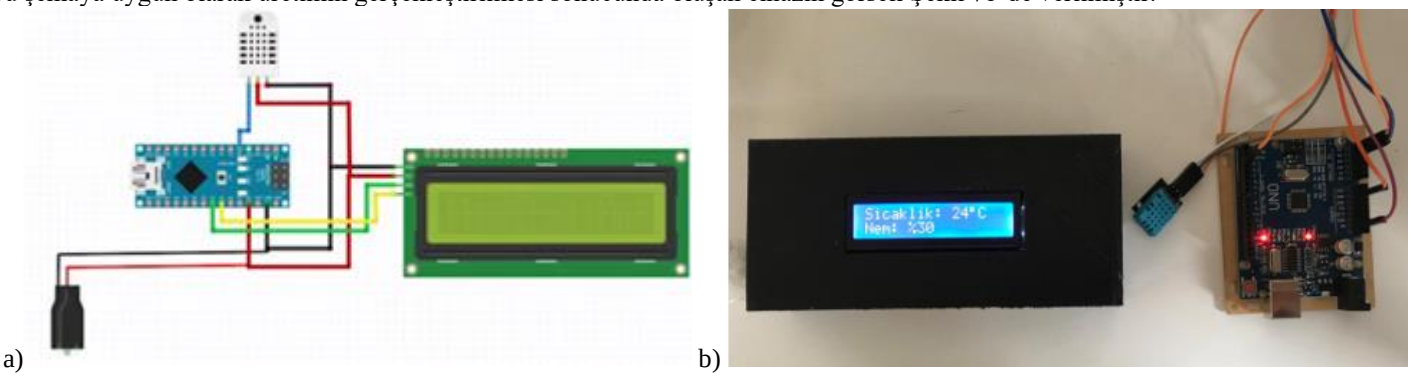
Çalışmada biyouyumlu polimer numunelerin nozul içerisindeki hareketini kontrol edebilmek amacıyla Byond marka BYZ-810 model ve New-Era marka NE-300 model olmak üzere iki dozajlama ünitesi kullanılmıştır. Kullanılan dozajlama üniteleri aynı anda farklı polimer numunelerin üretimini sağlayacaktır. Polimer numunelerin dozajlama ünitesinden nozula aktarılması 4mm çapındaki esnek hortum ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.'da dozajlama sisteminin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6. Dozajlama sisteminin görüntüsü

2.4. Kapalı Ortam Koşullarının Kontrolü

Biyouyumlu nesnelerin üretimi sırasında kabin atmosfer koşullarının kontrolünü sağlamak için sıcaklık ve nem ölçer üretilmiştir. Sıcaklık ve nem ölçer üretimini gerçekleştirmek amacıyla kontrolör olarak Arduino Uno kartı kullanılmıştır. Kabin içi nem değerini %65 olarak sabitlenmiştir. Kabine bağlı vakum pompası ile kabin içindeki hava boşaltılabilmektedir. Kabin iç sıcaklık ve nem değerlerini ölçmek amacıyla DHT11 model sıcaklık ve nem ölçüm sensörü kullanılmıştır. Kullanılan sıcaklık ve nem ölçüm sensörü 0-50°C aralığında 2°C lik hata payı ve %20-90 nem aralığında %5 lik hata payı ile ölçüm yapabilmektedir. Bu tolerans değerleri çalışma şartları için uygun olduğundan DHT11 model sıcaklık ve nem ölçüm sensörü kullanılmıştır. Sensörde okunan değerleri Arduino ile yorumladıktan sonra ince tabakalı transistör (TFT) ekranına yansıtarak kabin koşulları görselleştirilmiştir. Kabin çalışma atmosferini görselleştirmek amacıyla 16x2 IIC/I2C/TWI model seri mavi LCD ekran kullanılmıştır. Sıcaklık ve nem ölçer cihaz yapısının sadeleştirilmesi amacıyla çalışmada kullanılan LCD ekran İ2C bağlantısını desteklemektedir. Çalışmada kullanılan modüller arasında bağlantı kurabilmek için atlama kabloları ve sıcaklık ve nem ölçüm cihazını besleyebilmek için 5 volt 1 amper çalışma değerine sahip güç kaynağı (adaptör) kullanılmıştır. Güç kaynağından gelen enerjiyi devreye verebilmek amacıyla klemens çıkışlı DC dişi adaptör prizi kullanılmıştır. Kabin atmosfer koşullarını kontrol etmek amacıyla tasarlanan ve üretilen sistemin şeması Şekil 7a'da, bu şemaya uygun olarak üretimin gerçekleştirilmesi sonucunda oluşan cihazın görseli Şekil 7b'de verilmiştir.



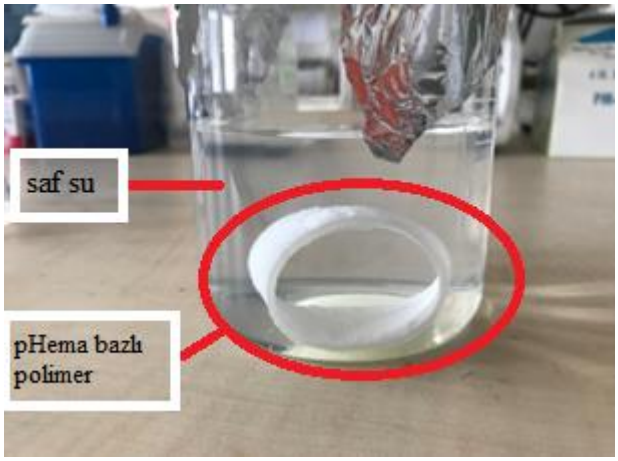
a) b)

Şekil 7 a. Sıcaklık ve nem sensörünün şeması. **b.** Sıcaklık ve nem ölçer şemasına uygun olarak üretilen sıcaklık ve nem ölçüm cihazı.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Kalıpta Biyouyumlu Numune Üretim İşlemi

Çalışma kapsamında elde edilen pHEMA polimeri Ø30x30 ve Ø26x30 boyutlarındaki PVA malzemeden yapılmış kalıp içerisine, hidroksietilmetakrilat monomerinin 2,2′-azobis(2-metilpropilonitril fotobaşlatıcısı ile 30 dk. UV ışın ile polimerleştirilmesi sonucunda elde edilmiştir. Polimerleşmeden sonra PVA'dan üretilen kalıbın çözünmesi ve böylece pHEMA temelli biyopolimerin eldesi için PVA kalıp ile birlikte pHEMA da saf suyun içerisinde 8 saat boyunca bekletildi (Şekil 8).



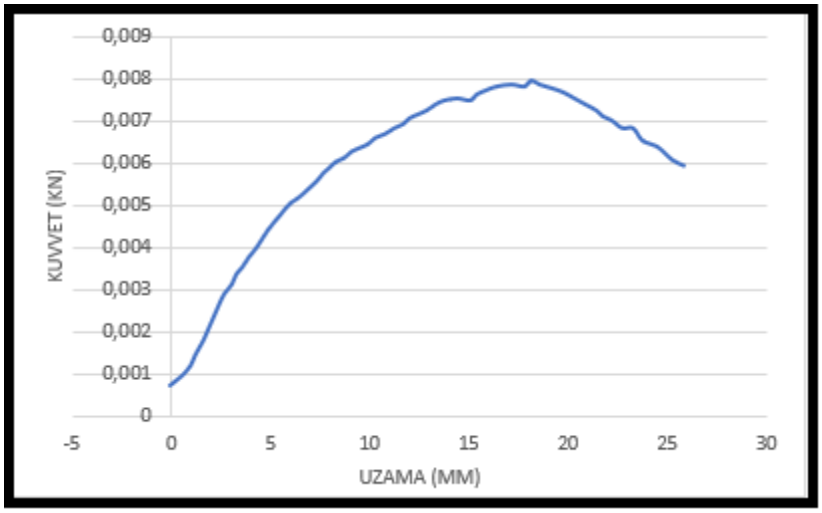
Şekil 8. Saf suyun içerisindeki pHEMA numunesi görüntüsü

3.2. Mekanik Deneylerin Sonuçları

4D eklemeli imalat cihazında üretilen ve saf sudan çıkarıldığı anda pHEMA polimerinin mekanik özellikleri, oda sıcaklığında uygulanan çekme deneyi ile belirlenmiştir. Biyouyumlu filmler ISO 527-3 test standardına uygun çekme testine maruz bırakılmıştır. Bu amaçla 20x5x4mm boyutlarında numuneler hazırlanmış ve deneyler en az 5 defa tekrarlanmıştır. Çekme testleri oda sıcaklığında 10 kN çekme yükünde ve 3 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda numunelerin elastiklik modülü (Young modülü) Eşitlik 2.1 de verilen bağıntı dikkate alınarak hesaplanmıştır (Alsayed, 2021).

$$\sigma = E*\varepsilon \quad (2.1)$$

Gerçekleştirilen beş çekme deneyi sonucunda elde edilen verilerin ortalaması sonucunda elde edilen kuvvet-uzama grafiği Grafik 1'de verilmiştir. Denklemdeki ifadelerden; ve σ: normal gerilme, ε: boyca uzama ve E: elastisite modülüdür.



Grafik 1. Biyouyumlu numuneye ait kuvvet-uzama grafiği

Üretilen 4D eklemeli imalat cihazında üretilen pHEMA'nın çekme deneyine tabi tutulması sonucunda numuneni 28mm değerinde uzadığı ve en büyük dayanım kuvvetinin (çekme mukavemeti) 8 newton (N) olduğu, 6N değerinde ise koptuğu görüldü. Elde edilen veriler 2.1 bağıntısında uygulandığında numunenin çekme mukavemeti ortalaması 35,6 kilopascal (kPa) değeri ve 0,93274 standart sapma değeri elde edilmiştir. Pruksawan S. vd., pHEMA ve farklı çapraz bağlayıcılar kullanarak elde ettiği hidrojellerin çekme mukavemeti değerlerini 33,6-156,2 kPa aralığında elde etmiştir (Pruksawan vd. 2022). Çalışma kullanılan 4D eklemeli imalat cihazında üretilen pHEMA numunesinin mekanik özelliklerinin literatür verileri ile uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

4. Sonuç

Bu çalışmada biyouyumlu numunelerin üretilmesi amacıyla üç boyutlu kartezyen sisteme ilave olarak z ekseninde döner tabla konulması 4D eklemeli imalat işlemini gerçekleştirebilen bir cihaz tasarlanmıştır. Cihazın sahip olduğu dördüncü eksen istendiği zaman dönerek kaplama işlemini de yapabilecek kapasiteye sahiptir. Bununla beraber tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen cihazın dış koşullardan etkilenmesini engellemek amacıyla sıcaklık, nem ve hava kontrolünün sağlanması ile beraber hermetik bir ortam oluşturulması amaçlanmıştır. Üretimi yapılan 4D eklemeli imalat cihazı üzerinde biyouyumlu numunelerin mekanik özelliklerini incelenebilmesi amacıyla UV ışın kaynağı sistemi, çalışmaya dahil edilmiştir. Biyouyumlu numunelerin literatürde kullanılanlarla karşılaştırılabilmesi için mekanik özellikleri incelenmiştir. Gelecek çalışmalarda UV polimerizasyon yöntemiyle numunelerin kürlenmesi ve kürlenen bu numunelerin işletme parametrelerinin etkisi incelenebilir.

Bilgilendirme

Bu çalışma Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası 2022/36.

Bu çalışma TÜBİTAK Araştırma Destek Programları Başkanlığı (ARDEB) tarafından desteklenmiştir. Proje numarası 123M213.

Kaynaklar

Alsayed, A. A. (2021). Physics of Open Fractures: Reconsidering Tissue Viability, Contamination Risk and Importance of Wound Debridement. Journal of Applied Mathematics and Physics, 09(01), 176–182. https://doi.org/10.4236/jamp.2021.91012

Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. Business Horizons, 60(5), 677–688. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011

Barkane, A., Platnieks, O., Jurinovs, M., & Gaidukovs, S. (2020). Thermal stability of UV-cured vegetable oil epoxidized acrylate-based polymer system for 3D printing application. Polymer Degradation and Stability, 181, 109347. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109347

Birkelid, A. H., Eikevåg, S. W., Elverum, C. W., & Steinert, M. (2022). High-performance polymer 3D printing – Open-source liquid cooled scalable printer design. HardwareX, 11, e00265. https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00265

Eichholz, K. F., Gonçalves, I., Barceló, X., Federici, A. S., Hoey, D. A., & Kelly, D. J. (2022). How to design, develop and build a fully-integrated melt electrowriting 3D printer. Additive Manufacturing, 58(April). https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102998

Garmabi, M. M., Shahi, P., Tjong, J., & Sain, M. (2022). 3D printing of polyphenylene sulfide for functional lightweight automotive component manufacturing through enhancing interlayer bonding. Additive Manufacturing, 56. https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102780

Gopinatha, S., & Nagarajanb, N. (2015). Journal of Applied Research and Technology. Journal of Applied Research and Technology, 13, 374–381.

Guoqing, Z., Junxin, L., Jin, L., Xiaoyu, Z., & Anmin, W. (2019). 3D metal printer dust filter structural optimal design and key performance research. Materials and Design, 183, 108114. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108114

Hachimi, T., Naboulsi, N., Majid, F., Rhanim, R., Mrani, I., & Rhanim, H. (2021). Design and Manufacturing of a 3D printer filaments extruder. Procedia Structural Integrity, 33(C), 907–916. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.101

Hong, S. Y., Kim, Y. C., Wang, M., Kim, H. I., Byun, D. Y., Nam, J. Do, Chou, T. W., Ajayan, P. M., Ci, L., & Suhr, J. (2018). Experimental investigation of mechanical properties of UV-Curable 3D printing materials. Polymer, 145, 88–94. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.04.067

Invernizzi, M., Natale, G., Levi, M., Turri, S., & Griffini, G. (2016). UV-assisted 3D printing of glass and carbon fiber-reinforced dual-cure polymer composites. Materials, 9(7). https://doi.org/10.3390/MA9070583

Izadifar, M., Chapman, D., Babyn, P., Chen, X., & Kelly, M. E. (2018). UV-Assisted 3D Bioprinting of Nanoreinforced Hybrid Cardiac Patch for Myocardial Tissue Engineering. Tissue Engineering - Part C: Methods, 24(2), 74–88. https://doi.org/10.1089/ten.tec.2017.0346

Kim, Y. C., Hong, S., Sun, H., Kim, M. G., Choi, K., Cho, J., Choi, H. R., Koo, J. C., Moon, H., Byun, D., Kim, K. J., Suhr, J., Kim, S. H., & Nam, J. Do. (2017). UV-curing kinetics and performance development of in situ curable 3D printing materials. European Polymer Journal, 93(May), 140–147. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.05.041

Le Duigou, A., Grabow, M., Castro, M., Toumi, R., Ueda, M., Matsuzaki, R., Hirano, Y., Dirrenberger, J., Scarpa, F., D'Elia, R., Labstie, K., & Lafont, U. (2023). Thermomechanical performance of continuous carbon fibre composite materials produced by a modified 3D printer. Heliyon, 9(3), e13581. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13581

Lee, S., Kim, Y., Park, D., & Kim, J. (2021). The thermal properties of a UV curable acrylate composite prepared by digital light processing 3D printing. Composites Communications, 26(May), 100796. https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100796

Li, Y., Zhong, J., Wu, L., Weng, Z., Zheng, L., Peng, S., & Zhang, X. (2019). High performance POSS filled nanocomposites prepared via UV-curing based on 3D stereolithography printing. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 117(July 2018), 276–286. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.11.024

Mantelli, A., Romani, A., Suriano, R., Diani, M., Colledani, M., Sarlin, E., Turri, S., & Levi, M. (2021). Uv-assisted 3d printing of polymer composites from thermally and mechanically recycled carbon fibers. Polymers, 13(5), 1–15. https://doi.org/10.3390/polym13050726

Minetola, P., Galati, M., Iuliano, L., Atzeni, E., & Salmi, A. (2018). The Use of Self-replicated Parts for Improving the Design and the Accuracy of a Low-cost 3D Printer. Procedia CIRP, 67, 203–208. https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.200

Ozkan, B., Sameni, F., Bianchi, F., Zarezadeh, H., Karmel, S., Engstrøm, D. S., & Sabet, E. (2022). 3D printing ceramic cores for investment casting of turbine blades, using LCD screen printers: The mixture design and characterisation. Journal of the European Ceramic Society, 42(2), 658–671. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.10.043

Priavolou, C., Troullaki, K., Tsiouris, N., Giotitsas, C., & Kostakis, V. (2022). Tracing sustainable production from a degrowth and localisation perspective: A case of 3D printers. Journal of Cleaner Production, 376(August), 134291. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134291

Pruksawan, S., Chee, H. L., Wang, Z., Luo, P., Chong, Y. T., Thitsartarn, W., & Wang, F. K. (2022). Toughened Hydrogels for 3D Printing of Soft Auxetic Structures. Chemistry - An Asian Journal, 17(19). https://doi.org/10.1002/asia.202200677

Rouf, S., Raina, A., Irfan Ul Haq, M., Naveed, N., Jeganmohan, S., & Farzana Kichloo, A. (2022). 3D printed parts and mechanical properties: Influencing parameters, sustainability aspects, global market scenario, challenges and applications. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 5(3), 143–158. https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.02.001

SÜRMEN, H. K. (2019). Eklemeli İmalat (3B Baski):Teknolojiler Ve Uygulamalar. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 24(2), 373–392. https://doi.org/10.17482/uumfd.519147

Vavoulas, A., Vaiopoulos, N., Hedström, E., Xanthis, C. G., Sandalidis, H. G., & Aletras, A. H. (2016). Using a modified 3D-printer for mapping the magnetic field of RF coils designed for fetal and neonatal imaging. Journal of Magnetic Resonance, 269, 146–151. https://doi.org/10.1016/j.jmr.2016.06.005

Vu, A. A., Burke, D. A., Bandyopadhyay, A., & Bose, S. (2021). Effects of surface area and topography on 3D printed tricalcium phosphate scaffolds for bone grafting applications. Additive Manufacturing, 39. https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101870

Zi, B., Wang, N., Qian, S., & Bao, K. (2019). Design, stiffness analysis and experimental study of a cable-driven parallel 3D printer. Mechanism and Machine Theory, 132, 207–222. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.11.003

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development
UMAGD, (2023) 15(2), 848-859.
10.29137/umagd.982240
Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Temmuz/July 2023
Araştırma Makalesi / Research Article

Dokuma Tezgahında Üretilen Denim Kumaşlarının Online Analizleri İçin Önerilen Yeni Bir Üretim Kayıt Modülü

A New Production Recording Module Recommended for Online Analysıs of Denim Fabrics Produced with Weaving Looms

Muhammed Fatih Talu[1], **Mahdi Hatami Varjovi** [1]

***Başvuru/Received**: 12/08/2023* ***Kabul / Accepted**: 21/06/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 13/07/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 14/07/2023*

Öz
Tekstil ve Hazır Giyim sektöründe dokuma tezgahlarında üretilen kumaşların bilgisayarla incelenmesi, otomatik hata tespiti ve kumaş analiz yazılımlarının geliştirilmesi için üretim anında online kayıt yapabilen sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Online kayıt sistemleri hareketsiz ve hareketli olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Hareketsiz sistemlerin yüksek çözünürlükte görüntü kaydı yapabilmelerine karşılık yüksek maliyetlere sahip olduğu görülmektedir. Gelişmekte olan hareketli sistemler düşük maliyet sunmakta, ancak kumaş türüne bağlı kayıt yapabilmektedir. Bu çalışmada kumaş türü sınırlaması olmaksızın yüksek çözünürlükte kayıt yapabilen ekonomik bir kayıt modülü önerilmektedir. Bu modül, doğrusal raylı bir mekanizma üzerinde kamerayı hareketlendirmekte ve kumaş üretim hızına göre kamera hareket hızını ayarlayabilmektedir.

Anahtar Kelimeler
"Gerçek zamanlı inceleme, doku sınıflandırma, görüntü işleme"

Abstract
In the Textile and Clothing sector, while producing fabrics there is need for computer-based examination systems on weaving loom machines in order to do the fabric analysis and online defect detection process. Online recording systems are divided into two categories: moving and stationary. It has high costs due to the ability of stationary systems to record high resolution images. The developing of moving equipment offers low cost, but it can record depending on the type of fabric. An economic recording module is proposed compared to fabric limitation of this kind, high resolution recording. This module drives the camera on a linear rail mechanism and can adjust its movement according to the fabric production speed.

Key Words
"Fabric defect detection, real time inspection, texture classification, computer vision"

***Sorumlu Yazar:** mahdi.hatami.v@gmail.com*

1. Giriş

Tekstil ve Hazır Giyim (THG) sektöründeki giyim ve diğer (çadır, branda vb.) ürünlerde kullanılan kumaşlar dokuma/örme makineleri kullanılarak üretilmektedir. Üretim esnasında kumaş hataları ortaya çıkmakta ve literatürde tanımlanmış 70'den fazla kumaş hatasının olduğu bilinmektedir. Bu hataların tespiti işlemi genellikle fabrikada vardiyalı çalışan işçilerle yapılmaktadır. Bu nedenle, emek yoğun bir sektör olan THG'de işçilik maliyetleri ve işçi hataları, işletmeler için önemli gider kalemlerinden birini oluşturmaktadır (Association & Council, 2001). THG sektöründe ilk yıllardan beri geleneksel olarak insan kontrolüne dayanan bir kalite kontrol sistemi kullanılmaktadır. Bu sistemde üretilen her bir kumaş topu kalite kontrol biriminde açılarak ışıklı bir makine üzerinde operatör tarafından izlenmektedir (bak Şekil 1). Operatör tarafından tespit edilen hatanın türü, boyutu ve sayısı not alınır ve incelenen her bir kumaş topu için hata istatistikleri tutulur. Bu istatistikler değerlendirilerek kumaş topunun kalitesi (birinci sınıf, ikinci sınıf şeklinde) belirlenir [2]. Ancak kalite kontrol biriminde yapılan bu kumaş analiz işlemi, üreticisi açısından iki önemli eksiklik içermektedir: 1) kumaş analizinin üretim esnasında değil, üretimden sonra gerçekleştirilmesi; 2) analiz işleminin insan kontrolüyle gerçekleştirilmesi. (Rasheed, et al., 2020) Kumaş hatalarının üretim esnasında tespit edilebilmesi hatanın ortaya çıktığı anda üretimin durdurulabilmesine imkân sağladığı için hataya neden olan problemin giderilmesini mümkün hale getirir. Böylece ortaya çıkan hatanın tekrarlanması engellenmiş olur. Örneğin dokuma tezgahındaki bir iğnenin kırılmasıyla meydana gelecek "iğne kırığı" hatası ilk ortaya çıktığı anda fark edilmez ve üretim durdurulmazsa, hata sonraki tüm kumaş topuna yansıyacak ve ikinci sınıf kumaş üretilecektir (Niles, Fernando, & Lanerolle, 2015). Kumaş kalitesindeki bu düşüş üreticiye üretim zararı olarak yansıyacaktır.



Şekil 1. İnsan kontrollü kumaş inceleme sistemleri

Kalite kontrol biriminde insan aracılığıyla yapılan analiz işlemi birtakım problemler içermektedir. İnsanın uzun süre benzer arka fona sahip bir kumaşa bakması göz yanılgısı ve dikkat dağınıklığının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Ayrıca kumaşa uzun süreli bakışlarda sağlık açısından problemlerin olduğu, baş ağrısı gibi rahatsızlıkların ortaya çıktığı bilinmektedir. Tüm bu olumsuzluklar yapılan kontrol işleminin başarısını düşürmektedir. İnsan odaklı yapılan kumaş kontrol işlemlerinde hata tespit başarısı %70 seviyesindedir (Stojanovic, et al., 2001). Başarı oranının yükseltilmesi, ortaya çıkan hataların indirgenmesi için otomatik kumaş kontrol sistemlerine ihtiyaç duyulduğu açıktır.

Otomatik kumaş kontrolü yapabilen sistemler üretim kalitesini arttırmak ve gider maliyetlerini azaltmak için daha uygun bir çözüm olarak görülmektedir. Bu sistemlerdeki temel amaç insan kontrolüne dayalı yapılan kontrol işleminin kameralı sistemlerle 7/24 kesintisiz gerçekleştirilmesidir. Kamera görüntülerinin analizi sonucunda kumaş topunda hatalı bölgelerin konumları tespit edilebilmekte ve hatalar sınıflandırılabilmektedir. Bu sistemler yukarıda bahsedilen insan kaynaklı olumsuzluklardan etkilenmemektedirler.

Kalite kontrol birimlerinde kullanılan otomatik kumaş analiz sistemleri, aydınlatma aparatı, kamera, lens ve bilgisayar yazılımı olmak üzere dört farklı bileşen içermektedir. Bu sistemlerdeki hata tespit başarımı %90'nın üzerine çıkabilmektedir (Wen & Wong, 2018). Tespit edilebilen bu hatalar istatistiksel olarak analiz edilerek bir rapor şeklinde kalite kontrol birimine iletilir. Sınırlı sayıda olsa da THS sektöründe kullanılan bu sistemlerin en büyük dezavantajı üretim esnasında değil, üretim tamamlandıktan ve kumaş topu kalite kontrol birimine iletildikten sonra çalışabilmesidir.

Kumaş hatalarını üretim esnasında online tespit etme yeteneğinden yoksun olan bu sistemler, kumaş üreticisinin üretim maliyetlerini düşürememekte ve hata başladığı anda üretimi durduramadığı için ikinci kalite ürünlerin ortaya çıkmasını engelleyememektedir (Hanbay, Yuvarlak örgü makineleri için görüntü işleme tabanlı kumaş hatası tespit sistemi., 2016). THG sektöründe kumaş üretimi için

dokuma ve örme makineleri kullanılmaktadır. Bu makinelerin fiziksel yapıları, kumaş örme teknikleri, kumaş üretim hızları birbirinden oldukça farklıdır. Bu çalışmada örme makinelerine değil, dokuma makinelerindeki üretime odaklanılmıştır.

Dokuma makinelerinde online hata yakalayabilen sistemlerin olduğu bilinmektedir. Ancak yüksek maliyetlere sahip bu sistemler sınırlı sayıda hatanın yakalanmasını sağlamakla birlikte, sınırlı kumaş türünde çalışmaktadır. Bahsedilen sınırlandırmaların minimize edilmesi ve ekonomik yerli sistemlerin üretilebilmesi bu çalışmanın temel motivasyonu oluşturmaktadır.
Kumaş hatalarının tespiti alanında ulusal çapta akademik çalışmaların bulunduğu (Şeker, Peker, Yüksek, & Delibaş, 2016; Wen & Wong, 2018) (Berkay & Hüseyin, 2019) (Hanbay, et al., 2015) ancak ürüne dönüşmüş yerli bir kumaş analiz sisteminin olmadığı bilinmektedir.

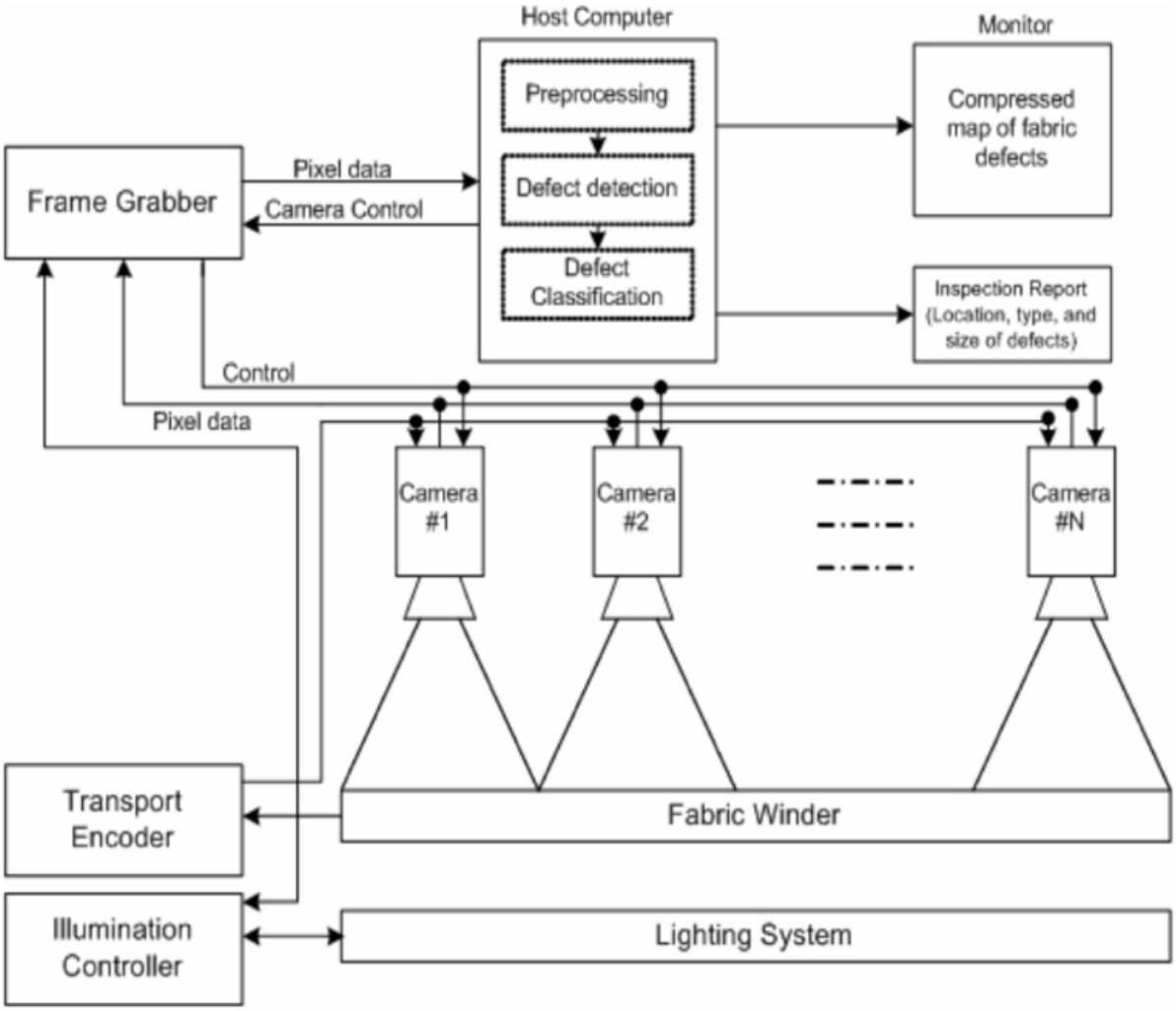
Kumaş analiz sistemleri iki temel modül içermektedir: 1) üretim kayıt modülü; 2) hata tespit modülü. Bu çalışmada sadece birinci modül hakkında yapılan çalışmalar yer almaktadır (Kumar, 2008). Kumaş hatasının tespiti ile ilgili çalışmalar bu çalışmanın kapsamı dışındadır.
Makalenin bundan sonraki organizasyonu şu şekildedir: Bölüm 2'de iki adet modern otomatik kumaş analiz sisteminin (BMSVision, Cyclops) üretim kayıt modülleri ifade edilmektedir. Bölüm 3'te önerilen kayıt modülünün donanımsal ve yazılımsal alt bileşenleri verilmektedir. Bu bölümün devamında mevcut ve önerilen kayıt modüllerinin üstünlük ve eksiklikleri birlikte irdelenmektedir. Bölüm 4'te elde edilen sonuçlar özetlenmektedir.

2. Online Kumaş Analiz Sistemleri

Dokuma tezgahında üretilen kumaşların üretim esnasında online analizini yapabilen sistemleri ikiye ayırmak mümkündür: 1) hareketsiz kamera kullanan sistemler; 2) hareketli kamera kullanan sistemler. Bu bölümde her iki sistemin çalışma prensibinden, üstünlük ve eksikliklerinden detaylı bir şekilde bahsedilmektedir.

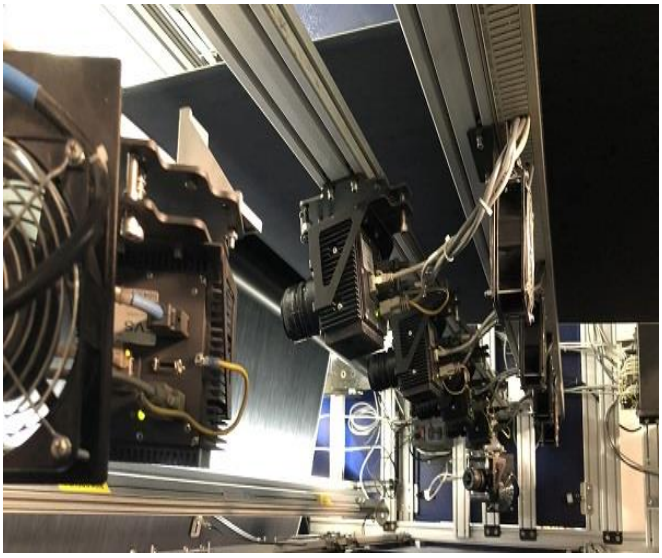
2.1. Hareketsiz kamera kullanan sistemler: Uster Vision

Hareketsiz kamera kullanan sistemlerin genel çalışma prensibi Şekil 2'de gösterilmektedir. Buna göre metrelerce uzunlukta kumaş üretebilen dokuma tezgahlarındaki kumaşların üretim anında incelenebilmesi için birden fazla hareketsiz kameranın yan yana birlikte çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Mak, Peng, & Lau, 2005). Üretilen kumaşa yaklaşık yarım metre uzaklığa yerleştirilen her bir kamerayla yine yarım metreye yakın bir kumaş alanının kayıt altına alınması mümkün olmaktadır (Castilho, Gonçalves, & Serafim, 2007). Bahsedilen bu mesafeler kumaş üzerinde incelenecek minimum hata boyutuna ve kumaşın üretim hızına bağlı olarak değişim göstermektedir (Sari-Sarraf & Goddard, 1999). Hareketsiz kamera sistemlerinde genellikle çizgi kamera ve çizgi ışık bileşenleri kullanılmaktadır. Bu sayede yüksek hızlarda üretilen kumaşların online analizi yapılabilmektedir (Schneider & Aach, 2012). Sistemde yer alan çerçeve tutucu kartı, birden fazla kamera görüntüsünün eş zamanlı elde edilmesi ve birleştirilerek tek bir kumaş görselinin üretilmesinde kullanılmaktadır.



Şekil 2. Hareketsiz sistemin çalışma şekli

Dokuma tezgahlarında farklı genişlikte (1m-5m aralığında) kumaş üretimleri gerçekleşmektedir. Örneğin 2m'lik bir kumaş üretiminde görüntü kaydının gerçekleştirilebilmesi için yan yana dört kameraya ihtiyaç duyulmaktadır. Her bir kameranın yaklaşık $3.000 maliyete sahip olduğu göz önüne alındığında, sadece kamera maliyetinin $12.000 olduğu görülmektedir. Bütün bir sistem olarak düşünüldüğünde (lens, ışık aparatı, çerçeve elde etme kartı, sunucu bilgisayar ve hata tespit yazılımı) tek bir dokuma tezgahında otomatik hata tespit maliyeti yaklaşık $50.000 seviyelerine yükselmektedir. Hiç şüphesiz hareketsiz kamera sistemlerinin yüksek maliyetlere sahip olması sahada tercih edilmesini engellemekte ve yaygın kullanımını önlemektedir. Şekil 3'te Uster Technologies Vision firmasının altı kameralı hareketsiz kumaş analiz sistemi gösterilmektedir.



Şekil 3. Uster Technologies

2.2. Hareketli kameralı sistemler: Cyclops

BMSvision firmasına ait Cyclops (BMSvision, 2019) adlı ürün Şekil 4'te hareketli kamera kullanan sistemlere örnek olarak verilebilir. Alman menşeli bu ürün, dokuma tezgâhı üzerinde doğrusal hareket sağlayan raylı bir mekanizma kullanmaktadır. Bu mekanizma üzerinde sağa ve sola hareket eden kamerayla üretilen kumaş izlenmekte, elde edilen kumaş görüntüleri ağ üzerinden sunucuya aktarılmakta ve sunucuda çalışan bir yazılımla otomatik hata tespiti yapılmaktadır. Cyclops uygun kumaş görüntüsünü elde edebilmek için mavi renkli ve flaşlı bir aydınlatma bileşeni kullanmaktadır (Goyal, 2018). Önceden tanımlanmış on adet kumaş hatasını tespit edebilen Cyclops'un en önemli dezavantajı, sınırlı kumaş türünde çalışabilmesidir (Vilumsone-Nemes, 2018). Örneğin Çalık Denim tarafından üretilen sığ dokumaya sahip denim kumaşlarında Cyclops çalışmamaktadır.

Sadece seyrek dokunan kumaş sistemlerde çalışan bu ürünün diğer dezavantajı gömülü görüntü analiz yeteneğinin olmaması, harici bir sunucuya ihtiyaç duymasıdır. Ayrıca Cyclops yüksek maliyetlere sahiptir. Bu eksiklikler ürünün piyasa pazarını oldukça daraltmakta, yaygınlaşmasını engellemektedir. Bu nedenle ülkemizdeki dokuma işletmelerinde bu ürünlerin kullanılmadığı, hala insan denetimiyle hataların tespit edildiği bilinmektedir.



Şekil 4. Cyclops

3. Önerilen Üretim Kayıt Modülü

Önerilen üretim kayıt modülünün görseli Şekil 5'te yer almaktadır. Hareketli kamera sistemleri içerisinde yer alan bu ürün, kamera ve doğrusal hareket sistemi bileşenleriyle Cyclops'a oldukça benzemektedir. Cyclops'dan farkı, kumaş türü sınırı olmaksızın her türlü kumaşta net görüntüyü elde edebilmesidir. Bunun anlamı dokunan kumaş türünün sığ veya seyrek olması fark etmeksizin üretim kayıt altına alınabilmektedir. Bu özelliğiyle oldukça geniş bir kullanım alanına sahip olacağı düşünülmektedir.

Önerilen kayıt modülü, özel tasarlanmış aydınlatma bileşenleri ve yazılımları sayesinde Cyclops'un görüntüleme noktasındaki dezavantajını ortadan kaldırmış, böylece net kumaş görüntüsünün elde edilebilmesini sağlamıştır. Bundan sonraki bölümde sırayla önerilen kayıt sisteminin sahip olduğu donanımsal bileşenlerden, daha sonra geliştirilen optimal hız yazılımlarından bahsedilmektedir.

3.1. Donanımsal bileşenler

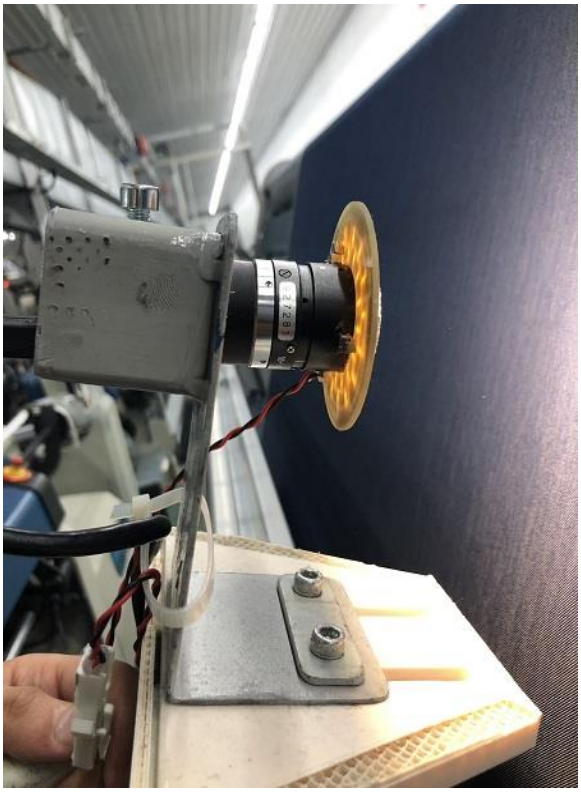
Önerilen üretim kayıt modülü, kamera, lens, doğrusal sistem ve aydınlatma bileşeninden oluşmaktadır. Kamera olarak FLIR firmasının düşük maliyetli endüstriyel bir kamerası seçilmiştir. Kamera ve kumaşın hareketli olması görüntülerde bulanıklık seviyesini yükseltmektedir. Bulanıklık seviyesini düşürmek için kamera sensör boyutunun yüksek olması (5.86nm) ve görüntünün 'global shutter' tekniğiyle oluşturulmasına dikkat edilmelidir. Ayrıca net görüntünün elde edilmesi için kamera sensörüyle ortama yayılan ışığın birbiriyle uyumlu seçilmesi gerekmektedir. Seçilen kameranın datasheet'i detaylı incelendiğinde en yüksek Quantum etkinlik (Quantum Efficiency) değerini (%81-82) yaklaşık 525nm dalga boyunda elde ettiği görülmüştür. Bunun anlamı kullanılacak ışığın 525nm dalga boyunda ışık yayması durumunda kameranın ışık değerini elektriğe dönüştürme etkinliği %80'ler seviyesinde olacak ve en net görüntüyü elde edebilecektir.

Kameranın kumaşa uzaklığı 10cm olarak belirlenmiştir. Bu mesafeden yaklaşık 12cm kumaş alanının görülebilmesi için 12mm odak uzaklığına sahip Sony markalı bir lens kullanılmıştır. Raylı mekanizma, hava basıncıyla kamera tablasını hareketlendirebilen 2.5m uzunluğunda doğrusal bir hareketli sistemidir.

Klasik LED aydınlatma modüllerinin kullanılması sonucunda elde edilen görüntülerde yüksek seviyeli bulanıklaşmanın olduğu görülmüştür. Bulanıklaşmanın tam olarak ortadan kaldırılması ve net görüntünün elde edilebilmesi için özel olarak tasarlarmış ve üretimi gerçekleştirilmiş aydınlatma bileşenleri kullanılmıştır. Bunun için ortama beyaz ışık yayan özel bir LED (CREE firmasının SMD LED serisi) seçilmiş olup, bu LED'in dalga boyu spektrumunun kamerayla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Seçilen LED 3500K veya 4000K beyaz ışıkla kullanılması durumunda ortama yüksek performansta ışık yayabilmektedir. Bu LED 150 mA akımda yaklaşık 70lümen ışık üretmektedir ve 150 lümen/watt ışıksal etkinlik değerine sahip olup, piyasanın en yüksek performanslı LED'lerinden biridir.
Şekil 6'da belirlenen LED'ler kullanılarak tasarlanan iki adet LED PCB gösterilmektedir. İlk modelde (sağ) 30 adet LED bulunmaktadır. Diğer modelde (sol) ise 9 adet LED ve 50 derece açıya sahip lensler bulunmaktadır. Kullanılan bu ledler ışığın geniş açıyla ortama yayılmasını engellemekte ve 50 derecelik bir alana odaklamaktadır. Her iki kart 12V DC ile çalışmaktadır. Ortamdaki ışık seviyesinin ayarlanabilmesi için çıkış gerilimini 8V-12V arasında değiştirilebilen bir regülatör devresi kullanılmıştır. Görüntü alma esnasında kamera hareketli bir mekanizma üzerinde olacağından PCB'lere enerji aktarımı için esnek kablolar ve özel bir soket bağlantısı kullanılmıştır. LED'lerin ısınma durumunu gözlemek için termal kamera kullanılarak ölçümler yapılmış ve LED jonksiyon sıcaklıklarının güvenli çalışma bölgesi içinde kaldığı görülmüştür.

3.2. Üretim hızı tespit algoritması

Bu bölümde Çalık Denim'de kabarcık (twill) dokuma yöntemiyle dokunan kumaşların üretim hızını otomatik tespit edebilen bir algoritma anlatılmaktadır. Bu dokuma yönteminde atkı ve çözgü desenleri birbirine paralel uzanan hatlar şeklinde bir görünümüne sahiptir. Kabarcık dokumayla dokunan kumaşın üretim hızını bulabilmek için atkı ve çözgü desen kalınlıklarının hangi hızlarda üretildiğinin belirlenmesi gerekir. Çözgü desen kalınlıkları hesaplama algoritması algoritma 1'de verilmektedir.



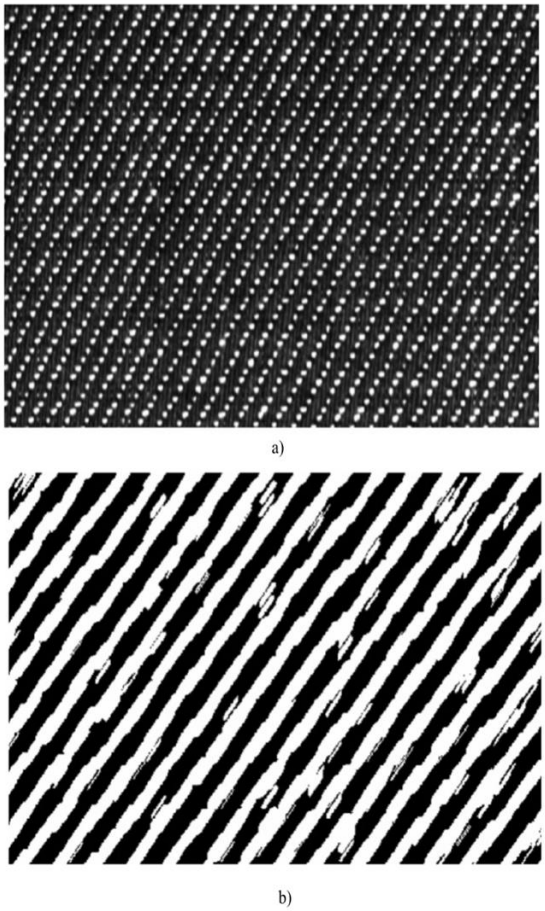
Şekil 5. Önerilen üretim kayıt modülü



Şekil 6. Aydınlatma Bileşenleri

Result: Ortalama Kumaş Üretim Hızı
Kumaş üretilirken 10 saniye görüntü kaydet (fps=15, toplam 150 görüntü);
Kalınlık = 1;
while *Herbir görüntü çerçevesini kullan* **do**
  Morfolojik operasyonlarla atkı/çözgü belirginleştir (bak Şekil 7.b);
  if *Görüntünün orta satırındaki piksel değerlerinde değişim varsa* **then**
    yedekle(Kalınlık);
    Kalınlık=1;
  else
    Kalınlık++;
  end
end
Tüm pikseller için hesaplanan değerin ortalamasını bul;

Algoritma 1. Kumaş üretim hızı tespit algoritması



a)

b)

Şekil 7. Online üretim görüntüleri. kumaş (a), atkı ve çözgü belirginleştirme (b)

Tablo 1. Görüntülerden elde edilen bilgiler (Düşük Hız)

#	Çerçeve1(px/s)	Çerçeve2(px/s)	Fark(px/s)	Toplam piksel(px/s)
1	14	19	5	44
2	19	23	4	44
3	23	27	4	40
4	27	31	4	44

#	Çerçeve1(px/s)	Çerçeve2(px/s)	Fark(px/s)	Toplam piksel(px/s)
5	31	34	3	45
6	34	41	7	43
.	.	.	.	.
150	41	45	4	45

Bu algoritma kumaş üretimi devam ederken ve dokuma hızının 300Devir/Dakika ve 650Devir/Dakika durumlarında çalıştırılmıştır. Kamera FPS değeri 15 olarak ayarlanmış ve 10 saniye kayıt yapılmıştır. Kaydedilen örnek bir kumaş görüntüsü Şekil 7 (a)'da gösterilmektedir. Bu görüntü üzerinde morfolojik operasyonlar gerçekleştirilerek atkı ve çözgü desenlerinin belirginleşmesi sağlanmıştır (bak Şekil 7 (b)). Kaydedilen toplam 150 görüntü çerçevesinde atkı ve çözgü desen kalınlıkları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmektedir. 150 görüntü ortalaması üzerinden yapılan hesaplamaya göre kumaş üretim hızı 150piksel/s veya 8mm/s olarak hesaplanmıştır.

3.3. Optimal kamera hızının tespiti algoritması

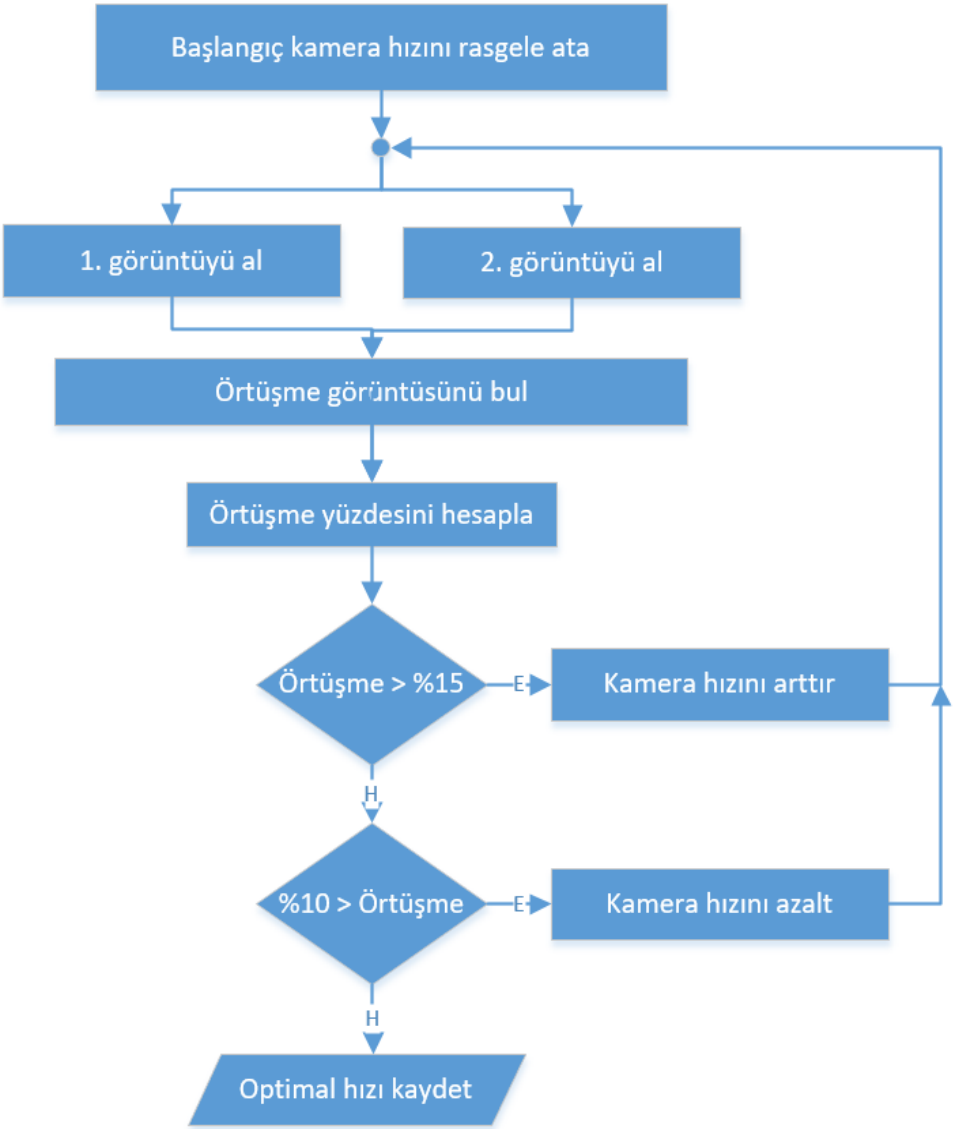
Bu bölümde, doğrusal sistemle dokuma tezgâhı üzerinde gezdirilen kameranın optimal hız değerinin tespiti hakkında yapılan çalışmalardan bahsedilmektedir. Kameranın yüksek hızda hareketi, kumaşın bazı bölümlerinin kaydedilememesi, düşük hızda hareketi, aynı kumaş bölümünün birçok kez kaydedilmesine neden olmaktadır. Optimal hızda hem kumaş rulo sarmalı eksiksiz kaydedilmekte hem de yüksek örtüşmenin olduğu gereksiz görüntü kaydı önlenmektedir.

Doğrusal raylı mekanizma üzerinde hava basıncıyla hareket ettirilen kameranın hızı potansiyometre aracılığıyla ayarlanmaktadır. İlk olarak hızdaki değişimin gözlemlenebilmesi için hava basınç değeri dijital bir ekrana yansıtılmıştır. Daha sonra Şekil 8'de gösterilen optimal kamera hızı tespit algoritması çalıştırılmıştır.

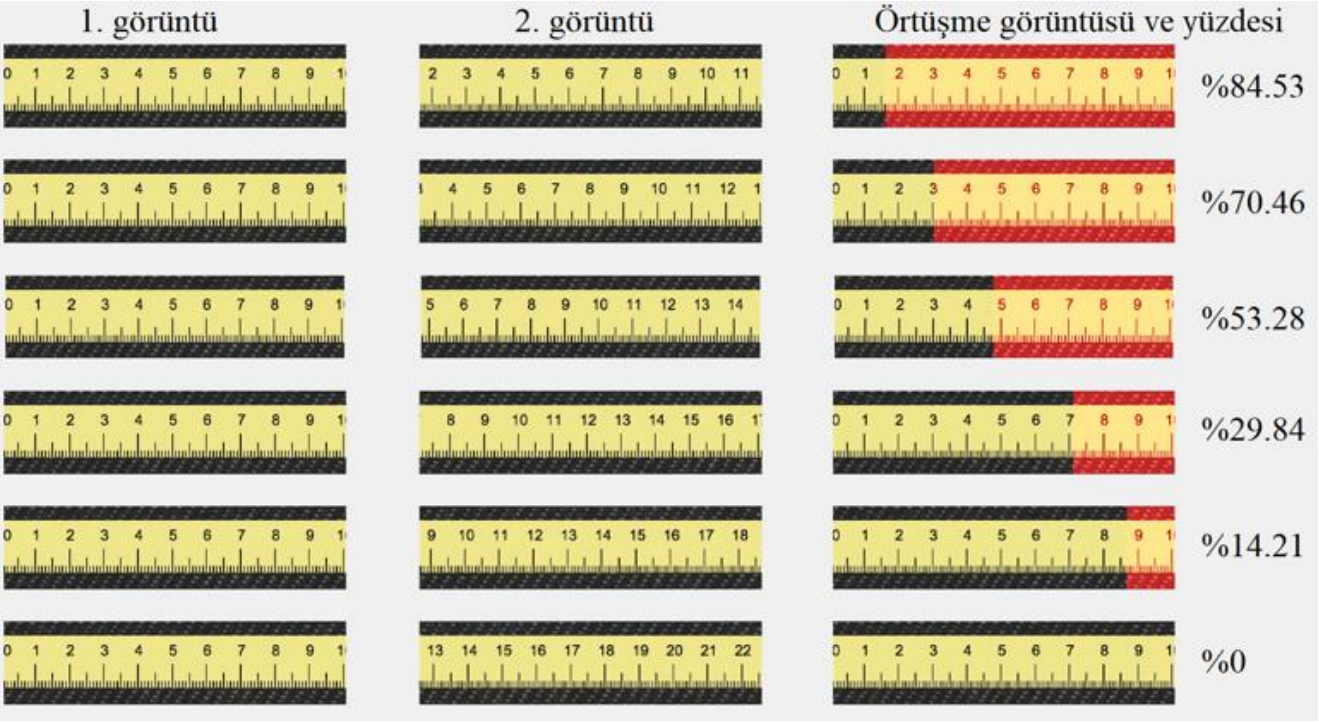
Bu algoritma, kumaş üretimi esnasında kamerayla elde edilen görüntüleri işleyerek kamera hızının artıp azalmasına karar vermekte, sonuçta optimal kamera hızını tespit edebilmektedir. İlk aşamada ardışık iki görüntü arasındaki örtüşen bölgenin tespiti yapılır. Bunun için iki boyutlu normalize edilmiş korelasyon metriği kullanılmıştır ve görüntü çiftleri arasındaki korelasyon sinyali elde edilmektedir. Bu sinyalin maksimum değeri yeterli bir örtüşmenin olup olmadığı hakkında bilgi vermektedir. 1 tam örtüşmeyi, 0 örtüşmenin olmadığı gösterir. Yeterli bir örtüşmenin olması durumunda örtüşme yüzdesinin hesaplanmasına geçilir. Bu değer örtüşme bölge genişliğinin tüm genişliğe oranıyla hesaplanır. Kameranın optimal hızlarda hareket etmesi, örtüşme yüzdesinin %10-%15 aralığında olmasıyla anlaşılmaktadır. Hesaplanan örtüşme yüzdesi belirtilen aralığın üzerindeyse kamera hızlandırılır, altındaysa yavaşlatılır ve algoritma tekrar başa döner. Optimal hız değeri bulunduktan sonra hız sabitleştirilir ve kumaş üretim süreci kayıt altına alınır.

Görüntüler arasında hesaplanan örtüşme oranının doğrulaması için üretilen kumaş sarmalı üzerine bir metre koyulmuş ve ardışık görüntüler kaydedilerek örtüşen bölgenin tespiti yapılmıştır. Önerilen optimal kamera hızı belirleme aşamasında farklı kumaş boyutlarında ve farklı kumaş dokuma hızlarında algoritma yürütülmüştür.

Şekil 9'da farklı görüntü çiftleri arasındaki örtüşme bölgelerinin tespitine ait doğrulama sonuçları gösterilmektedir. Algoritma, birinci ve ikinci sütunda gösterilen görüntüler arasındaki örtüşme yüzdesini hesaplamaktadır. Üçüncü sütunda algoritmanın tespit ettiği örtüşme görüntüsü ve yüzdesi gösterilmektedir. Sonuçlar dikkatlice incelendiğinde, ilk dört satırda örtüşme yüzdesi %15'in üzerinde hesaplandığı görülmektedir. Bu durumda kamera hızlandırılmaktadır. Son satırda örtüşme yüzdesinin %10'un altına düşmesi nedeni ile kamera yavaşlatılır. 5. satırda hesaplanan örtüşme yüzdesi değeri belirlenen aralığın içerisinde olduğu için kamera hızı optimal kabul edilir ve hız sabitlenerek görüntü kayıt işlemi başlatılır.



Şekil 8. Optimal hız kaydet



Şekil 9. Örtüşme görüntüsünü ve yüzdesini bulma

4. Sonuçlar

Bu çalışmada farklı boyutlardaki dokuma tezgahlarında kullanılabilecek bir üretim kayıt modülü tanıtılmaktadır. Bu modülün piyasada bulunan benzerlerinden en önemli üstünlüğü kumaş üretim hızını ve kameranın optimal hareket hızını otomatik tespit eden yazılımlara sahip olmasıdır. Hareketli bir sistem üzerinde gezdirilen kamerayla net görüntü alabilmek için iki farklı ışık çalışması yapılmış ve kamerayla uyumlu aydınlatma bileşenleri geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yazılımlar ve donanımsal bileşenler sayesinde düşük maliyetli donanımsal bileşenlerle net kumaş görüntülerinin kaydedilebildiği gösterilmiştir. Önerilen sistemin daha net görüntü alabilmesi için kumaş eninin 180cm den küçük olması gerekmektedir. Üretilen kumaşın eni 180cm den büyük olma durumunda kumaşın tamamını izleyebilmek adına raylı mekanizmanın hızı yükseltilmiştir, bu işlemin sonucunda net görüntü elde edilememiştir. 180cm den büyük kumaşlarda üretim hızının minimum sevide olması gerekmektedir. Fabrika ortamında kumaş üretimini maksimuma yükseltmek adına dokuma makinaları 500-550 devir/dakika hızında çalışmaktadır. Bu çalışmada denim kumaş veri tabanı inşa edilmiştir. Bir sonraki çalışmada bu modül kullanılarak kaydedilen kumaş görüntülerinde otomatik hata tespit yazılımı geliştirilecek ve en sık karşılaşılan hataların tespiti yapılacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Teydep Proje No: 5180054).

Çalık Denim, Dünya'nın önde gelen premium denim üreticileri arasında yer almaktadır ve bu çalışmada elde edilen görüntüler ve ilk prototip denemeleri bu fabrikada yapılmıştır.

Referanslar

Association, H. K., & Council, H. K. (2001). Textile Handbook. Hong Kong: Hong Kong Cotton Spinners Association.
Berkay, B., & Hüseyin, Z. Ö. (2019). Dokuma kumaş hatalarının sistematik sınıflandırılması üzerine bir çalışma. Tekstil ve Mühendis, 26-114, 156-167.

BMSvision. (2019). Cyclops. https://www.bmsvision.com/products/camera-inspection.

Castilho, H. P., Gonçalves, P. J., & Serafim, A. L. (2007). Intelligent Real-Time Fabric Defect Detection. Image Analysis and Recognition, (s. 1297-1307). Berlin, Heidelberg.

Goyal, A. (2018). Automation in fabric inspection. The Textile Institute Book Series (s. 75-107). içinde Bhiwani, India: Woodhead Publishing.

Hanbay, K. (2016). Yuvarlak örgü makineleri için görüntü işleme tabanlı kumaş hatası tespit sistemi. Phd thesis.

Hanbay, K., Alpaslan, N., Talu, M. F., Hanbay, D., Karci, A., & Kocamaz, A. F. (2015). Continuous rotation invariant features for gradient-based texture classificatio. Comput. Vis. Image Underst., 132, 87-101.

Kumar, A. (2008). Computer-Vision-Based Fabric Defect Detection: A Survey. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(1), 348-363.

Mak, K., Peng, P., & Lau, H. (2005). A real-time computer vision system for detecting defects in textile fabrics. IEEE International Conference on Industrial Technology. Hong Kong, China.

Ngan, H. Y., Grantham, K. P., & Yung, N. H. (2011). Automated fabric defect detection—A review. Image and Vision Computing, 29(7), 442-458.

Niles, S. N., Fernando, S., & Lanerolle, W. D. (2015). A System for Analysis, Categorisation and Grading of Fabric Defects using Computer Vision. Research Journal of Textile and Apparel, 19(1).

Rasheed, A., Zafar, B., Rasheed, A., Ali, N., Sajid, M., Dar, . . . Tariq, M. (2020). Fabric Defect Detection Using Computer Vision Techniques: A Comprehensive Review. Mathematical Problems in Engineering (Hindawi), 2020(8189403), 24.

Sari-Sarraf, H., & Goddard, J. (1999). Vision system for on-loom fabric inspection. IEEE Transactions on Industry Applications, 35(6), 1252 - 1259.

Schneider, D., & Aach, T. (2012). Vision-based in-line fabric defect detection using yarn-specific shape features. Image Processing: Machine Vision Applications V. Burlingame, California, United States.

Şeker, A., Peker, K. A., Yüksek, A. G., & Delibaş, E. (2016). Derin Ögrenme ile Kumas Hatası Tespiti. 24th Signal Processing and Communication Application Conference.

Stojanovic, R., Mitropulos, P., Koulamas, C., Karayiannis, Y., Koubias, S., & Papadopoulos, G. (2001). Real-Time Vision-Based System for Textile Fabric Inspection. Real-Time Imaging, 7(6), 507-518.

Vilumsone-Nemes, I. (2018). Automation in spreading and cutting. Automation in Garment Manufacturing (s. 139-164). Novi Sad, Serbia: Woodhead Publishing.

Wen, J., & Wong, W. (2018). Fundamentals of common computer vision techniques for fashion textile modeling, recognition, and retrieval. The Textile Institute Book Series (s. 17-44). The Textile Institute Book Series.

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development
UMAGD, (2023) 15(2), 860-871.
10.29137/umagd.1285188
Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Temmuz/July 2023
Araştırma Makalesi / Research Article

Yumuşak Doku Onarımı için Poli(l-laktid-ko-kaprolakton) Biyobozunur Cerrahi Yamaların 3B Baskısı ve Jelatin Kaplanması

3D Printing and Gelatin Coating of Poly(l-lactide-co-caprolactone) Biodegradable Surgical Meshes for Soft Tissue Repair

Bengi Yılmaz[1]

[1]*Biyomalzeme Ana Bilim Dalı, Hamidiye Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Sağlık Bilimleri Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 18/04/2023* ***Kabul / Accepted**: 20/06/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 13/07/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 14/07/2023*

Öz

Yumuşak doku defektleri, kas veya bağ dokusunun zayıflaması veya bozulması nedeniyle oluşur. En sık görülen yumuşak doku hasarları arasında yer alan fıtıkların onarımında, çoğunlukla dokuyu desteklemek ve iyileşme sürecini kolaylaştırmak için, defekt bölgesine sentetik bir cerrahi yama yerleştirilir. Şimdiye kadar, mekanik performansı dokuyu desteklemeye yeterli olan, optimum doku rejenerasyonu sağlayan ve postoperatif komplikasyonları en aza indirgeyen bir cerrahi yama mevcut olmadığı için ideal malzeme ve teknik kombinasyonu arayışları devam etmektedir. Bu çalışmada, üç boyutlu (3B) basılmış makro gözenekli poli(l-laktid-ko-kaprolakton) (PLCL) ile bir mesh üretilerek, biyouyumluluğun artırılması amacıyla yüzeyi jelatin (Jel) ile kaplanmıştır. Elde edilen PLCL/Jel yamanın PLCL katmanındaki gözenek boyutunun 661,7±30,6 µm olduğu tespit edilmiştir. Yüzeyde homojen yayılmış hidrofilik karakterdeki jelatin kaplamanın su ile yüzey temas açısı 58,5±3,0° olarak kaydedilmiştir. PLCL/Jel yamaların temas açısı ise 60,5±8,8° olarak ölçülmüştür. *In vitro* biyobozunma deneylerinde, jelatin kaplamanın hidrolitik bozunmasının başladığı gösterilmiştir; ancak sentetik polimerin nispeten daha yavaş bozunmasına bağlı olarak, PLCL/Jel yamanın başlangıç ağırlığının %93,68±3,18'ini koruğu belirlenmiştir. Yalnız PLCL'den üretilen meshlere göre, PLCL/Jel yamanın çekme gerilimi (σ_M) önemli oranda artarak 6,45±1,20 MPa'a çıkmıştır ve çekme gerinimi (ε_M) %10,47±7,41 düzeyine inmiştir. Bu değerler, PLCL/Jel yamanın karın duvarında meydana gelen fıtıkların onarımında değerlendirilmek üzere optimum mekanik özellikler sergilediğini işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler

"3B baskı, Poli(l-laktid-ko-kaprolakton), Jelatin, Biyobozunur, Cerrahi yama, Çekme testi"

Abstract

Soft tissue defects occur due to the weakening and deterioration of muscle or connective tissues. In the repair of hernias, one of the most common types of soft tissue damage, a synthetic surgical mesh is implanted into the defect area, often to support the tissue and facilitate the healing process. Since there is no surgical mesh that has the sufficient mechanical performance to support the tissue and minimizes postoperative complications while ensuring optimal tissue regeneration, the search for the ideal combination of materials and techniques continues. In this study, a macroporous poly(l-lactide-co-caprolactone) (PLCL) mesh was 3D printed and its surface was coated with gelatin (Gel) to increase biocompatibility. It was determined that the pore size of the PLCL layer in the PLCL/Gel patch was 661.7±30.6 µm. The water contact angle of the homogeneously spread hydrophilic gelatin coating on the surface was recorded as 58.5±3.0°. The contact angle of PLCL/Gel patches was measured as 60.5±8.8°. *In vitro* biodegradation experiments have shown that hydrolytic degradation of the gelatin coating begins; however, due to the relatively slow degradation of the synthetic polymer, the PLCL/Gel patch retained 93.68±3.18% of its initial weight. Compared to pure PLCL meshes, the tensile strength (σ_M) of the PLCL/Gel was increased considerably to 6.45±1.20 MPa, and the tensile strain (ε_M) was reduced to 10.47±7.41. These values indicate that the PLCL/Gel patch exhibits optimum mechanical properties to be exploited in the repair of abdominal wall hernias.

Key Words

"3D printing, Poly(l-lactide-co-caprolactone), Gelatin, Biodegradable, Surgical mesh, Tensile test"

***Sorumlu Yazar: bengi.yilmaz@sbu.edu.tr**

1. Giriş

Cerrahi yama, yumuşak doku defektlerinin onarımını sağlayan ve dokuya mekanik destek sağlanmasını gerektiren müdahaleler sırasında vücuda implante edilerek bir dizi işlevi yerine getirebilen, çeşitli esnek, kumaş tipi malzemeleri ifade etmek için kullanılan genel bir terimdir (Taylor, 2018). Bu yamalar genellikle karın fıtıklarını onarmak için yapılan operasyonlarda kullanılır. Ayrıca, cerrahi yamalar, organların hareket etmesini önlemek ve idrarın tutulmasına yardımcı olmak gibi farklı amaçlarla pelvik organ veya üro-jinekolojik işlemlerde de tercih edilmektedir.

Cerrahi yamalar, genellikle farklı mesh (meş, ağ) formlarında üretilmektedir. Bunlardan en yaygını örgü yapısına sahip olanlardır ve tipik olarak polipropilen (PP), politetrafloroetilen (PTFE), poliviniliden florür (PVDF) gibi sentetik polimerik malzemelerden veya çeşitli kompozitlerden üretilir (Baylón vd., 2017). Mevcut ticari ürünler, üretim yöntemleri, lif özellikleri ve malzeme açısından önemli farklılıklar göstermektedir. Ayrıca, yumuşak doku desteği sağlayan biyomalzemeler yalnız örgü meshler ile sınırlı değildir. Örneğin, örgülü poli-4-hidroksibutirattan (P4HB) elde edilen Phasix™ monofilament meş, yumuşak dokuyu güçlendirmede ve takviye malzeme kullanımını gerektiren fıtık veya diğer fasyal defektlerin onarımı gibi prosedürlerde kullanılmaktadır (Medtronic, 2023-a). Diğer yandan, paraözofageal/hiatal herni onarımı, karın duvarı rekonstrüksiyonu, insizyonel herni (kesi yeri fıtığı) onarımında kullanılmak üzere tasarlanmış olan GORE® BIO-A® doku iskelesi, %67 poliglikolik asit (PGA) ve %33 trimetilen karbonattan (TMC) yapılmış sentetik ağ yapısındadır (GORE Medical, 2023).

Yamaların, biyobozunur (emilebilir) veya vücut içerisinde kalıcı özellikteki malzemelerden üretilmesi mümkündür. Biyobozunur ve kompozit yamaların avantajı; genellikle komplikasyonlarının az olması ve dokunun yama içerisine doğru büyümesine olanak sağlamalarıdır. Bunlar genellikle kullanımdan önce hidrasyon gerektirir (Baylón vd., 2017). Biyolojik malzemelerden üretilmiş biyobozunur özellikteki yamalara, işlenmiş domuz dermal matris tabakasından oluşan Strattice™ örnek verilebilir (Allergan Aesthetics, 2023). Kullanım alanları arasında fıtıkların veya diğer yumuşak doku defektlerinin onarımı yer alır. Doğal hücre dışı matristen (extracellular matrix, ECM) oluşan cerrahi yamalar, polipropilen alternatiflerinin aksine vücutta yabancı cisim reaksiyonuna sebep olmaz, ayrıca enfeksiyonu önlemede ve aşırı fibröz doku oluşumunun önüne geçmede etkilidir. Bu yamalar, yoğun fibröz doku yerine adipoz doku, kas dokusu veya vaskülarize retiküler bağ dokusu gibi bölgeye uygun dokuların oluşumunu desteklese de polipropilen meshler gibi yüksek mekanik dirence sahip değildirler (Wolf vd., 2014). Bu nedenle, hem sentetik polimerlerin optimal mekanik özelliklerini, hem de doğal doku bileşenlerinin sağladığı rejenerasyon kabiliyetini birlikte sunabilen kompozit yapılara ihtiyaç vardır. Kompozit malzemeden üretilmiş yamalardan biri olan Parietex™, iç tarafı viseral doku yapışmasını en aza indirebilmek için biyobozunur ve hidrofilik bir kolajen bariyer ile kaplanmış olan polyester örgü yapısına sahip ticarileşmiş ilk yamadır (Bilsel & Abci, 2012). Üç boyutlu (3B) mono-filament formundaki polyester tekstil kısmı 1,5×1,8 mm büyüklüğünde gözeneklere sahiptir (Medtronic, 2023-b). Ancak, akut ve uzun vadeli komplikasyonları ve semptomları azaltmada etkili çoklu işlevli kompozit cerrahi yamalar henüz mevcut değildir (Shin vd., 2021).

Cerrahi yamaların üretim teknolojileri, eriyik ekstrüzyon ve örgü gibi gelenekselleşmiş sayılabilecek süreçler ile sınırlıdır (Baylón vd., 2017). Diğer yandan, bir eklemeli imalat teknolojisi olan üç boyutlu (3B) baskı, son yıllarda karmaşık biyomimetik yapıların üretimine olanak sağlaması, hastaya yönelik kişiselleştirilmiş çözümler sunması ve çok yönlülüğü sayesinde doku mühendisliği, rejeneratif tıp ve biyomalzeme mühendisliğinin güçlü bir üretim aracı olarak öne çıkmaktadır. Biyomalzeme alanında 3B baskının kullanıldığı çalışmalar giderek yaygınlaşsa da cerrahi yamaların üretiminde bu teknolojiye yer verilen çalışmaların sayısı oldukça kısıtlıdır. Son yıllarda yapılan az sayıdaki çalışmada, polipropilen ve polivinil alkol (PVA) kullanılarak siprofloksasin yüklenmiş cerrahi yamalar (Qamar vd., 2019), aljinat ve su bazlı poliüretandan yapılan mesh implantlar (Olmos-Juste vd., 2022), aselüler dermal matriks ile birleştirilen polilaktik asit mesh (Song vd., 2023) yer almaktadır.

Bu çalışmada ise, kompozit yapıda biyobozunur yamaların üretiminde sentetik polimer meshin 3B baskı ile oluşturulması ve biyouyumluluğu artırmak amacıyla yüzeyinin doğal bir biyomakromolekül ile kaplanması amaçlanmıştır. 3B baskı için, yapısındaki monomer oranına bağlı olarak değişen mekanik özelliklere sahip, L-laktid ve ε-kaprolaktondan sentezlenen, biyouyumlu ve biyobozunur bir termoplastik polimer olan (Liu vd., 2021) poli(l-laktid-ko-kaprolakton) (PLCL) tercih edilmiştir. PLCL'in bozunma hızı ve mekanik özellikleri farklı klinik uygulamalar için hedeflenen doku özelliklerine uyacak şekilde değiştirilebilir. Ayrıca, kolay işlenebilirliği nedeniyle gözenekli doku iskelelerinin üretiminde umut verici bir malzeme olarak ortaya çıkmaktadır (Mendebil vd., 2020). Sentetik polimerlerin doku entegrasyonunu iyileştirebildiği gösterilen (Ulrich vd., 2012) jelatin ise, bu çalışmada üretilen yamalarda kaplama malzemesi olarak kullanılmıştır.

2. Materyal ve Metot

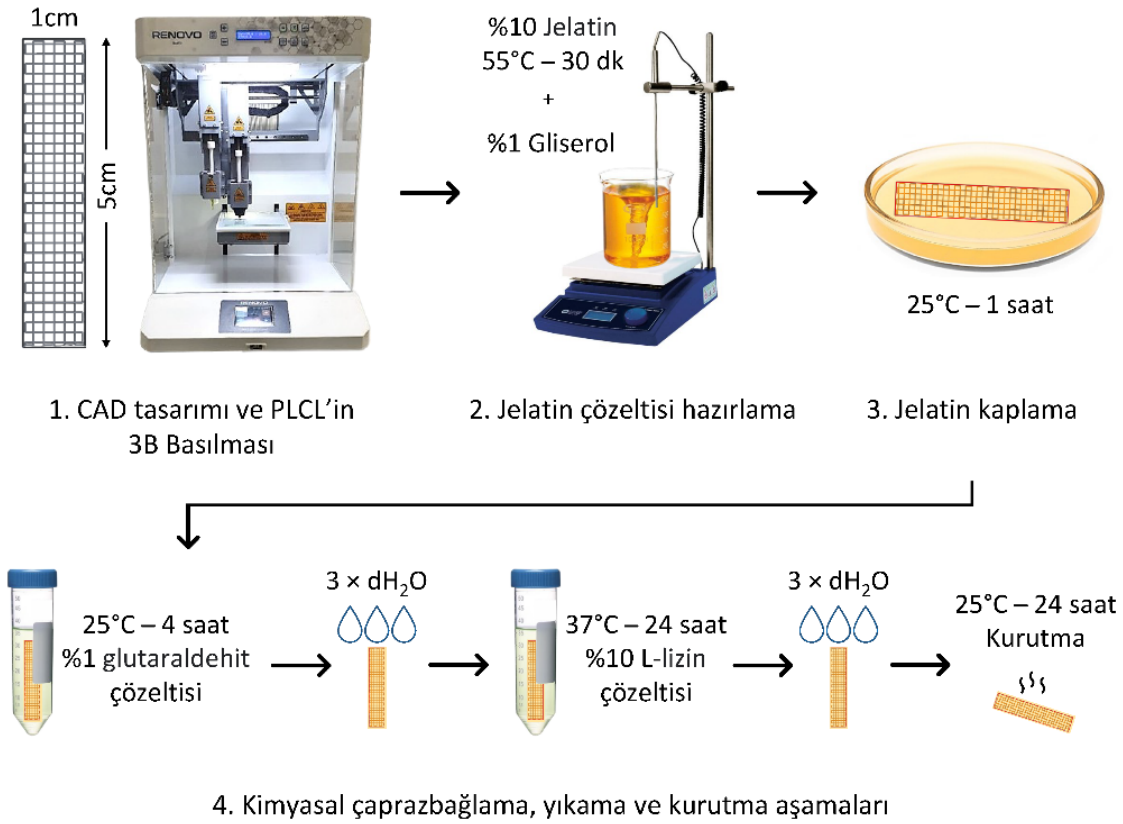
2.1. Malzemeler

Jelatin kaplı PLCL (PLCL/Jel) yamaları üretmek için l-laktid:ε-kaprolakton ağırlıkça oranı 70:30 olan poli(l-laktid-ko-ε-kaprolakton) (PLCL, PURASORB® PLC 7015, Corbion, Hollanda) ve jelatin (Bio Basic, Kanada) kullanılmıştır. Çaprazbağlayıcı olarak kullanılan glutaraldehit ve plastikleştirici olarak kullanılan gliserol Bio Basic, Kanada'dan temin edilmiştir. L-lizin (gıda sınıfı) yerel bir tedarikçiden satın alınmıştır.

In vitro biyobozunma deneylerinde kullanılan fosfat tamponlu salin (PBS) çözeltisinin hazırlanması için analitik saflıktaki KCl, KH_2PO_4, NaCl and Na_2HPO_4 bileşikleri Sigma-Aldrich, ABD'den ve antimikrobiyal madde olarak kullanılan NaN_3 Tekkim, Türkiye'den temin edilmiştir.

2.2. 3B baskı ve Jelatin kaplama ile PLCL/Jel yamaların üretimi

Şekil 1'de, eriyik biriktirme yöntemi (Fused Deposition Modeling, FDM) tabanlı bir 3B biyobasım cihazı ile mesh formundaki PLCL yamaların elde edilmesi ve jelatinle kaplanması sonucunda PLCL/Jel yamaların üretim sürecini özetleyen bir akış şeması verilmiştir.



Şekil 1. 3B basılmış PLCL yamaların jelatin kaplanması ile PLCL/Jel yamaların üretimine ait basamakları gösteren akış şeması.

PLCL'in 3B baskısı için öncelikle Paint3D (Microsoft) programında şerit şeklinde 3B obje çizilerek, 3D Builder (Microsoft) yazılımında 10×50×0,5 mm olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Elde edilen 3B model .stl formatında dışa aktarılmıştır. Bu .stl dosyası, Cura (Ultimaker, Hollanda) yazılımında 3B baskı için gerekli olan dilimleme ve konumlandırma bilgilerini içeren geometrik kod (gcode) komut dosyasına çevrilmiştir. Mesh şeklindeki PLCL katmanların tasarımında yer alan filamanların x ve y eksenlerinde 90° açı farkıyla konumlanması ve %50 dolgu (infill) oranında kare gözenekler oluşturması sağlanmıştır.

3B baskı işlemine PLCL granüllerin paslanmaz çelik şaftlı ve teflon pistonlu bir metal şırıngaya yerleştirilmesiyle başlanmıştır. Sonrasında, 3B biyobasım cihazının (BioXT, Renovo, Ankara, Türkiye) termoplastik baskı kafasının sıcaklığı 150°C'ye ayarlanmıştır. Baskı hızı 10 mm/saat olarak belirlenmiştir. Metal şırınganın ucunda 400 µm çaplı çelik nozül kullanılmıştır. Nozülden çıkan filamentin baskı yatağına tutunmasının kolaylaştırılması için yatağın sıcaklığı 50°C'ye çıkarılmıştır ve üzerine cam tabla yerleştirilmiştir. Tek katmanlı PLCL yamalar oluşturulduktan sonra kullanılana dek -20°C'de saklanmıştır.

3B basılmış PLCL yamaların üzerine jelatin kaplanması için öncelikle distile suda jelatin çözeltisi (%10 w/v) hazırlanmıştır. Çözelti, jelatinin tamamen çözünmesi için 30 dakika boyunca sürekli karıştırma altında 55°C sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Jelatin kaplamanın esnekliğini koruması için çözeltiye %1 oranında gliserol ilave edilmiştir ve manyetik karıştırıcıda 37°C'de 30 dakika karıştırılmıştır. Bir petri kabına yerleştirilen 3B basılmış PLCL örnekler üzerine 6,5 ml jelatin çözeltisi dökülmüştür ve oda sıcaklığında %55±5 bağıl nemde 1 saat süreyle katılaşması için beklenmiştir. Elde edilen PLCL/Jel yamaların etrafındaki fazla kaplama bir bisturi yardımıyla kesilmiştir. Sonrasında yamalar ayrı ayrı falkon tüplere alınarak 10 ml %1 (v/v) glutaraldehit sulu çözeltisi içerisinde 25°C'de 4 saat bekletilmiştir. Üç kez distile suyla yıkanan yamalar, 24 saat boyunca 37°C'de PBS (pH 7.4) içerisinde hazırlanmış L-lizin çözeltisinde (%10 w/v) bekletildikten sonra yeniden yıkanmıştır. L-lizin çözeltisinde inkübasyon, reaksiyona girmeyen

glutaraldehitin toksisitesini azaltmak amacıyla gerçekleştirilmiştir (Hey vd., 1990). Elde edilen yamalar oda sıcaklığında 24 saat kurumaya bırakılmıştır. Karakterizasyon çalışmaları için gerekli olan jelatin film aynı şekilde muamele görmüştür.

2.4. Taramalı elektron mikroskopisi (Scanning Electron Microscopy, SEM)

Yamaların yüzey morfolojisi ve gözenek boyutlarını değerlendirmek için bir masaüstü SEM (JCM-7000 NeoScope™, Jeol, Japonya) kullanılmıştır. Yama örnekleri 5 kV'luk bir hızlanma voltajında herhangi bir kaplama kullanılmadan gözlemlenmiştir. PLCL ve PLCL/Jel gruplarından rastgele seçilen birer yama örneğinin SEM görüntülerinden FIJI (ImageJ, NIH, ABD) yazılımında 10 ölçüm alınarak kare şekildeki gözeneklerin boyutu filamentlerin arasındaki mesafe ölçülerek belirlenmiştir.

2.5. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)

Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopi (FTIR) incelemeleri için cihazla bütünleşik bir zayıflatılmış toplam yansıma (Attenuated total reflection, ATR) ünitesi bulunan bir kızılötesi spektroskop (Nicolet iS50, Thermofisher Scientific, ABD) kullanılmıştır. Örneklere ait spektrumlar 4000-400 cm^{-1} dalgasayısı aralığında kaydedilmiştir.

2.6. Yüzey temas açısı

Yama üretiminde kullanılan malzemelerin hidrofilik/hidrofobik özelliğini belirlemek için, damla şekli analiz yazılımı bulunan bir optik tensiometre (Attension Theta, Biolin Scientific, İsveç) kullanılarak su temas açısı testi gerçekleştirilmiştir. Temas açısı ölçümlerinde, yamaların kaplaması sırasında aynı şekilde hazırlanan çaprazbağlanmış jelatin film ve 3B baskı sıcaklığı olan 150°C'de eritilerek film haline getirilen PLCL ve PLCL/Jel yamalar (n=3) kullanılmıştır. Daha sonra 4 µL ultrasaf su damlacıkları, her bir numuneye bir mikro şırınga aracılığıyla bırakılarak video kaydedilmiştir. Su damlasının malzemelerin yüzeyi ile yaptığı temas açısı cihazdaki yerleşik yazılım ile ölçülmüştür.

2.7. *In vitro* biyobozunma

Yamalarda hidrolitik bozunmaya bağlı olarak meydana gelen ağırlık kaybını belirlemek için, PLCL ve PLCL/Jel numunelerin (n = 3), PBS içinde ağırlıkları incelenmiştir. Numunelerin ilk ağırlığı W_0 olarak kaydedilmiştir. Ardından numuneler 240 rpm'e ayarlanmış bir orbital çalkalayıcı (PSU-10i, Biosan, Letonya) yardımıyla 37°C'deki bir inkübatörde (MIR-154-PE, Panasonic, Japonya), içerisine anti-mikrobiyal madde olarak %0,01 sodyum azit (NaN_3) eklenmiş PBS'te (pH=7.4) bekletilmiştir. Farklı zaman aralıklarında, numuneler çözeltiden çıkarılmıştır ve degradasyon sonrası kalan kütlenin ağırlığını (W_d) belirlemek üzere 4 saat boyunca 37°C'de fanlı fırında kurutulduktan sonra tartılmıştır. PBS her 3 günde bir değiştirilmiştir. Ağırlık kaybı (%) aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır (Baheiraei vd., 2016):

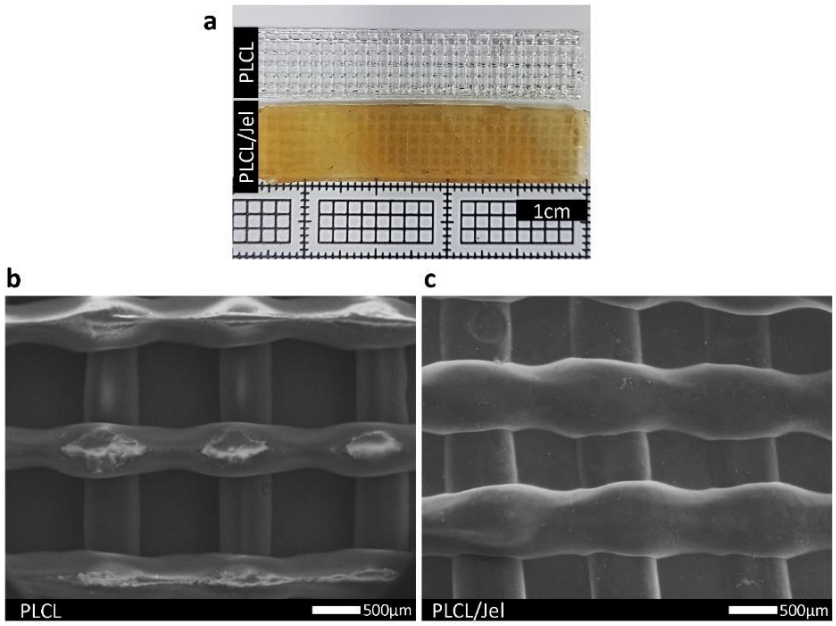
$$Ağırlık\ kaybı\ (\%)\ = \frac{W_0 - W_d}{W_0} \times 100 \qquad (I)$$

2.8. Mekanik test

Çekme testi, bir üniversal test cihazı (AllroundLine Z250, Zwick/Roell, Almanya) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. En×boy ölçüleri 1×5 cm olan PLCL ve PLCL/Jel yamaların (n=3) iki ucu test cihazının mekanik kavrama ünitesine dikey olarak yerleştirilmiş ve mekanik yükleme için 3 cm'lik bir uzunluk bırakılmıştır. Malzemelerin gerilim-gerinim eğrileri, 100 N yük hücresi ile 100 mm/dk'lık bir gerdirme hızında kaydedilen yük deformasyon eğrilerinden oluşturulmuştur. Uzama değerleri cihaza ait çapraz kafadan ölçülmüştür. PLCL ve PLCL/Jel yamanın çekme gerilimi (σ_M) ve çekme gerinimi (ε_M) ortalama ± standart sapma biçiminde sunulmuştur.

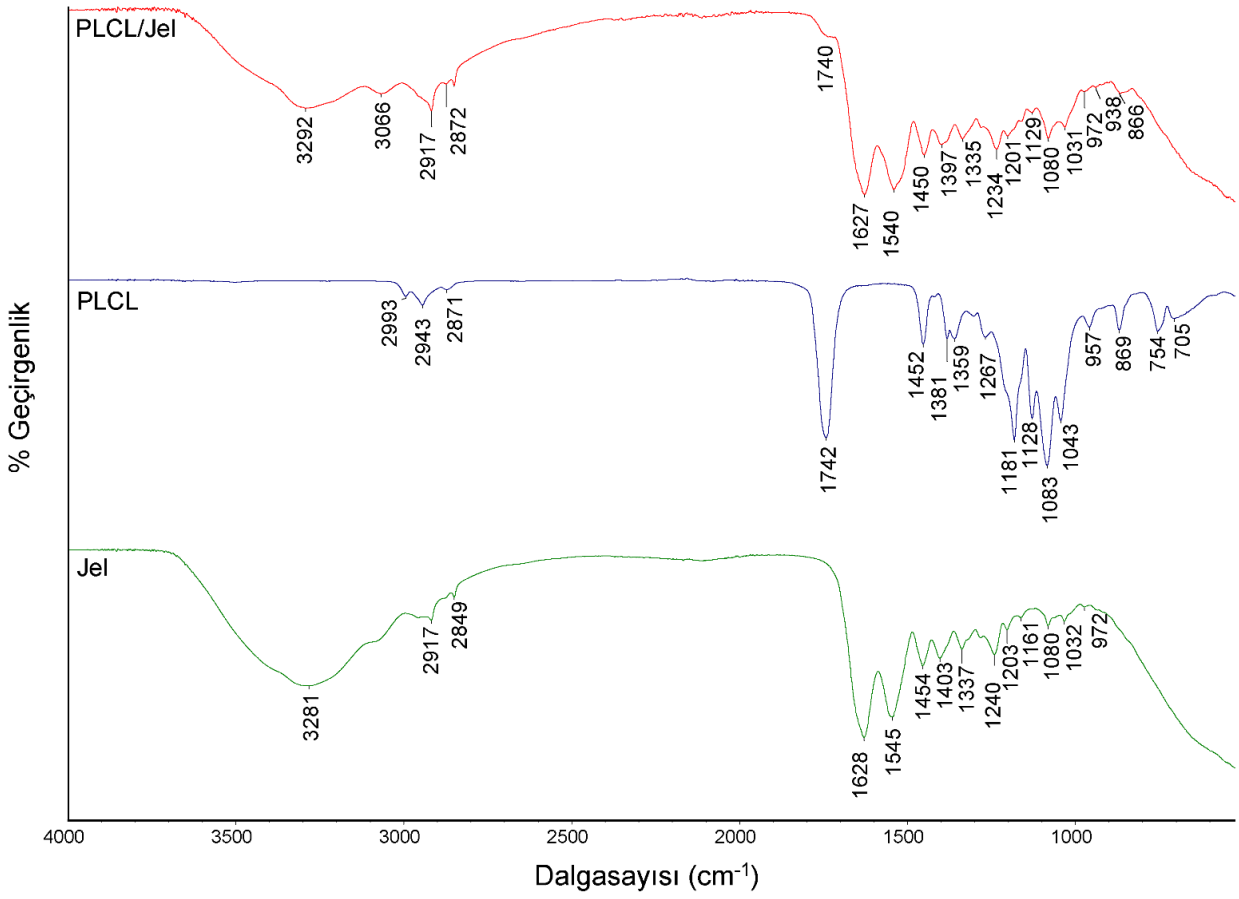
3. Bulgular

3B basımla mesh haline getirilmiş PLCL örneklerinin ve jelatin ile kaplandıktan sonra elde edilen PLCL/Jel yamaların fotoğrafları ve SEM görüntüleri Şekil 2'de sunulmuştur. Şekil 2'de verilen SEM görüntülerinden FIJI yazılımı kullanılarak alınan yatay ve dikey yönlerdeki ölçümlere göre 3B basılmış kare şeklinde gözenekle sahip PLCL'in gözenek boyutu (filamentlerin birbirine mesafesi) ortalama 881,5±54,8 µm olarak tespit edilmiştir. Jelatin kaplandıktan sonra kurutulan PLCL/Jel örneklerde ise PLCL meshe ait gözenek boyutu 661,7±30,6 µm olarak ölçülmüştür. Jelatinin PLCL mesh yüzeyini homojen, sürekli ve gözeneksiz olacak şekilde kapladığı tespit edilmiştir.



Şekil 2. (a) PLCL ve PLCL/Jel yamaların fotoğrafı; **(b)** PLCL yamanın SEM görüntüsü (Büyütme: 30×); **(c)** PLCL/Jel yamanın SEM görüntüsü (Büyütme: 30×).

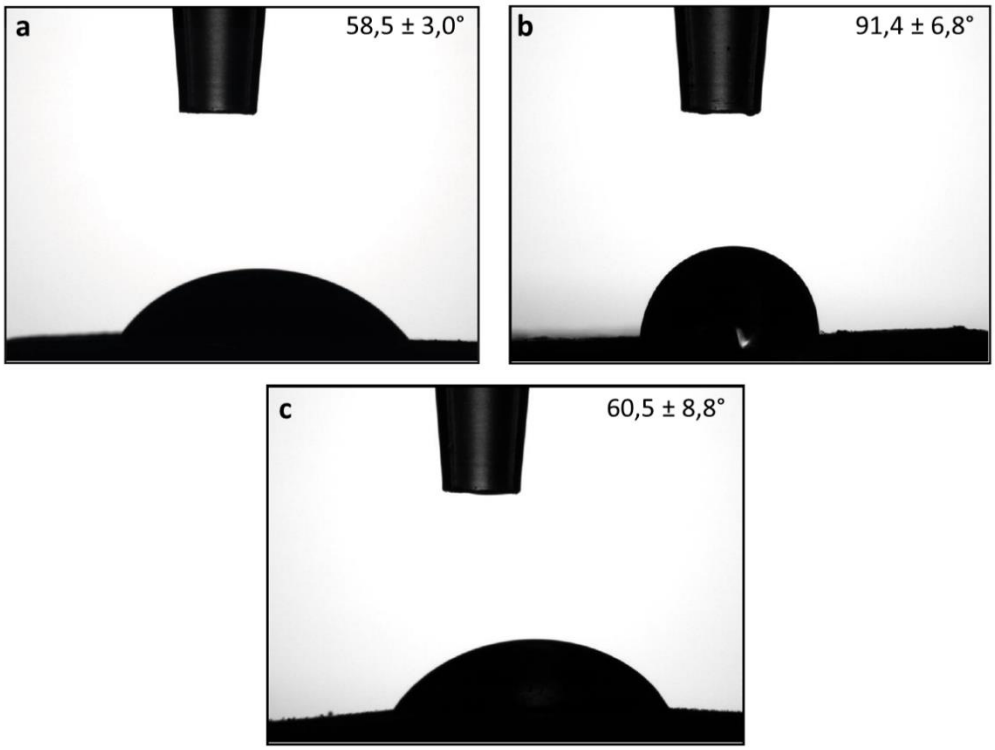
PLCL yama, jelatin ile kaplı PLCL/Jel yama ve kaplamada kullanılan metotla aynı şekilde elde edilen jelatin film kaplamanın (Jel) FTIR-ATR spektrumları Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. PLCL/Jel yama, PLCL yama ve jelatin (Jel) film kaplamaya ait FTIR-ATR spektrumları.

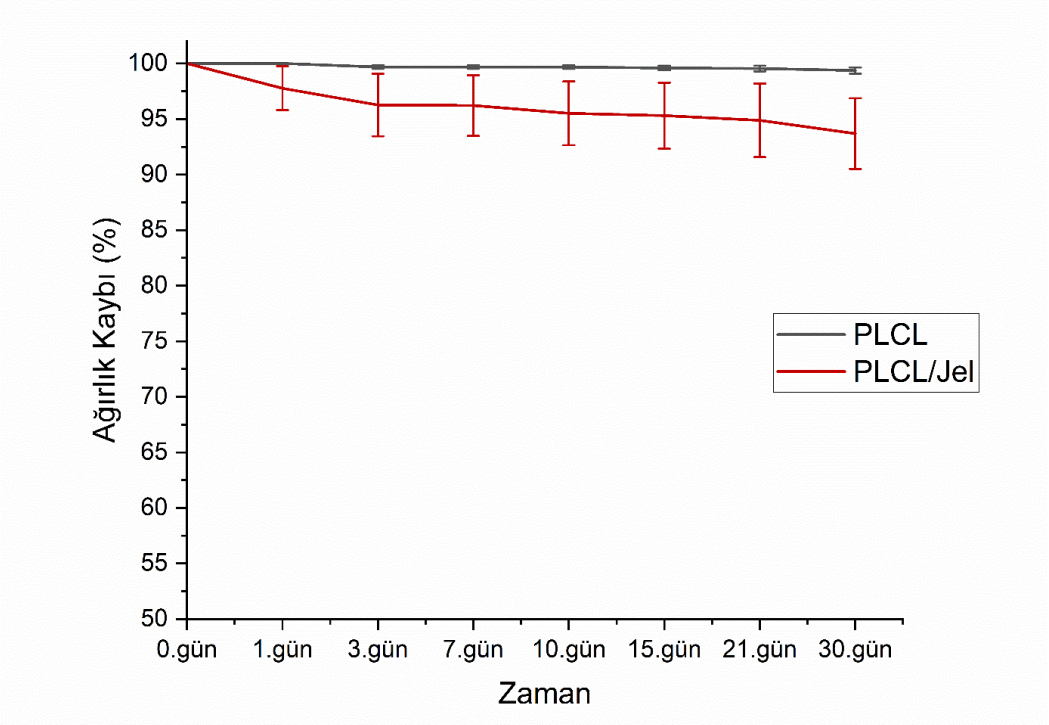
Proteinler, birbirine bağlı amino asitlerden meydana gelmektedir ve yapılarındaki peptit bağlarının farklı titreşimleri Amid A, B ve I-III gibi karakteristik kızılötesi (IR) bantları oluşturur. Amid I, karbonil (C=O) gerilmesi kaynaklıdır, 1600 - 1700 cm^{-1} arasında ortaya çıkar ve en belirgin bantlardan biridir. 1480 ile 1580 cm^{-1} arasındaki Amid II, temel olarak N–H düzlemsel bükülme ve C–N gerilmesinin birleşimidir. 1300 ile 1450 cm^{-1} arasındaki Amid III, daha karmaşık titreşim modlarından oluşur (Mallamace vd., 2015). Şekil 3'teki Jel örneğine ait spektrumda 1628 cm^{-1} bandı Amid I'e, 1545cm^{-1} bandı Amid-II'ye ve 1240 cm^{-1}'deki bant Amid III'e karşılık gelmektedir. Amid A bandı ise 3292 cm^{-1}'de görülmüştür. Sentetik bir polimer olan PLCL'e ait FTIR spektrumunda ise, 1742 cm^{-1}'de karbonil (C=O) bağının gerilme titreşimine ait güçlü bir pik ortaya çıkmıştır (Nardo vd., 2016). Ayrıca, C–O–C eter grubu 1083 cm^{-1}'de ve C–O–C simetrik gerilmesi 1181 cm^{-1}'de gözlemlenmiştir (Bottino vd., 2011). 1452, 1381 ve 1359 cm^{-1}'de metil (CH_3–) ve C–H–bükülme titreşimleriyle ilişkili bantlar görülmüştür (Herrera-Kao vd., 2018). Spektrumda bulunan diğer bantlar arasında, 1267 cm^{-1}'deki ester (C-O-C) gruplarının asimetrik titreşimleri (Erdem vd., 2023), 2993 ve 2943 cm^{-1}'deki diğer metil ve metilen grupları gerilmeleri (Bottino vd., 2011) ve 1128 cm^{-1}'deki C–O gerilmesi (Bottino vd., 2011) yer almaktadır. C–H gerilmesine ait başka bir bant 2871 cm^{-1}'de ortaya çıkmıştır (Herrera-Kao vd., 2018). 869 ve 754 cm^{-1}'de ise, sırasıyla C–COO gerilme ve C=O deformasyon modlarına karşılık gelen bantlar kaydedilmiştir (Herrera-Kao vd., 2018). ATR spektroskopisinin penetrasyon derinliğine bağlı olarak PLCL/Jel kompozit örneklerin yüzeylerinden elde edilen IR spektrumunda jelatin kaplamaya ait bantların daha belirgin görülmesine rağmen PLCL'e ait bantların da mevcut olduğu tespit edilmiştir; C=O titreşimi 1740 cm^{-1}'de, C–H gerilimi 2872 cm^{-1}'de, C–O gerilmesi 1129 cm^{-1}'de ve C–COO gerilmesi 866 cm^{-1}'de görülmektedir. Kompozit yapıda yeni fonksiyonel grup bulunmadığından, PLCL ve glutaraldehitle çaprazbağlanmış jelatin kaplama arasında herhangi bir kimyasal reaksiyonun meydana gelmediği görülmektedir.

Yama malzemelerinin ıslanabilirlik davranışının belirlenmesi için, jelatin film ve PLCL filmde su damlası ile yapılan yüzey temas açısı ölçümlerinin ortalama değerleri ve her gruptan gösterge niteliğindeki birer örneğin fotoğrafı Şekil 4'te sunulmuştur. Buna göre PLCL filmin ortalama temas açısı 91,4±6,8° iken, jelatin filmde bu değer 58,5±3,0° olarak kaydedilmiştir. Yüzeyi jelatinle kaplanmış PLCL/Jel yamalarda ise ortalama temas açısı 60,5±8,8° olarak kaydedilmiştir.



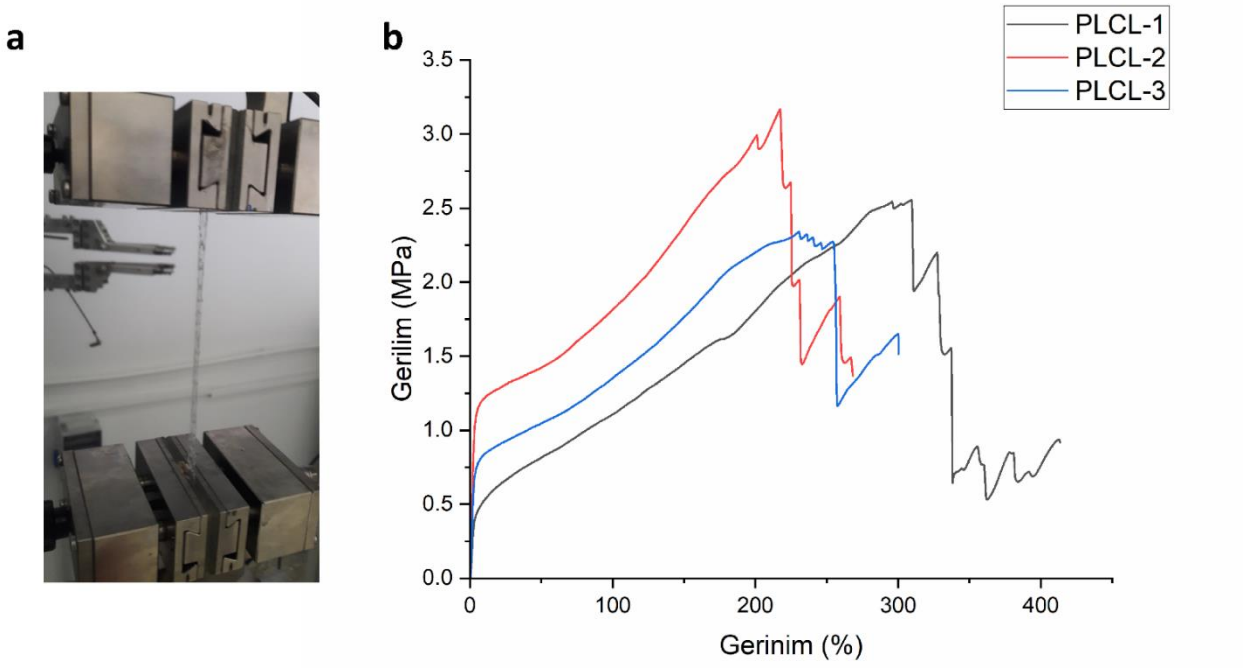
Şekil 4. Su damlası ile yüzey temas açısı ölçümlerini temsil eden örnek görüntüler: **(a)** Jelatin film; **(b)** PLCL film; **(c)** PLCL/Jel yama.

Üretilen yamaların 37°C'de PBS içerisinde 30 gün boyunca takip edilen ağırlık kaybı yüzdeleri Şekil 5'te verilmiştir. Değişimin kolay ifade edilebilmesi için dikey eksen %50-100 arasında sunulmuştur. PLCL örneklerin ilk ağırlıkları 127,0±13,0 mg olarak kaydedilmiştir. PLCL/Jel örneklerin ortalama ağırlığı ise jelatin kaplama nedeniyle 245,8±20.3 mg'a yükselmiştir. Buna göre, PLCL mesh ile jelatin kaplamanın kütlece oranının yaklaşık 1:1 olduğu söylenebilir. *In vitro* biyobozunma deneylerinde, PBS içeresiде 30.gün sonunda PLCL yamanın ilk ağırlığının %99,26±0,28 oranında korunduğu gözlemlenirken, PLCL/Jel yamaların %93,68±3,18 oranında ağırlığını koruduğu belirlenmiştir.



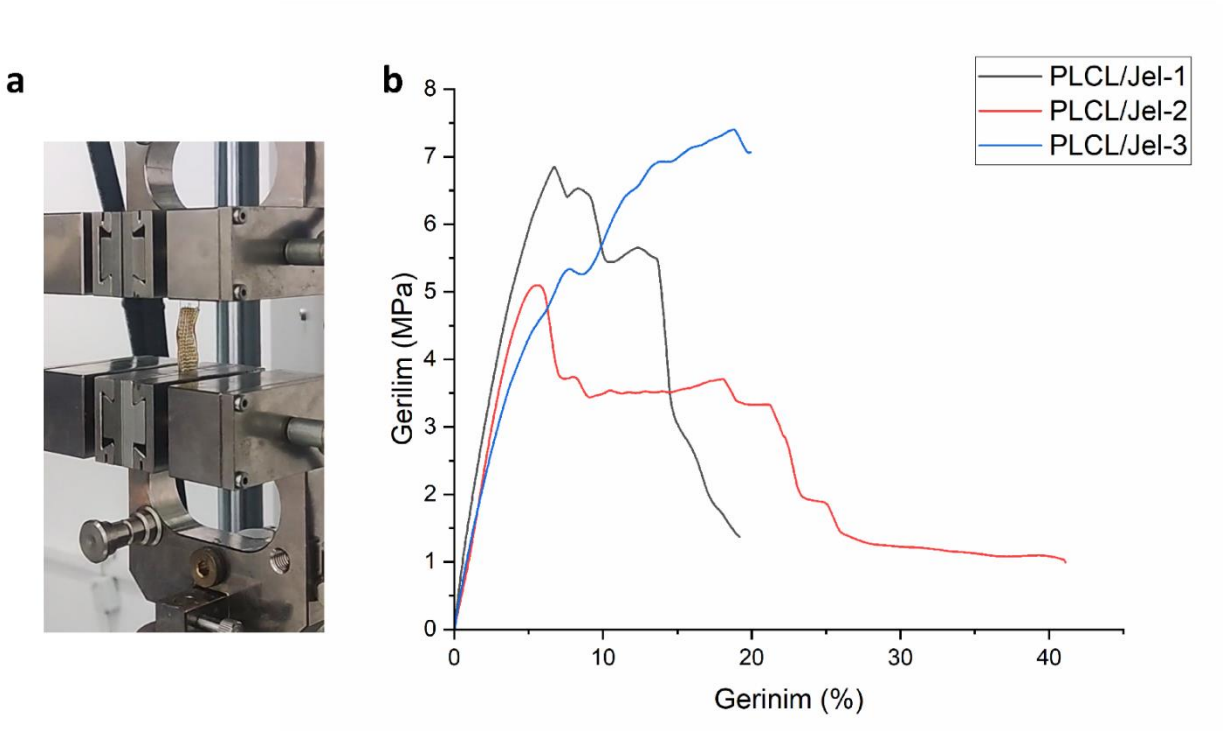
Şekil 5. PLCL ve PLCL/Jel yama numunelerinin PBS içerisinde zamana bağlı ağırlık kaybı yüzdeleri.

Günümüze kadar, cerrahi yamaların mekanik özellikleri üzerine yapılan çalışmalar çoğunlukla implant malzemesinin çekme mukavemetinin en üst düzeye çıkarılmasına odaklanmıştır. Ancak, cerrahi yamalar ile uygulandığı doku arasındaki mekanik uyumsuzluğun implantın başarısızlığına önemli ölçüde katkısı olabilir. Bu nedenle elde edilen yamaların statik germe yükü altındaki davranışlarını belirlemek için tek eksenli çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Üç farklı PLCL yamanın gerilim-gerinim grafikleri ile test sırasında kopma anına ait örnek bir fotoğraf Şekil 6'da sunulmuştur. Buna göre, PLCL yamanın (n=3) ortalama çekme gerilimi (σ_M) 2,68 ±0,43 MPa ve çekme gerinimi (ε_M) %253,33±49,32 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. (a) PLCL yamanın çekme testinde kopma anına ait örnek bir fotoğraf; **(b)** PLCL yama numunelerinin gerilim-gerinim grafikleri.

Benzer şekilde, üç farklı PLCL/Jel yamanın gerilim-gerinim grafikleri ile test sırasında kopma anına ait örnek bir fotoğraf Şekil 7'de sunulmuştur. PLCL/Jel yamanın (n=3) ortalama çekme gerilimi (σM) 6,45±1,20 MPa ve çekme gerinimi (εM) %10,47±7,41 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7. (a) PLCL/Jel yamanın çekme testinde kopma anına ait örnek bir fotoğraf; **(b)** PLCL/Jel yama numunelerinin gerilim-gerinim grafikleri.

4. Tartışma

Geleneksel tek katmanlı sentetik polimerik yamaların dokuya uyumlu mekanik özellikler, biyouyumluluk ve yapışmayı önleme gibi gereksinimleri aynı anda karşılaması oldukça zordur. Yalnızca biyolojik malzemelerden üretilmiş yamaların ise zayıf mekanik özellikler ve hızlı biyobozunma gibi dezavantajlarla karşı karşıya kaldığı bilinmektedir. Bir çalışmada, jelatin ve domuz aselüler dermal matrisi kullanılarak geliştirilen bir hidrojel yamanın, çok iyi biyouyumluluk göstermesine rağmen, mekanik özelliklerinin istenilen düzeye erişemediği görülmüştür (Liu vd., 2020). Dolayısıyla, sentetik ve doğal polimerlere dayalı kompozitler ideal bir cerrahi yama için en iyi kombinasyonu sağlamaktadır; çünkü doğal polimerler hücreler için ligandlar sağlayabilir ve doku yeniden şekillenmesini destekler, sentetik polimerler ise yapıya mekanik direnç kazandırır (Yuan vd., 2021).

3B baskı ile, hastaya göre değişen ihtiyaçları karşılamak üzere kişiselleştirilmiş tıbbi implantlar üretilebilir. Ayrıca, diğer üretim tekniklerine kıyasla, 3B baskı teknolojisi ile hazırlanan yamalar, daha az postoperatif komplikasyona, hastada daha az ağrıya, daha iyi klinik etkiye ve daha az malzeme kaybına sebep olma potansiyeline sahiptir (Hu vd., 2022). Bu çalışmada, 3B baskı teknolojisiyle hem bilgisayar destekli tasarıma (computer aided design, CAD) uygun olarak istenilen yapıda bir PLCL mesh elde edilmesi hem de hayvan dokusundan elde edilen doğal bir protein olması sebebiyle yüksek biyouyumluluk gösteren jelatinin bir kaplama malzemesi olarak değerlendirilmesi sağlanmıştır.

Cerrahi yamalarda, gözeneklerin boyutuna göre sınıflandırmaları şu şekilde yapılmaktadır: çok büyük gözenek >2000µm, büyük gözenek 1000–2000µm, orta gözenek 600–1000µm, küçük gözenek 100–600µm ve mikro gözenek <100µm (Saha vd., 2022). Buna göre, yapılan SEM çalışmalarından CAD tasarımına uygun olarak PLCL ve PLCL/Jel yamaların orta büyüklükte gözenek boyutuna sahip olduğu görülmektedir. Fıtık onarımı için, nispeten büyük gözenekli meshlerin küçük gözenekli olanlara kıyasla daha az yabancı cisim reaksiyonuna ve doku fibrozuna neden olduğu bilinmektedir (Wang See vd., 2020). Ancak, üretimde kullanılan aynı malzeme için gözenek boyutu ve gözeneklilik arttıkça cerrahi yamanın mekanik özellikleri zayıflayabilmektedir. Diğer yandan, sentetik/biyolojik malzemelerle oluşturulan kompozit çalışmalarının birçoğunda, yamanın iç organlara temas eden tarafı, yapışmayı önlemek için genellikle pürüzsüz veya mikro gözenekli, diğer tarafı ise doku infiltrasyonunu teşvik etmek için oldukça pürüzlü veya makro gözenekli tasarlanmış olarak karşımıza çıkmaktadır (Wang See vd., 2020). Bu çalışmada PLCL meshlerin gözenekli yapısı üzerinde pürüzsüz bir jelatin kaplama elde edilmiştir. Ancak, 3B baskının işlevselliği ve tasarıma uygun olarak yüksek üretim doğruluğu sağlayabilmesi sayesinde yamanın gözenek boyutunun istenilen yönde değiştirilmesi mümkün ve oldukça kolaydır.

Klinikte karın duvarında meydana gelen fıtıkların tedavisi için yaygın kullanılan polipropilen mesh doğası gereği hidrofobiktir. Bu nedenle, yama yüzeyinin işlevselleştirilmesi ve yüzey ıslanabilirliğinin iyileştirilmesi için çeşitli çalışmalar yürütülmektedir (Sanbhal vd., 2019). Örneğin, enfeksiyonun önlenmesi ve iyileşme sürecinin hızlandırılması amacıyla polipropilen meshlerin nanoelmas içeren kitosan çözeltisine daldırılarak kaplanması sonucunda yüzey ıslanabilirliğinde önemli ölçüde artış kaydedilmiştir (Saha vd., 2021). Ticari örneklere ise Parietex™ optimize edilmiş kompozit mesh verilebilir. Bu ürünün bir tarafında viseral yapışmayı sınırlamak için biyobozunur kolajen bariyeri ve diğer tarafında ise dokunun yamanın içine doğru büyümesine izin veren gözenekli polyester mesh yer almaktadır. Bunun gibi ürünlerin su ve biyolojik sıvıları tutan hidrofilik katmanı, yama ile çevre dokular arasında doğrudan teması önlemeye yardımcı olan hidratlı bir bariyer oluşturur. Ek olarak, hidrofilik kaplamalar daha iyi hücre uyumluluğu sağlar ve doku entegrasyonunu kolaylaştırabilir. Bu çift bileşenli yapıda yer alan hidrofilik katmanın düşük doku yapışma oranıyla sonuçlandığı klinik çalışmalarla kanıtlanmıştır (Aube vd., 2004). Bu çalışmada, yama üretimi için mesh malzemesi olarak seçilen PLCL'in de hidrofobik yapıda olduğu bilinmektedir. Literatürde yer alan L-laktid:ε-kaprolakton oranı 50:50 olan PLCL filmlerle yapılan bir çalışmada, numunelere uygulanan yüzey modifikasyonlarına bağlı olarak temas açısının 81±2° ile 107±2° arasında değiştiği raporlanmıştır (Kim vd., 2013). Bu çalışmada ise üretilen yamalarda jelatin kullanılmasının avantajlarından bir olarak saf PLCL'e göre hidrofilik özelliğin artırılması, yani yama yüzeyinde oluşturulan gözeneksiz ve sürekli jelatin kaplama ile su temas açısının 60,5±8,8°'ye indirilmesi sağlanmıştır. Literatürde saf jelatin filmin temas açısı, bu çalışmada elde edilen değere benzer şekilde, yaklaşık 53.3° olarak raporlanmıştır, ancak bu değer kullanılan jelatinin tipine ve içerisindeki gliserol miktarına bağlı olarak önemli oranda değişiklik gösterebilir (Łopusiewicz vd., 2018). Yamaların jelatin ile kaplanması sonucunda yalnız biyouyumluluğun artırılması değil, aynı zamanda elde edilen hidrofilik özellik sayesinde dokuya yapışmasının önüne geçilmesi yönünde de bir iyileştirme sağlanmıştır.

Biyobozunur cerrahi yamaların, kalıcı olanlara göre daha az komplikasyona yol açtığına inanılmaktadır, ancak özellikle fıtık onarım uygulamaları için, nüks riskini artırıp artırmadığına ilişkin endişeler devam etmektedir. Literatürde, işlenmiş domuz dermal matrisinden oluşan Strattice™ yamanın 6 aydan uzun bir sürede ve domuz ince bağırsak submukozasından elde edilen Surgisis® yumuşak doku yamasının ise 6 ayda bozunduğu raporlanmıştır (Öberg vd., 2017). Poliglikolid—trimetilen karbonat kopolimerinden oluşan biyobozunur özellikteki GORE BIO-A® doku destek malzemesi ile yapılan prospektif çalışmalarda ise, biyobozunma işlemi 6 ila 7 ay içinde tamamlanan GORE BIO-A®'nın insizyonel herniyi önlemede başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir (Pizza vd., 2020; Pizza vd., 2022). Bu çalışmada, *in vitro* ortamda PBS içerisinde 30.günde PLCL yamanın ilk ağırlığını neredeyse koruduğu gözlemlenirken, PLCL/Jel yamaların hidrolitik bozunmaya bağlı olarak ağırlığının ~%6,3'ünü kaybettiği tespit edilmiştir. Bu kayıp, yama yüzeyindeki çaprazbağlanmış jelatinin yavaş biyobozunmaya uğradığını ve tasarlandığı şekilde zamanla yerini daha yavaş bozunarak mekanik destek sağlamaya devam etmesi beklenen PLCL meshe bırakacağının göstergesidir. Ancak, *in vivo* ortamda hidrolitik ve enzimatik bozunma mekanizmaları yer aldığından, PLCL'in bozunma süresinin en az 7 ay olduğunu gösterebilmek için daha uzun süreli çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Karın boşluğunun karmaşık ve değişken fizyolojik ortamında kullanılan polipropilen mesh fıtık yamalarının mekanik özelliklerinin kapsamlı şekilde değerlendirilmesi ihtiyacı nedeniyle gerçekleştirilen yeni bir çalışmanın sonucunda araştırmacılar, daha iyi mekanik özellik elde edilebilmesi için yamaların, özellikle yüzey kaplama gibi işlemlere tabi tutulmasını önermiştir (Liu vd., 2023). Literatürdeki çalışmalar incelenerek, fıtık onarım malzemelerinin insan karın duvarının mekaniğine yaklaşması açısından benzer gerinim değerlerine sahip olabilmesi için %10-30 aralığında gerinim sergilemesi gerektiği sonucuna varılmıştır (Deeken & Lake, 2017). Gerinimin %30'u geçmesi halinde yamanın işlevini sürdürememesi ve fıtığın nüks etmesine yol açması riski ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, oldukça elastik yapıdaki PLCL meshin jelatin kaplanması sonucunda elde edilen PLCL/Jel yamanın çekme gerinimi %10,47±7,41'e düşürülerek optimum seviyede sonuç elde edilmiştir. Çekme geriliminin istenilen yönde azaltılabilmesindeki en önemli faktör, PLCL mesh üzerine uygulanan jelatin tabakasının, meshin gerilebilirliğini kısıtlayan sürekli ve nispeten daha rijit bir kaplama oluşturmuş olmasıdır. Diğer yandan, çekme deneyi sırasında uygulanan yük altında öncelikle jelatin tabakasının kopmaya uğraması, lokalize bir 'failure' işaret etmektedir ancak bu, kaplamanın PLCL ağından tamamen ayrıldığı anlamına gelmemektedir. Jelatin tabakasının PLCL meshten delaminasyonu sonrasında yamaların üzerinde kalan jelatinin, sınırlı uzamayla sonuçlanacak şekilde yapının genel gerilebilirliğini etkilediği gözlemlenmiştir.

Literatürde, karın duvarı doku onarımı için kullanılan cerrahi yamaların en az 16 N cm^{-1}'lik bir yüke dayanması, geniş alanlı fıtıklarda ise bu değerin en az 32 N cm^{-1}'ye çıkarılması gerektiği gösterilmiştir (Klosterhalfen vd., 2005). İnsan karın duvarının kalınlığı da dikkate alınarak yapılan ölçümler daha etkin bir karşılaştırma değeri sunmaktadır. Örneğin, normal (kesilmemiş) karın duvarı dokusu ile insizyonel herni sebebiyle oluşmuş skar dokusu arasındaki farkı değerlendirmek için yapılan detaylı bir çalışmada, normal epigastrik linea alba dokusunun dikey düzlemde 4,5±2,0 MPa gerilme mukavemeti gösterdiği raporlanmıştır (Hollinsky & Sandberg, 2007). Doğal karın duvarı dokusunun gerilme mukavemeti cinsiyet, yaş ve vücut kitle indeksi ile değişmektedir, ancak aynı bölgeden alınan normal doku ile skar dokusu karşılaştırıldığında, skar sokusunun mukavemetinin her zaman daha düşük olduğu gösterilmiştir. Aynı çalışmada, hipogastrik linea alba dokusunun mukavemeti yatay düzlemde 8,4±3,1 MPa iken, dikey düzlemde 4,1±2,5 MPa olarak tespit edilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen PLCL/Jel yamanın çekme mukavemeti, jelatin tabakasının PLCL mesh üzerindeki takviye edici etkisine bağlı olarak, saf PLCL meshe kıyasla yaklaşık 2,4 katına, yani 6,45±1,20 MPa'a çıktığı gözlemlenmiştir. Elde edilen bu değer, karın duvarı defektlerine uygulanabilirlik açısından, PLCL/Jel yamanın mekanik özelliklerinin doğal dokuya uyumlu olduğu hipotezini

desteklemektedir. Diğer yandan, PLCL/Jel yamanın çekme mukavemeti, literatürde yer alan ve örgü tekniğiyle üretilmiş sentetik polimerik yapıdaki yamalar ile karşılaştırılabilir niteliktedir. Örneğin, mono-filament örgü yapıdaki polidioksanondan (PDO) ve çoklu-filament örgü yapıdaki PGA'dan oluşan yamaların çekme mukavemeti sırasıyla 5,01±0,72 MPa ve 8.76±0.97 MPa olarak raporlanmıştır (Fatkhudinov vd., 2019).

5. Sonuç

Bu çalışmada, yumuşak dokuların onarımında uygulanmak üzere, PLCL'in 3B basılmasıyla elde edilen mesh üzerine jelatin kaplanması sağlanarak yapısal ve fonksiyonel olarak tasarlanmış bir cerrahi yama üretimi bildirilmiştir. Yapılan çekme testinin sonuçlarına göre, PLCL/Jel yamanın mekanik özellikleri fıtık onarımının gereksinimlerini karşılayabilecek düzeydedir. Ayrıca, yüzeydeki jelatin tabakası sentetik polimere göre ıslanabilirliğin önemli düzeyde artırılmasını sağlamıştır ve makro gözenekli PLCL tabaka zamanla hücrelerin defektin içine doğru büyümesini kolaylaştıracaktır. Elde edilen PLCL/Jel yamaların özellikle karın fıtığının onarımında kullanılabildiğinin gösterilebilmesi için ilk veriler elde edilmiştir. Yamanın klinik uygulama potansiyelinin belirlenmesi için, özellikle *in vivo* hayvan modelinde, biyobozunma süresinin doku rejenerasyon hızına uyumlu olduğunun, dikiş tutma, yırtılma ve patlama açısından mekanik özelliklerinin yeterliliğinin, doku yapışmasının en az seviyeye indirildiğinin ve çevre dokulara entegrasyonunun yüksek seviyede olduğunun gösterilmesi gerekmektedir. Ayrıca, bu çalışmada cerrahi yamaların üretiminde takip edilen yöntem, pelvik organ prolapsusu (POP) veya stres üriner inkontinansı (SUI) tedavisinde kullanılan polipropilen meshlere antibakteriyel bir alternatif olabilecek şekilde, yamaların jelatin kaplamasına antibiyotik yüklenmesine olanak sağlamaktadır. Gelecekteki çalışmalarda, yamalara antibiyotik yüklenmesiyle *Staphylococcus aureus* veya *Escherichia coli* gibi bakterilere karşı etkisinin ve *in vitro* hücre uyumluluğunun değerlendirilmesi de mümkündür.

Teşekkür / Bilgilendirme

3B baskı ile yama üretimi, SEM, FTIR-ATR, yüzey temas açısı, *in vitro* biyobozunma deneyleri yazarın bağlı olduğu Sağlık Bilimleri Üniversitesi (SBÜ) Deneysel Tıp Uygulama ve Araştırma Merkezi (DETUAM) altyapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mekanik testler ise Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Merkezi Laboratuvar'da yapılmıştır.

Referanslar

Allergan Aesthetics. (2023). STRATTICE™ Reconstructive Tissue Matrix (RTM). Erişim tarihi: 20 Mayıs 2023, https://hcp.stratticetissuematrix.com/en/products

Aube, C., Pessaux, P., Tuech, J. J., Du Plessis, R., Becker, P., Caron, C., & Arnaud, J. P. (2004). Detection of peritoneal adhesions using ultrasound examination for the evaluation of an innovative intraperitoneal mesh. Surgical Endoscopy and Other Interventional Techniques, 18, 131-135. doi: 10.1007/s00464-003-9056-2

Baheiraei, N., Gharibi, R., Yeganeh, H., Miragoli, M., Salvarani, N., Di Pasquale, E., & Condorelli, G. (2016). Electroactive polyurethane/siloxane derived from castor oil as a versatile cardiac patch, part I: Synthesis, characterization, and myoblast proliferation and differentiation. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 104(3), 775-787. doi:10.1002/jbm.a.35612

Baylón, K., Rodríguez-Camarillo, P., Elías-Zúñiga, A., Díaz-Elizondo, J., Gilkerson, R., & Lozano, K. (2017). Past, present and future of surgical meshes: A review. Membranes, *7*(3), 47. doi: 10.3390/membranes7030047

Bilsel, Y., & Abci, I. (2012). The search for ideal hernia repair; mesh materials and types. International Journal of Surgery, 10(6), 317-321. doi: 10.1016/j.ijsu.2012.05.002

Bottino, M. C., Thomas, V., & Janowski, G. M. (2011). A novel spatially designed and functionally graded electrospun membrane for periodontal regeneration. Acta Biomaterialia, 7(1), 216-224. doi: 10.1016/j.actbio.2010.08.019

Deeken, C. R., & Lake, S. P. (2017). Mechanical properties of the abdominal wall and biomaterials utilized for hernia repair. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 74, 411-427. doi: 10.1016/j.jmbbm.2017.05.008

Erdem, R., Yavuz, E., Akarsu, E., Akarsu, M., Yılmaz, Ö. E., & Coşgun, A. (2023). Electrospinning of antibacterial scaffolds composed of poly (L-lactide-co-ε-caprolactone)/collagen type I/silver doped hydroxyapatite particles: Potential material for bone tissue engineering. The Journal of The Textile Institute, 114(3), 441-454. doi: 10.1080/00405000.2022.2046305.

Fatkhudinov, T., Tsedik, L., Arutyunyan, I., Lokhonina, A., Makarov, A., Korshunov, A., Elchaninov, A., Kananykhina, E., Vasyukova, O., Usman, N., Uvarova, E., Chuprynin, V., Eremina I., Degtyarev, D., & Sukhikh, G. (2019). Evaluation of resorbable

polydioxanone and polyglycolic acid meshes in a rat model of ventral hernia repair. Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials, 107(3), 652-663. doi:10.1002/jbm.b.34158

GORE Medical. (2023). BIO-A® Tissue Reinforcement. Erişim tarihi: 20 Mayıs 2023, https://www.goremedical.com/products/bioatissue

Herrera-Kao, W. A., Loría-Bastarrachea, M. I., Pérez-Padilla, Y., Cauich-Rodríguez, J. V., Vázquez-Torres, H., & Cervantes-Uc, J. M. (2018). Thermal degradation of poly (caprolactone), poly (lactic acid), and poly (hydroxybutyrate) studied by TGA/FTIR and other analytical techniques. Polymer Bulletin, 75, 4191-4205. doi:10.1007/s00289-017-2260-3

Hey, K., Lachs, C., Raxworthy, M., & Wood, E. (1990). Crosslinked fibrous collagen for use as a dermal implant: Control of the cytotoxic effects of glutaraldehyde and dimethylsuberimidate. Biotechnology and Applied Biochemistry, (12), 85-93. doi: 10.1111/j.1470-8744.1990.tb00082.x

Hollinsky, C., & Sandberg, S. (2007). Measurement of the tensile strength of the ventral abdominal wall in comparison with scar tissue. Clinical Biomechanics, 22(1), 88-92. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2006.06.002

Hu, Q., Wu, J., Zhang, H., Dong, W., Gu, Y., & Liu, S. (2022). Designing Double-Layer Multimaterial Composite Patch Scaffold with Adhesion Resistance for Hernia Repair. Macromolecular Bioscience, 22(6), 2100510. doi: 10.1002/mabi.202100510

Kim, S. I., Lim, J. I., Jung, Y., Mun, C. H., Kim, J. H., & Kim, S. H. (2013). Preparation of enhanced hydrophobic poly(l-lactide-co-ε-caprolactone) films surface and its blood compatibility. Applied Surface Science, 276, 586-591. doi: 10.1016/j.apsusc.2013.03.137

Klosterhalfen, B., Junge, K., & Klinge, U. (2005). The lightweight and large porous mesh concept for hernia repair. Expert Review of Medical Devices, 2(1), 103-117. doi: 10.1586/17434440.2.1.103

Liu, S., Zhang, H., Hu, Q., Zhang, C., Li, S., & Wang, B. (2020). A facile strategy for fabricating composite patch scaffold by using porcine acellular dermal matrix and gelatin for the reconstruction of abdominal wall defects. Journal of Biomaterials Applications, 34(10), 1479-1493. doi: 10.1177/0885328220910557

Liu, X., Liu, S., Li, K., Fan, Y., Feng, S., Peng, L., Zhang, T., Wang, X., Chen, D., Xiong, C., Bai, W., & Zhang, L. (2021). Preparation and property evaluation of biodegradable elastomeric PTMC/PLCL networks used as ureteral stents. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 630, 127550. doi: 10.1016/j.colsurfa.2021.127550

Liu, T., Ye, Z., Yu, B., Xuan, W., Kang, J., & Chen, J. (2023). Biomechanical behaviors and visco-hyperelastic mechanical properties of human hernia patches with polypropylene mesh. Mechanics of Materials, 176, 104529. doi: 10.1016/j.mechmat.2022.104529

Łopusiewicz, Ł., Jędra, F., & Bartkowiak, A. (2018). New active packaging films made from gelatin modified with fungal melanin. World Scientific News, 101, 1-30.

Mallamace, F., Corsaro, C., Mallamace, D., Vasi, S., Vasi, C., & Dugo, G. (2015). The role of water in protein's behavior: The two dynamical crossovers studied by NMR and FTIR techniques. Computational and Structural Biotechnology Journal, 13, 33-37. doi: 10.1016/j.csbj.2014.11.007

Medtronic. (2023-a). Phasix™ Mesh. Erişim tarihi: 20 Mayıs 2023, https://www.bd.com/en-us/products-and-solutions/products/product-families/phasix-mesh,

Medtronic. (2023-b). ParietexTM Composite Ventral Patch. Erişim tarihi: 20 Mayıs 2023, https://www.medtronic.com/covidien/en-us/products/hernia-repair/parietex-composite-ventral-patch.html

Mendibil, X., Ortiz, R., Sáenz de Viteri, V., Ugartemendia, J. M., Sarasua, J. R., & Quintana, I. (2020). High throughput manufacturing of bio-resorbable micro-porous scaffolds made of poly (L-lactide-co-ε-caprolactone) by micro-extrusion for soft tissue engineering applications. Polymers, 12(1), 34. doi:10.3390/polym12010034

Nardo, T., Chiono, V., Gentile, P., Tabrizian, M., & Ciardelli, G. (2016). Poly (DL-lactide-co-ε-caprolactone) and poly (DL-lactide-co-glycolide) blends for biomedical application: Physical properties, cell compatibility, and in vitro degradation behavior. International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials, 65(14), 741-750. doi: 10.1080/00914037.2016.1163566

Olmos-Juste, R., Olza, S., Gabilondo, N., & Eceiza, A. (2022). Tailor-made 3D printed meshes of alginate-waterborne polyurethane as suitable ımplants for hernia repair. Macromolecular Bioscience, 22(9), 2200124. doi: 10.1002/mabi.202200124

Öberg, S., Andresen, K., & Rosenberg, J. (2017). Absorbable meshes in ınguinal hernia surgery: A systematic review and meta-analysis. Surgical Innovation, 24(3), 289-298. doi: 10.1177/1553350617697849

Pizza, F., D'Antonio, D., Arcopinto, M., Dell'Isola, C., & Marvaso, A. (2020). Safety and efficacy of prophylactic resorbable biosynthetic mesh following midline laparotomy in clean/contemned field: Preliminary results of a randomized double blind prospective trial. Hernia, 24(1), 85-92. doi: 10.1007/s10029-019-02025-4

Pizza, F., D'Antonio, D., Lucido, F. S., Del Rio, P., Dell'Isola, C., Brusciano, L., Tolone, S., Docimo, L., & Gambardella, C. (2022). Is absorbable mesh useful in preventing parastomal hernia after emergency surgery? The PARTHENOPE study. Hernia, 26(2), 507-516. doi: 10.1007/s10029-022-02579-w

Qamar, N., Abbas, N., Irfan, M., Hussain, A., Arshad, M. S., Latif, S., Mehmood, F., & Ghori, M. U. (2019). Personalized 3D printed ciprofloxacin impregnated meshes for the management of hernia. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 53, 101164. doi: 10.1016/j.jddst.2019.101164

Saha, T., Houshyar, S., Sarker, S. R., Pyreddy, S., Dekiwadia, C., Nasa, Z., Padhye, R., & Wang, X. (2021). Nanodiamond-chitosan functionalized hernia mesh for biocompatibility and antimicrobial activity. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 109(12), 2449-2461. doi: 10.1002/jbm.a.37237

Saha, T., Wang, X., Padhye, R., & Houshyar, S. (2022). A review of recent developments of polypropylene surgical mesh for hernia repair. OpenNano, 7, 100046. doi: 10.1016/j.onano.2022.100046

Sanbhal, N., Saitaer, X., Peerzada, M., Habboush, A., Wang, F., & Wang, L. (2019). One-Step Surface Functionalized Hydrophilic Polypropylene Meshes for Hernia Repair Using Bio-Inspired Polydopamine. Fibers, 7(1), 6. doi: 10.3390/fib7010006

Shin, C. S., Cabrera, F. J., Lee, R., Kim, J., Ammassam Veettil, R., Zaheer, M., Adumbumkulath, A., Mhatre, K., Ajayan, P. M., Curley, S. A., Scott, B. G., & Acharya, G. (2021). 3D-bioprinted inflammation modulating polymer scaffolds for soft tissue repair. Advanced Materials, 33(4), 2003778. doi: 10.1002/adma.202003778

Song, Z., Yang, D., Hu, Q., Wang, Y., Zhang, H., Dong, W., Yang, J., & Gu, Y. (2023). Reconstruction of Abdominal Wall Defect with Composite Scaffold of 3D Printed ADM/PLA in a Rat Model. Macromolecular Bioscience, 2200521. doi: 10.1002/mabi.202200521

Taylor, D. (2018). The failure of polypropylene surgical mesh *in vivo*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 88, 370-376. doi: 10.1016/j.jmbbm.2018.08.041

Ulrich, D., Edwards, S. L., White, J. F., Supit, T., Ramshaw, J. A. M., Lo, C., Rosamilla, A., Werkmeister, J. A., & Gargett, C. E. (2012). A preclinical evaluation of alternative synthetic biomaterials for fascial defect repair using a rat abdominal hernia model. PLoS ONE, 7(11), e50044. doi: 10.1371/journal.pone.0050044

Wang See, C., Kim, T., & Zhu, D. (2020). Hernia mesh and hernia repair: A review. Engineered Regeneration, 1, 19-33. doi: 10.1016/j.engreg.2020.05.002

Wolf, M. T., Carruthers, C. A., Dearth, C. L., Crapo, P. M., Huber, A., Burnsed, O. A., Londono, R., Johnson, S. A., Daly, K. A., Stahl, E. C., Freund, J. M., Medberry, C. J., Carey, L. E., Nieponice, A., Amoroso, N. J., Badylak, S. F. (2014). Polypropylene surgical mesh coated with extracellular matrix mitigates the host foreign body response: Polypropylene surgical mesh coated with ECM. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 102(1), 234-246. doi: 10.1002/jbm.a.34671

Yuan, M., Hu, M., Dai, F., Fan, Y., Deng, Z., Deng, H., & Cheng, Y. (2021). Application of synthetic and natural polymers in surgical mesh for pelvic floor reconstruction. Materials & Design, 209, 109984. doi: 10.1016/j.matdes.2021.109984

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

UMAGD, (2023) 15(2), 872-880.

10.29137/umagd.1300861

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Temmuz/July 2023

Araştırma Makalesi / Research Article

Seramik Sağlık Gereci Fabrikası Filtre-pres Kek Atığının Porselen Karo Bünyesinde Kullanılması

The Usage of Ceramic Sanitarware Filter-press Cake Wastes in Porcelain Tile Body

Yusuf Karaca [1], Zahide Bayer Öztürk [2], Elif Ubay [1]

[1]Ar-Ge Merkezi, Seranit Granit Seramik A.Ş., Bilecik, Türkiye
[2]Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi,Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü ,50300, Nevşehir, Türkiye

***Başvuru/Received**: 23/05/2023* ***Kabul / Accepted**: 24/06/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 13/07/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 14/07/2023*

Öz

Çevresel sorumluluk ve ekonomik üretim kapsamında, seramik üretiminde ortaya çıkan atık ürünlerin yeniden kullanılması oldukça önemlidir. Bu çalışma, seramik sağlık gereci üretiminde pişme öncesi aşamalarda oluşan yarı mamül ve üretim artıklarının fabrikanın tank ve havuzlarda birikip filtre-preslerde suyundan ayrılmasıyla elde edilen arıtma kekinin porselen karo bileşiminde kullanılan hammaddeler yerine kullanımının etkisini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Endüstriyel koşullar altında on bir farklı porselen karo reçetesi hazırlanmış ve bir standart porselen karo ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Sağlık gereçleri üretiminden elde edilen filtre-pres kek atığının %14 oranında porselen karo üretiminde kullanılan ithal kil, kaolen ve albit hammaddelerinin yerine kullanılması ile pişme dayanımını arttırdığını ve pişme rengi, pişme küçülmesi gibi özelliklerde standarda benzer eğilim sergilediğini göstermektedir. Standarda yakın ve standarttan farklı eğilim sergileyen numunelerin seçilmesiyle yapılan mikroyapı ve faz analizlerinde kuvars ve müllit fazları tespit edilmiştir. Bu çalışma, seramik sağlık gereci filtre-pres kek atıklarının porselen karo üretiminde sürdürülebilir ve teknolojik, ekonomik ve çevresel açıdan kullanılabileceğini göstermektedir. Seramik sağlık gereci fabrikalarının filtre-pres kek atığının özellikle kil kaynağı sıkıntısı yaşayan seramik karo endüstrisinde alternatif hammadde olarak kullanılabilirliği, hammadde kaynaklarının daha verimli kullanılmasını, atığın geri kazanımını ve ekonomik bir üretimin gerçekleşmesini sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler

"Seramik karo, Sağlık gereci, Endüstriyel atık, Teknik özellikler"

Abstract

In the context of environmental responsibility and economic production, the reuse of waste products generated in ceramic production holds significant importance. This study was carried out to evaluate the effect of using cake waste in porcelain tile composition instead of raw materials. The cake waste is obtained by separating the semi-finished product and production residues formed in the pre-firing stages in the production of ceramic sanitary ware, removed from the water in the filter press, and accumulated in the tanks and pools of the factory. Under industrial conditions, eleven porcelain tile formulations were prepared and compared against a standard. The findings reveal that the incorporation of filter-press cake waste to a 14% in formulation by replacing the imported clay, kaolin, and albite increase in firing strength compared to standard, while demonstrating similar properties to the standard tile in terms of firing color and firing shrinkage. Microstructure and phase analyses conducted on samples both close to and indicated the presence of quartz and mullite phases. These results affirm that the utilization of filter-press cake waste presents a sustainable and technologically viable approach to the production of porcelain tiles, benefiting the economy and the environment. By employing filter press cake waste as an alternative in the ceramic tile industry, which faces clay resource scarcity, the efficient utilization of raw material resources, waste recovery, and cost-effective production can be achieved.

Key Words

"Ceramic tile, Ceramic sanitaryware, İndustrial waste, Technical properties"

***Sorumlu Yazar: z.ozturk@nevsehir.edu.tr**

1. Giriş

Dünya genelinde seramik karo üretimi, endüstriyel sektörün önemli bir kolunu oluşturmaktadır. 2020 itibarıyla, dünya çapında seramik karo üretimi yılda yaklaşık 16.093 milyon m^2 'ye ulaşmaktadır. Bu üretim miktarının büyük bir kısmı, Çin, Hindistan, Brezilya, Vietnam, İspanya, Türkiye ve diğer birkaç ülke tarafından gerçekleştirilmektedir. Türkiye, seramik karo üretiminde dünya çapında yüksek kaliteli seramik karoların üretildiği ve ihraç edildiği bir merkez olarak tanınmaktadır. Türk seramik karo sektörü, teknolojik gelişmelere uyum sağlama, iç pazarda-ihracatta talep görmesi ve tasarım yetenekleriyle dikkat çekmektedir (web site). Seramik karolar, kil, kaolen, feldispat, mermer, kuvars gibi inorganik hammaddelerin belirli oranlarda hazırlanıp öğütülmesi ve plaka halinde şekillendirildikten sonra sırlı veya sırsız desenli veya desensiz olarak bir veya birden fazla pişirilerek sertleştirilmesi suretiyle elde edilen iç ve dış mekânlarda kullanılan dekoratif ve dayanıklı malzemelerdir (Baş 1999). Son on yılda, porselen karo üretim hızı diğer seramik karo ürünlere kıyasla daha fazla artmıştır. Bu artış, porselen karoların estetik görünüşü ve mükemmel teknik özellikleri nedeniyle karo pazarında önemli bir yer edinmesine yol açmıştır. Porselen karoların aşınmaya karşı yüksek direnci, kimyasallara karşı dayanıklılığı, son derece düşük su emme değeri, aşınmaya, kimyasallara direnci, donma ve eğme testlerindeki dayanıklılığı gibi birçok özelliği onları özellikle endüstriyel alanlarda ve kimyasalların sıkça kullanıldığı yerlerde tercih edilen bir seçenek haline getirir (Kocabaş 2007).

Son yıllarda seramik karo üretiminde daha ucuz maliyetlere sahip hammadde kaynaklarını kullanmaya, üretim giderleri arasında önemli bir yer tutan enerji maliyetlerini düşürmek için üretim ve pişirim hızını arttırmaya, üretim hatalarını önlemeye yönelik çalışmalar büyük önem kazanmaktadır (Bayer Öztürk 2012). Üretimde sürekliliğin sağlanmasında, endüstriyel atıkların kullanımı, sürdürülebilirlik ve geri dönüşüm açısından önemli bir stratejidir. Geleneksel seramik karolar, genellikle doğal kaynaklardan elde edilen hammaddelerle üretilir ve bu da doğal kaynakların tükenmesine ve çevresel etkilere yol açabilir. Endüstriyel atıkların seramik karolarda kullanılması, doğal kaynak kullanımını azaltırken aynı zamanda atıkların geri dönüşümüne, teknik özelliklerin iyileştirilmesine ve estetik çeşitliliğe katkı sağlar (Binal and Ay 2015).

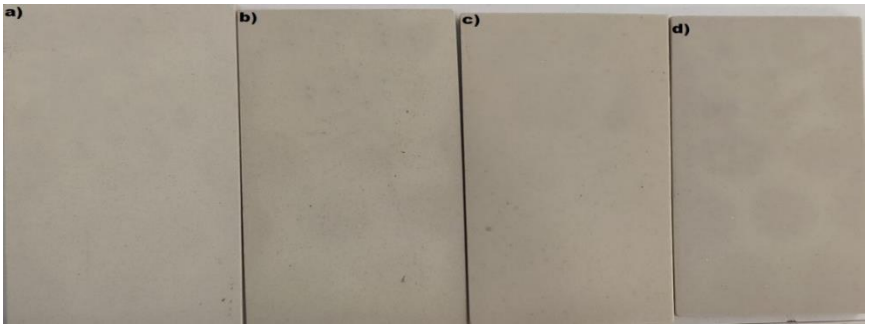
Endüstriyel atıkların seramik karoların bileşiminde kullanımını ele alan birçok çalışma literatürde bulunmaktadır. Cam atıklarının porselen karo bileşiminde feldispat yerine %5 miktarında kullanıldığı çalışmada cam atıkları karolara dayanım, pişme sürecinde yüksek yoğunluk, düşük su emme miktarı gibi avantajlar getirmiştir (Luz and Ribeiro 2007). Fe, Cr ve Cu gibi çok sayıda değerli madde içeren elektrik ark ocağı ve paslanmaz çelik cürufları içeren seramik karolarda, Fe ve Cr renklendirici iyon olarak görev alarak siyah renkli karo bünyelerin oluşmasını sağlamıştır (Liu et al. 2020). Yüksek fırın cürufu ilavesinin duvar karosunda kalsit ve kaolin yerine kullanıldığı bir başka çalışmada ise, cüruf ilavesi duvar karolarının mukavemetini arttırmış, termal genleşme katsayısını düşürmüştür (Bayer Öztürk and Eren Gültekin 2015). Dekoratif taş endüstrisinin ürünleri mermer, granit gibi taş kesim atıklarının seramik karolarda kullanıldığı çalışmalarda karoların teknik özelliklerini bozmadan atıkların kullanımı ile çevreci yaklaşımla üretimin gerçekleşebileceği tespit edilmiştir (Vasic et al. 2022; Montero et al. 2009). Siklon ve filtreler yardımıyla çimento üretiminde oluşan tozların porselen karo bileşiminde feldispat yerine kullanımının incelendiği bir çalışmada,%1 oranında çimento üretim atıklarının albit yerine kullanımı teknolojik özellikleri olumlu etkilemiştir (Aydın and Paksoy 2019). Plastik atıkları ise seramik karolara hafiflik, esneklik, dayanıklılık kazandırabilmektedir (Hardikar et al. 2019).

Seramik sağlık gereçleri (vitrifiye) sektörü seramik malzemelerin banyo ve mutfak gibi yaşam alanlarında kullanılan bide, tuvalet, rezervuar, lavabo gibi ürünlerin üretimini kapsamaktadır. Vitrifiye ürünleri üretimi, hammaddelerle (kil, kaolin, feldispat, kuvars vb.) elde edilen çamurun alçı kalıpta şekillenmesi, kurutulması, sırlanması, kontrollü sıcaklıklarda pişirilmesi (1200°C–1290°C) ve kalite-kontrol olarak özetlenebilecek bir dizi aşamayı içermektedir. Satışa uygun olmayan ve üretim hattında ıskartaya ayrılan ürünlerin yaklaşık olarak %5-7'si üreticiler tarafından hammadde olarak yeniden kullanılmaktadır (Medina et al. 2012; Bayer Öztürk and Atabey 2022). Ayrıca pişme öncesi aşamalarda oluşan hatalı yarı mamül ve proses atıkları da fabrikalarda tank ve havuzlarda toplanmaktadır. Havuzlarda biriken bu atıklar, filtre-pres yardımıyla suyundan ayrılarak arıtma kekini oluşturmaktadır. Bu açıdan hem filtre-pres kek atığının hem de ıskartaya ayrılan bu endüstriyel atıkların çeşitli alanlarda değerlendirilmesinin araştırılması gerekmektedir. Son zamanlarda, seramik sağlık gereci atıklarının inşaat malzemelerinde kullanımı üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Beton ve geopolimerlerde çimento ve uçucu kül yerine ikame edilen atıkların harçların dayanım gelişimlerini olumlu yönde iyileştirdiği tespit edilmiştir (Reig et al.2018; Atabey &Öztürk 2021). Etkili, ekonomik bir aşındırıcı olarak kullanımını ele alan bir çalışmada seramik sağlık gerici atıkları eleme ve segregasyon işlemleri sonrasında aşındırma makinesinde aşındırıcı malzeme olarak kullanılmıştır (Muthukumaran et al. 2021). Seramik sağlık gereci atıklarının seramik porselen karolarda değerlendirilmesini ele alan bir çalışmada atığın feldispat yerine kullanımı pişme küçülmesini arttırırken, eğilme dayanımını düşürmüştür. Aynı çalışmada, atığın pegmatit yerine kullanımı ise eğilme dayanımını arttırmış, termal genleşme katsayısını düşürmüştür (Tarhan et al. 2016). Literatürdeki çalışmalar seramik sağlık gereci atıklarının inşaat alanında yoğun olarak kullanıldığını, seramik alanında daha fazla çalışmanın yapılmasına ihtiyaç olduğunu ve araştırmalarımıza göre pişme öncesi aşamalarda oluşan filtre-pres kek atığı ile ilgili çalışma olmadığını göstermektedir. Bu çalışmada; önceki çalışmalardan farklı olarak seramik sağlık gereci atıklarının porselen karo bünyesindeki farklı hammadde bileşenlerinin (kil, kaolen ve feldispat) yerine de bileşime dahil edilmesiyle karoların teknik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. İlgili çalışmada kompozisyonal değişimlerin mikroyapı üzerindeki etkisini de inceleyebilmek için faz analizi ve elektron mikroskobu analizleri gerçekleştirilmiştir.

2. Deneysel Çalışma

2.1. Hammadde Karakterizasyonu

Vitrifiye imalatı gerçekleştiren endüstriyel bir firmanın (Sanikey Seramik Sağlık Gereçleri, Gebze), atık havuzundan atık kek temini gerçekleştirilmiştir. Temin edilen filtre-pres kek atığı (FPA), seramik karo fabrikasındaki (Seranit Granit Seramik, Bilecik) porselen karo bileşiminde kullanılan yurtdışından temin edilen kil, albit ile kıyaslanmış ve fiziksel özellikleri incelenerek kullanılabilirliğine bakılmıştır. Temin edilen FPA, önce 100℃' de yaklaşık 5 saat süre ile etüvde kurutulmuştur. Sonrasında kırıcı ile kırılarak 125 mikron altı boyutlara düşürülmüştür. Mikron boyutlardaki atık malzeme, değirmenlere birebir ve reçetede kullanılan diğer hammaddelerden albit ve ithal kil ile beraber değirmende çevirilerek (30 dk) çamur haline getirilmiş ve kurutulmuştur. Kurutulan hammaddeler, %5 rutubetlendirilip havanda öğütülerek Gabrielli marka pres ile 150 barda preslenerek plaka haline getirilmiştir Preslendikten sonra rutubetini kaybetmesi için etüvde bekletilen tabletler, 50 dk 1205 ℃'de endüstriyel fırın rejiminde pişirilerek kıyaslanmıştır. Atık kek ve standart hammaddenin pişirilmiş plaka görüntüleri Şekil 1'de yer almaktadır.



Şekil 1. Atık kek, albit ve ithal kil hammaddelerinin pişme sonrası görüntüleri, a)İthal Kil, b)FPA, c)%50 İthal Kil ve %50 Albit, d)%50 FPA ve %50 Albit.

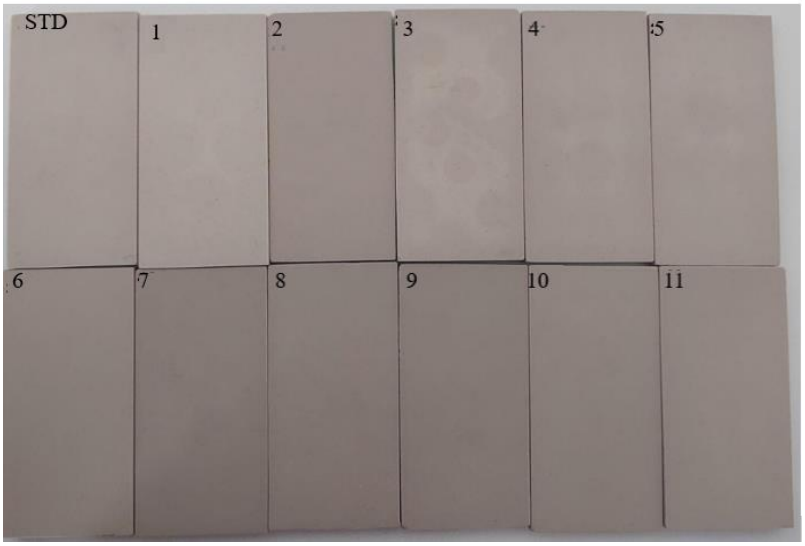
2.2. Numunelerin hazırlanması

Karakteristik özellikleri belirlenen hammaddeler ile seramik karo fabrikasının porselen karo masse reçetesine farklı kombinasyonlar da atık kek ilavesi ile çalışmalar yapılmıştır (Tablo 1). Gerekli prosesler uygulanıp endüstriyel fırında pişirilen reçeteler, ilk olarak fiziksel ve mekanik analizlere tabi tutulmuştur. Standart reçeteye yakınlık durumlarına göre aralarında farkı görmek için, standart reçete sonuçlarına çok, orta ve az yakınlık gösteren numunelere faz analizi (XRD- Rigaku Miniflex 600 model), kimyasal analiz (XRF, Rigaku ZSX Primus) ve mikroyapı analizleri (SEM-EDS –Zeiss Supra 50) yapılmıştır. Reçeteler birbiri içerisinde karşılaştırıldığında en uygun 11 nolu reçete olduğu tespit edilmiş ve seramik karo fabrikasında aktif olarak kullanılmaya başlanılmıştır.

Tablo 1. Filtre pres kek atığının kullanımı ile oluşturulan yeni porselen karo reçeteleri

Numune kodu	Kil-1	İthal Kil	Kil-2	Kil-3	Kaolen	Silis Kumu	Albit	Filtre-pres Kek
Std	14	13	3,5	3,5	15	13	38	0
1	16	6,5	3,5	3,5	18	13	33	6,5
2	16	6,5	3,5	3,5	16	13	35	6,5
3	16	6,5	3,5	3,5	18	15	31	6,5
4	16	6,5	0	7	18	15	31	6,5
5	16	7	0	0	18	13	33	13
6	14	0	0	0	15	13	38	20
7	14	6	0	0	14	12	34	20
8	14	7	3	3	15	13	35	10
9	14	0	3	3	15	13	34	18
10	10	0	3	3	18	13	30	23
11	14	8	3	3	12	12	34	14

Hazırlanan reçeteler 1'er kg hazırlanarak içerisine 500'er ml su ilave edilerek bilyeli değirmende 35 dakika çevrilmiştir. Çevrilen çamurların, değirmeden çıkartılarak viskozite, yoğunluk ve elek bakiye analizleri yapılmıştır. Daha sonra çamurlar, etüvde 100 ℃' de 2 saat bekletilerek kurutma işlemi yapılmıştır. Kurutulan karışımlar, havan ile öğütülerek Gabbrielli markalı preste 55*110 mm ebatında 150 bar basınçta basılarak plaka haline getirilmiştir. Ham halde olan plakalara kırılma dayanımı ve eğilme dayanımı analizleri yapılmıştır. Daha sonra plakalar, 1206 ℃' de 50 dakika endüstriyel rejimde pişirilmiştir. Pişirilen plakalara kırılma dayanımı, eğilme dayanımı, pişme küçülme, L*a*b* renk ölçümü ve su emme analizleri yapılmıştır. Sonuçlar incelenerek standart numuneye en yakın olan numuneler Seramik Araştırma Merkezinde XRD-SEM-EDS analizlerine tabi tutulmuştur. Basılan plakaların görseli Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Vitrifiye filtrepres kek atığı ilaveli numunelerin pişme sonrası görüntüleri

3. Deney Sonuçları

3.1. Vitrifiye Filtrepres Keklerin Karakterizasyonu

Albit, ithal kil ve atığın kimyasal bileşim oranları Tablo 2'de, temin edilen filtre-pres kekin renk, pişme küçülme, su emme, ham ve pişmiş mukavemet değerleri de Tablo 3'de sunulmuştur. Filtre-pres kek atığının kimyasal analiz sonuçları ithal kile yakın değerlerdedir. Fiziksel analiz sonuçlarına göre, ithal kilin pişme rengi diğer numunelerden daha açık çıkmıştır.

Tablo 2. Albit, ithal kil ve vitrifiye filtre-pres kek atığının XRF ile belirlenen kimyasal analiz sonuçları

Hammadde	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	Fe_2O_3	Cr_2O_3	ZrO_2	BaO	A.Z.
Albit	10,2	0,30	17,6	69,4	0,22	0,01	0,39	0,77	0,30	0,23	0,04	-	-	0,55
İthal kil	0,47	0,44	27,29	58,25	0,08	0,08	2,02	0,46	1,38	1,16	0,46	0	0	8,33
FPA	1,83	0,27	25,29	60,83	0,05	0,04	1,01	1,50	0,56	1,44	0	0,83	0,34	6,02

Tablo 3. Albit, ithal kil ve vitrifiye filtrepres kekin fiziksel analiz sonuçları

Numune Adı	Renk (L*a*b)	Pişme Küçülme (%)	Su Emme (%)	Ham Eğilme Dayanımı (N/mm^2)	Pişmiş Eğilme Dayanımı (N/mm^2)
İthal Kil	L:80,24, a:1,07 b:12,66	7,15	0,42	2,48	34,71
FPA	L:77,75, a:0,92, b:10,35	6,94	5,61	1,71	52,46
İthal Kil + Albit	L:78,12, a:0,56, b:12,05	6,96	0,01	1,55	61,44
FPA+Albit	L:72,75, a:1,08, b:9,20	8,85	0	0,83	50,3

3.2. Numunelerin fiziksel özellikleri

Vitrifiye atıklı reçeteler ve standart endüstriyel üretim kalite standartlarında hazırlanmış ve analizler uygulanmıştır. Çamur formuna getirilen reçetelerin viskozite, yoğunluk ve elek bakiyeleri incelenmiştir (Tablo 4). Hazırlanan reçetelerin çamur yoğunlukları 1710-1755 g/lt'dir, viskoziteleri 27-35 sn aralığında olup 63 mikron elek bakiyeleri % 0,3-0,4 arasındadır. Reçetelerin litre ağırlıkları, elek bakiye ve viskozite değerleri standartlara uygundur.

Tablo 4. Std ve FPA içeren yeni bileşimlerin litre ağırlığı, elek bakiye ve viskozite sonuçları

Numune Adı	Litre Ağırlığı (g/lt)	Elek Bakiye (63 µm)	Viskozite (sn)
STD	1725	0,3	30
1	1715	0,3	32
2	1720	0,4	29
3	1730	0,3	31
4	1730	0,3	27
5	1725	0,3	27
6	1725	0,3	27
7	1715	0,4	32
8	1710	0,4	29
9	1710	0,4	27
10	1735	0,4	31
11	1755	0,4	35

Pişmiş reçete plakalarının eğilme dayanımları, pişme renkleri, pişme küçülmeleri ve su emme testleri yapılırken ham plakalara ise sadece eğilme dayanım testleri yapılmıştır (Tablo 5).Standart masse reçetesine farklı kombinasyonlar ile ilave edilen filtre-pres kek atıklı reçetelerin karakterizasyonu için standart masse reçetesine yakın, orta ve uzak sonuçlar gösteren reçeteler belirlenip faz ve mikroyapı (SEM-EDS) analizleri yapılmıştır. Pişme rengi ve pişme küçülmesi sonuçlarına göre Std ve 11 numaralı numune benzer davranış sergilemiştir, 11 numaralı numunenin pişme dayanım sonucu ise standarttan yüksektir. Pişme dayanımı en yüksek olan 2 numaralı numunenin pişme rengi ve küçülme değerleri standarttan farklı olması sebebiyle seçilememiştir. 11 numaralı numunede atığın %14 oranında kullanımı ile de standart karo bileşimine önemli bir katkı sağlanmış olmaktadır.

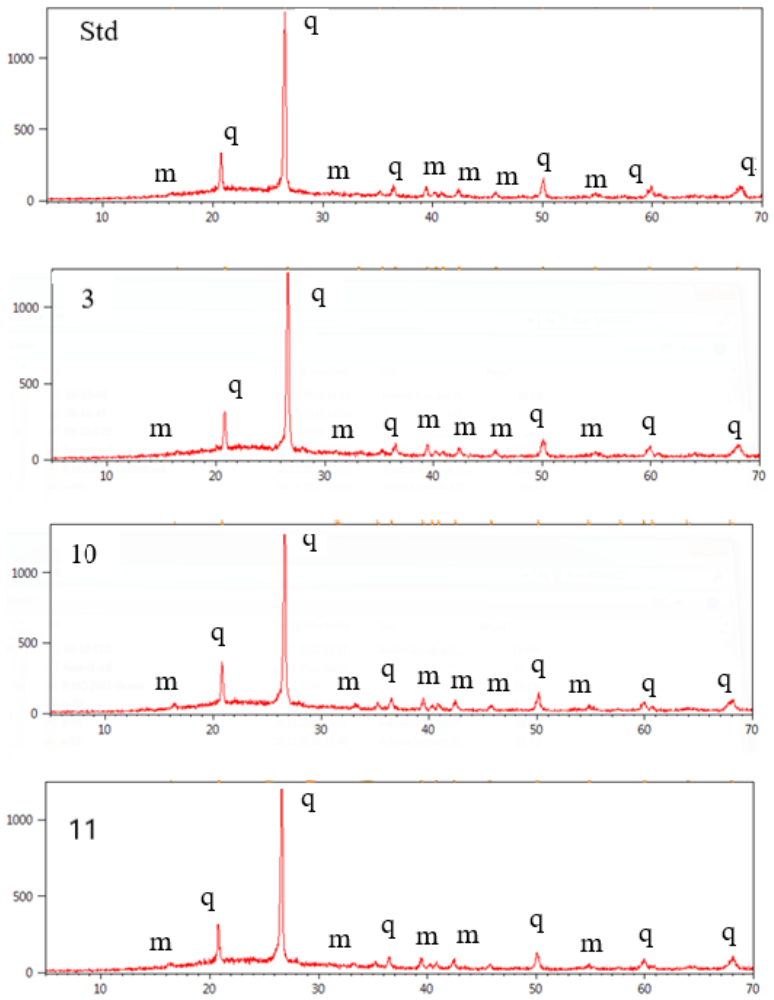
Tablo 5. Pişme sonrası numunelerin fiziksel özellikleri

Numune Adı	Renk (L*a*b)	Pişme Küçülme (%)	Su Emme (%)	Ham Eğilme Dayanımı (N/mm^2)	Pişmiş Eğilme Dayanımı (N/mm^2)
STD	L:69,92, a:2,93 b:10,57	7,72	0,01	1,25	66,0
1	L:67,48, a:3,67, b:10,31, ΔE: 2,62	8,23	0,02	1,52	67,0
2	L:66,95, a:3,64, b:10,44, ΔE: 3,23	7,98	0,01	1,95	77,0
3	L:72,27, a:3,35, b:10,2, ΔE: 2,32	6,87	0,05	1,32	64,1
4	L:70,9, a:3,23, b:9,99, ΔE: 1,17	7,29	0,06	1,25	63,1
5	L:71,72, a:2,95, b:9,4, ΔE: 2,45	7,41	0,06	1,55	60,6
6	L:67,51, a:3,55, b:10,29, ΔE: 2,54	8,13	0,01	1,29	61,8
7	L:74,07, a:1,99 b:10,34, ΔE: 2,85	7,91	0,05	1,21	58,0
8	L:70,2, a:2,38, b:10,63, ΔE: 0,61	7,51	0,03	1,73	60,0
9	L:69,92, a:2,99, b:10,06, ΔE: 0,38	8,33	0,09	1,2	58,0
10	L:72,54, a:2,46, b:10,02, ΔE: 1,72	8,29	0,01	1,19	59,1
11	L:69,98, a:2,56, b:10,89, ΔE: 0,29	7,85	0,01	1,4	68,3

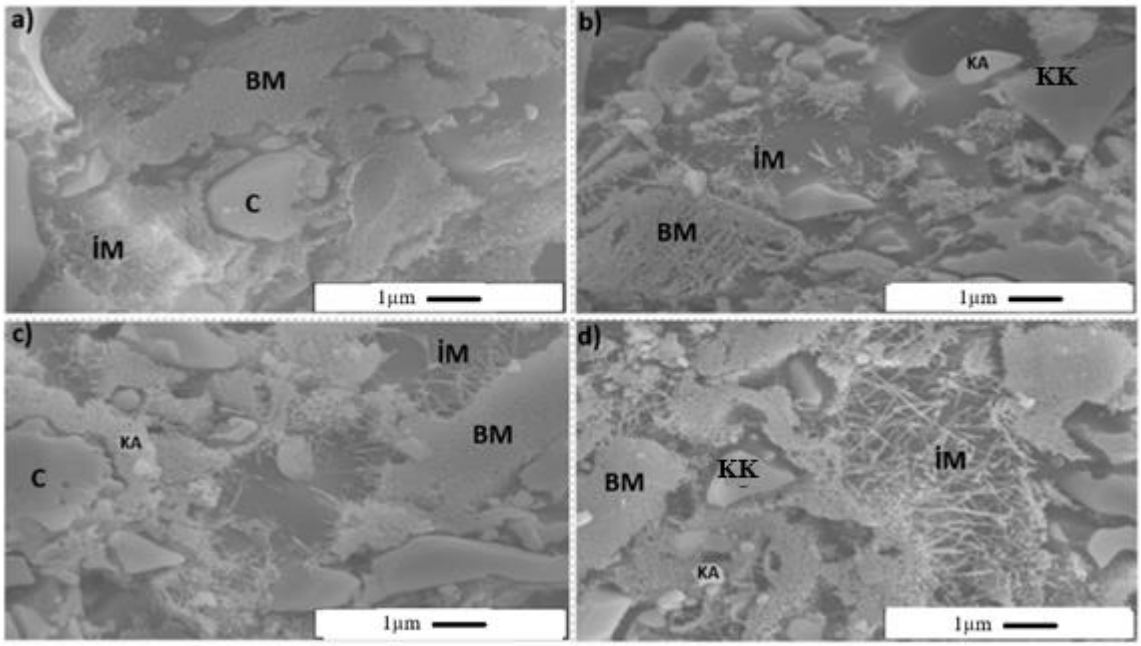
Ham reçete plakalarının kırılma dayanımları, 1,2-1,9 N/mm^2 arasında belirlenmiştir. Pişmiş kırılma dayanımları ise, 58-79 N/mm^2 aralığındadır. Standart (7,72) reçeteye en yakın pişme küçülme gösteren reçete 11'dir (7,85). En uzak ise, 9 kodlu (8,33) reçetedir. Renk analizlerinde en yakın, 11 kodlu reçetedir. En uzak ise 3 kodlu reçetedir. Su emme değerleri, 0,01-1 aralığındadır.

3.3. Faz ve mikroyapı analiz sonuçları

Reçetelere uygulanan fiziksel ve mekanik analiz sonuçlarına bakıldığında, standart reçeteye en yakın (11), orta yakın (10) ve en uzak (3) kodlu reçeteler belirlenip faz ve mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, Şekil 3'de gösterilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde tüm reçetelerde müllit ve kuvars fazları tespit edilmiştir. Oluşan fazların şiddetleri arasında büyük bir farklılık görülmemektedir. Standart reçete dışındaki reçetelerde ithal kil, kaolen oranlarında düşüş yapılmış olup, yerine atık kekin ilavesi yapılmıştır. Kimyasal analiz sonuçları da benzer olan ithal kil ve atığın birlikte kullanıldığı numunelerin faz yapılarında da bu nedenle büyük farklılık görülmemiştir. Standart ve belirlenen numunelerin, mikroyapı analiz sonuçları Şekil 4'dedir. Mikroyapılar incelendiğinde özellikle 11 numaralı numunede uzun iğnesel müllit kristtaleri dikkati çekmektedir. Mullite hipotezine göre, müllit oranı ve müllit iğnelerinin kenetlenmesi arttıkça porselen karoların mukavemeti de artmaktadır (Romero and Perez 2015). Bu durum diğer numunelere kıyasla dayanımların neden arttığını da kanıtlamaktadır.



Şekil 3. Seçilen numunelerin faz analiz sonuçları (q: kuvars, m:müllit)



Şekil 4. Standart ve FPA ilaveli numunelerin mikroyapıları (a: Standart, b:3, c:10, d:11) BM: Birincil Müllit, İM: İkincil Müllit, C: Camsı Yapı, K.A: Kalıntı Albit, KK: Kalıntı Kuvars)

4. Genel sonuçlar

Bu çalışmada, seramik sağlık gereci fabrikasından temin edilen filtre-pres kek atığının porselen karo bünyelerinde kil, kaolen ve albit yerine kullanımı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlarına göre:

- Öncelikli olarak filtre-pres kekin fiziksel özellikleri incelenerek ithal kil ile muadil olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.
- Seger yardımı ile hazırlanan reçetelerde, atık ilavesi %6,5-23 aralığında standart bileşime ilave edilerek, diğer hammaddelerin oranları değiştirilip çalışılmıştır. Pişme küçülmesi, pişme rengi ve dayanım sonuçlarına göre %14 oranında filtre-pres kek atığı içeren 11 numaralı numune endüstriyel üretimde kullanılmak üzere seçilmiştir.
- Elde edilen fiziksel sonuçlara göre standart numuneye yakın ve uzak olarak belirlenen 3, 10 ve 11 numunelerinin faz ve mikroyapı analizlerinde müllit ve kuvars fazları dikkat çekmektedir. 11 numaralı numunenin mikroyapı analizinde tespit edilen ikincil müllit iğnelerinin birbirine kenetlenerek pişme dayanımı üzerinde önemli rol oynadığı tespit edilmiştir. Seramik sağlık gereci sektörü filtre-pres kek atıklarının seramik karo üretiminde kullanılması, hammadde ve üretim maliyetinin düşürülebilmesinde, atığın temin edildiği firmada depolama-tozlaşma ve kirlilik problemlerinin önüne geçilmesinde önemli katkı sağlayacaktır.

Referanslar

Atabey, İ.İ.& Bayer Öztürk, Z. (2021). Investigation of usability of ceramic sanitaryware wastes in geopolymer mortar production, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 12, 212-219. Doi: 10.29137/umagd.782733

Aydın, T.& Paksoy, Ç. (2019). The effect of cement raw mix waste dust on porcelain tile properties, Journal of Australian Ceramic Society, 55, 37-45. Doi: 10.1007/s41779-018-0208-1

Baş, A. (1999). Türk seramik kaplama malzemeleri sektörünün rekabet analizi ve uluslararası bir strateji önerisi, Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

Bayer Öztürk, Z. (2012).Porselen karoların üretim koşullarının ve teknik özelliklerinin geliştirilmesi, Doktora tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, Eskişehir.

Bayer Öztürk, Z.&Eren Gültekin, E. (2015). Preparation of ceramic wall tiling derived from blast furnace slag, Ceramics International, 41 (9), 12020-12026. doi: 10.1016/j.ceramint.2015.06.014

Bayer Öztürk, Z. & Atabey, İ.İ. (2022). Mechanical and microstructural characteristics of geopolymer mortars at high temperatures produced with ceramic sanitaryware waste, Ceramics International, 48 (9), 12932-12944. Doi: 10.1016/j.ceramint.2022.01.166

Binal, G., Ay, N. (2015).Utilization of magnesite host rocks in wall tile, Journal of Australian Ceramic Society, 51 (1), 1-7.

Hardikar, A., Omkar, B., Wagholikar, S., Shivdeo, A.& Bhikule, R. (2019) Comparative analysis of tiles made from recyclable LDPE plastic waste, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 8 (2), 22-25.

Kocabaş, M.S. (2007). Porselen karo ve anortit minerali ile geliştirilen kompozisyona magnezyumlu kil ve/veya handit ilavesinin teknolojik özellikler üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.

Liu, M., Ma, G., Zhang, X., Liu, J.& Wang, Q. (2020). Preparation of black ceramic tiles using waste copper slag and stainless steel slag of electric arc furnace, Materials, 13 (3), 776. doi: 10.3390/ma13030776

Luz, A.P. & Ribeiro, S. (2007). Use of glass waste as a raw material in porcelain stoneware tile mixtures, Ceramics International, 33 (5), 761-765. doi: 10.1016/j.ceramint.2006.01.001

Medina, C., Frias, M. & Sanchez de Rojas, M.I.(2012). Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitaryware industry waste as coarse aggregate, Construction and Building Materials 31, 112-118. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.075

Montero, M.A., jordan, M.M., Hernandez-Crespon, S.& Sanfeliu T. (2009). The use of sewage sludge and marble residues in the manufacture of ceramic tile bodies, Applied Clay Science, 46 (4) 404-408. doi: 10.1016/j.clay.2009.10.013

Muthukumaran, N., Devaraj, P., Arunkumar, P.Sekar, T. (2021). Re-use of abandoned sanitary ware waste as abrasive particles for abrasive jet machine, Materials Today Proceedings, 45 (2), 562-563. Doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.290

Reig, L., Soriano, L., Tashima, M.M., Borachero M.V., Monzo, J., Paya, J. (2018). Influence of calcium additions on the compressive strength and microstructure of alkali-activated ceramic sanitary-ware, Journal of American Ceramic Society,101, 3094-3104. Doi: 10.1111/jace.15436

Romero, M.& Perez, J.M. (2015). Relation between the microstructure and technological properties of porcelain stoneware. A review, Materials de Construccion, 65 (320), e065. Doi: 10.3989/mc.2015.05915

Tarhan, B., Tarhan, M. &Aydın, T. (2016). Reusing sanitaryware waste products in glazed porcelain tile production. Ceramics International, 43 (3), 3107-3112. doi: 10.1016/j.ceramint.2016.11.123

Vasic, M.V., Mijatovi, C.N. & Radojevic, Z. (2022). Aplitic Granite Waste as Raw Material for the Production of Outdoor Ceramic Floor Tiles, Materials, 15 (9), 3145. doi: 10.3390/ma15093145

Web site: https://ramazaninan.com.tr/osto/SeramikSektorRaporu-2021.pdf

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development
UMAGD, (2023) 15(2), 881-890.
10.29137/umagd.1306808
Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:2 Temmuz/July 2023
Araştırma Makalesi / Research Article

Effects Of The Boriding Time at 800°C on Ti6Al4V Alloy

Fazıl Hüsem[1]

[1]*Karabuk University TOBB MYO 78050 Karabük, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 30/05/2023* ***Kabul / Accepted**: 21/06/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:**13/07/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 14/07/2023*

Öz
Bu çalışma, 800 derece Ti6Al4V alaşımının farklı sürelerde borlanması araştırmaktadır. Ti6Al4V alaşımı, hafiflik, yüksek mukavemet ve korozyon direnci gibi özellikleri nedeniyle geniş bir endüstriyel uygulama alanına sahiptir. Borlama, alaşımın yüzey özelliklerini iyileştirmek için kullanılan bir yüzey modifikasyon yöntemidir. Çalışmanın amacı, 800 derece sıcaklıkta gerçekleştirilen borlama sürecinin Ti6Al4V alaşımının yapısal ve mekanik özelliklerine etkisini değerlendirmektir. Bu çalışmada, borlama işleminin etkisini belirlemek için çeşitli analiz yöntemleri kullanılmıştır. İncelenen örneklerin mikroyapısal analizi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını difraksiyonu (XRD) ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, borlanmış örneklerin mekanik özellikleri, sertlik testleri ve aşınma direnci testleri ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, 800 derece Ti6Al4V borlanmasının alaşımın yüzey özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Borlama işlemi sonucunda yüzey sertliği artar ve aşınma direnci gelişir. Mikroyapısal analiz, borlama sıcaklığının artmasıyla birlikte TiB2 gibi borür fazlarının oluştuğunu ortaya koymuştur. Bu fazlar, alaşımın yüzeyinin sertliğini ve aşınma direncini artıran önemli faktörlerdir. Sonuç olarak, bu çalışma Ti6Al4V alaşımının 800 derece borlanması sürecinin önemli sonuçlarını sunmaktadır. Bu bilgiler, endüstriyel uygulamalarda Ti6Al4V alaşımının dayanıklılığını artırmak için yüzey modifikasyonunun optimize edilmesinde kullanılabilir. Üretilmiş olan borlanmış Ti6Al4V numunelerinin aşınma dayanımı ve sertlik değerleri arttırılmıştır. Bu sayede daha uygun maliyetlerde daha yüksek dayanım değerlerine sahip Ti6Al4V alaşımı üretilmiş olacaktır.

Anahtar Kelimeler
"Borlama, Aşınma,XRD"

Abstract
This study investigates boronization of 800 degree Ti6Al4V alloy at different times. Ti6Al4V alloy has a wide range of industrial applications due to its light weight, high strength and corrosion resistance. Boronizing is a surface modification method used to improve the surface properties of the alloy. The aim of the study is to evaluate the effect of boriding process carried out at 800 degrees on the structural and mechanical properties of Ti6Al4V alloy. In this study, various analysis methods were used to determine the effect of boriding process. Microstructural analysis of the examined samples was carried out by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). In addition, the mechanical properties of boronized samples were evaluated by hardness tests and abrasion resistance tests. The results show that 800 degree Ti6Al4V boronizing significantly improves the surface properties of the alloy. As a result of boriding process, surface hardness increases and wear resistance improves. Microstructural analysis revealed that boride phases such as TiB2 were formed with the increase of boriding temperature. These phases are important factors that increase the hardness and wear resistance of the surface of the alloy. In conclusion, this study presents the important results of the 800 degree boronizing process of Ti6Al4V alloy. This information can be used to optimize the surface modification to increase the durability of the Ti6Al4V alloy in industrial applications. The wear resistance and hardness values of the boronized Ti6Al4V samples were increased. In this way, Ti6Al4V alloy with higher strength values will be produced at more affordable costs.

Key Words
"Boriding,wear, XRD"

Sorumlu Yazar: fazilhusem@karabuk.edu.tr

1. Introduction

Ti6Al4V alloy is a metal matrix composite formed by the combination of elements such as titanium, aluminum and vanadium. This alloy has become a preferred material in many industrial applications with its advantages such as excellent mechanical properties, low density and high corrosion resistance Yao (2016). It is frequently encountered in components used in sectors such as aviation, space and medicine.

The surface properties of the Ti6Al4V alloy are a critical factor affecting the performance and durability of the component Paretti (2018). Therefore, surface modification methods are of great importance to improve the properties and prolong the life of the alloy. One of these methods is known as boriding Li(2018).

Boronizing is the process of forming a boride layer by diffusion of the element boron onto the surface of a material. This layer increases surface hardness, improves wear resistance and creates a more resistant surface against corrosion. Therefore, boronizing the Ti6Al4V alloy can provide significant improvements in the mechanical and surface properties of the alloy Atar(2008).

Boring temperature and time have a great influence on the structural and mechanical properties of the alloy. In this way, it is ensured that the alloy is used at higher strength values in a wider area of use Atar (2009).

2. Experimental

2.1 Sample Preparation

Commercially available Ti6Al4V alloy was used for boriding and 20mm×5mm cylindrical samples were prepared. The samples were obtained by cutting Ti6Al4V cylindrical material. Struers accutom cutting -10/-100 precision cutting device was used in the preparation of the samples.



Figure 1. Struers accutom cutting -10/-100 precision cutting device

2.2 Boriding

Boriding process can be done in solid, liquid, gas and plasma environment. In this study, boriding in solid medium (box) was preferred because it is preferred widely and more stable results are obtained with relatively easier facilities. Stainless steel crucibles were used for boriding the samples. The crucible is precision machined and designed to minimize air intake. Figure 2 gives a schematic representation of the crucible..

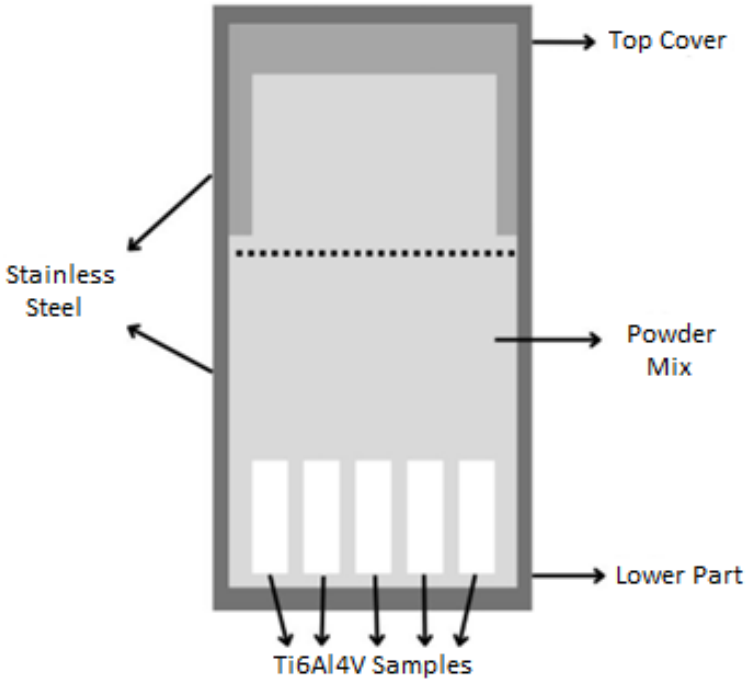


Figure 2. Schematic representation of the ladle for pack boriding

2.3 Wear

Abrasion tests of boronized specimens were carried out in the UTS Tribometer T10 Tester in accordance with ASTM G133 standard for linear back-and-forth reciporating wear test under dry sliding conditions.



Figure 3. (a) UTS Tribometer T10 abrasion tester (b) Sample test section

For the wear test, 3 different loads as 10N, 20N and 40N were used. As a result of the test, the machine automatically gives us the coefficient of friction.

As a result of the wear tests, SEM images of the samples were taken on the device given in the figüre 14.

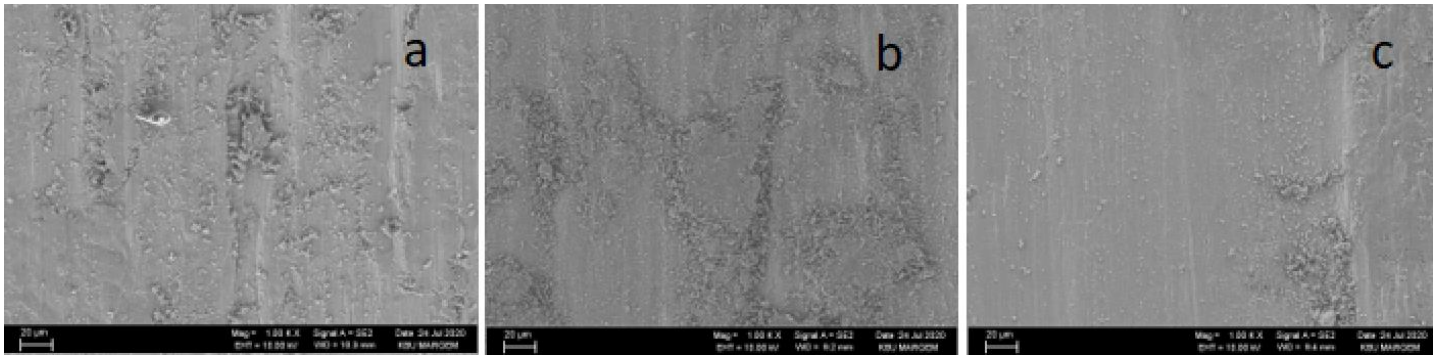


Figure 4. SEM image of boronized samples under 10N load (a) 800°C 2h (b) 800°C 4h (c) 800°C 8h

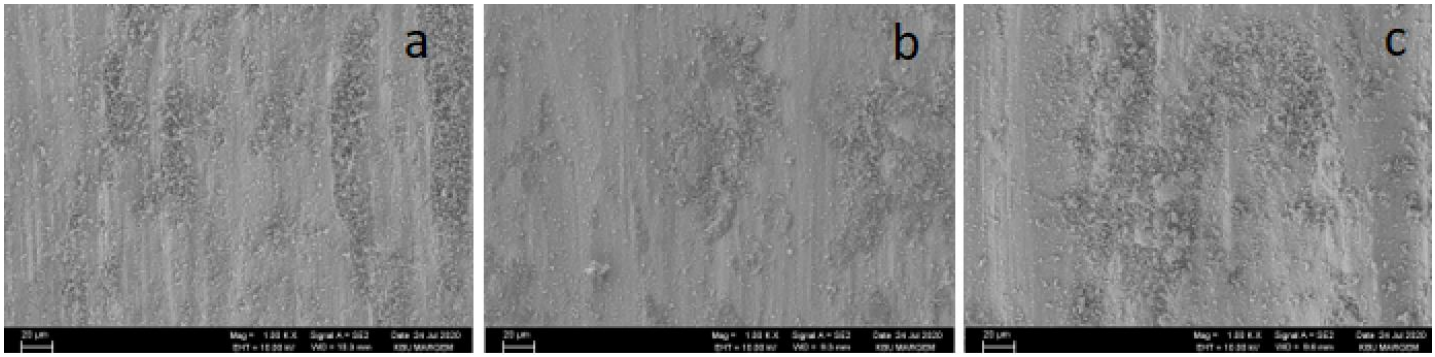


Figure 5. SEM image of boronized samples under 20N load (a) 800°C 2h (b) 800°C 4h (c) 800°C 8h

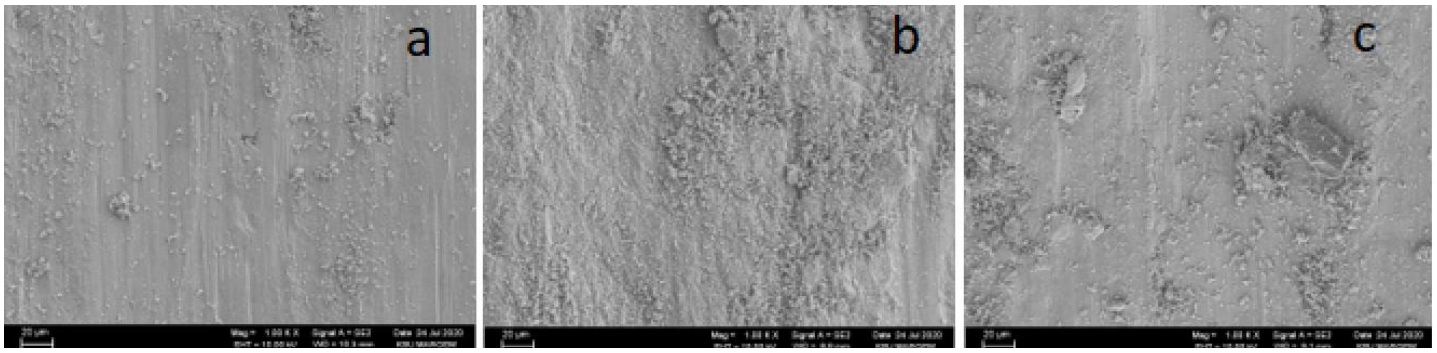


Figure 6. SEM image of boronized samples under 40N load (a) 800°C 2h (b) 800°C 4h (c) 800°C 8h

In addition, in order to control the wear depths of the samples and to calculate the volume losses more clearly, the wear surfaces of the samples were displayed in three dimensions using Nikon shuttlepix, and the wear depths and volume losses were also controlled by the software. Figure 7 shows the three-dimensional image of the device, reduced to 2 dimensions.

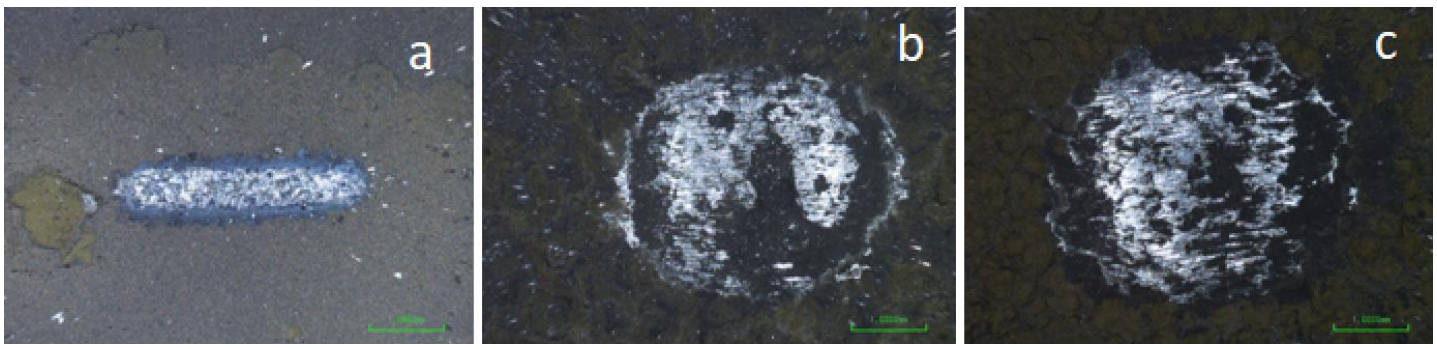


Figure 7. Nikon shuttlepix 3d microscope image of boronized samples under 20N load (a) 800°C 2h (b) 800°C 4h (c) 800°C 8h

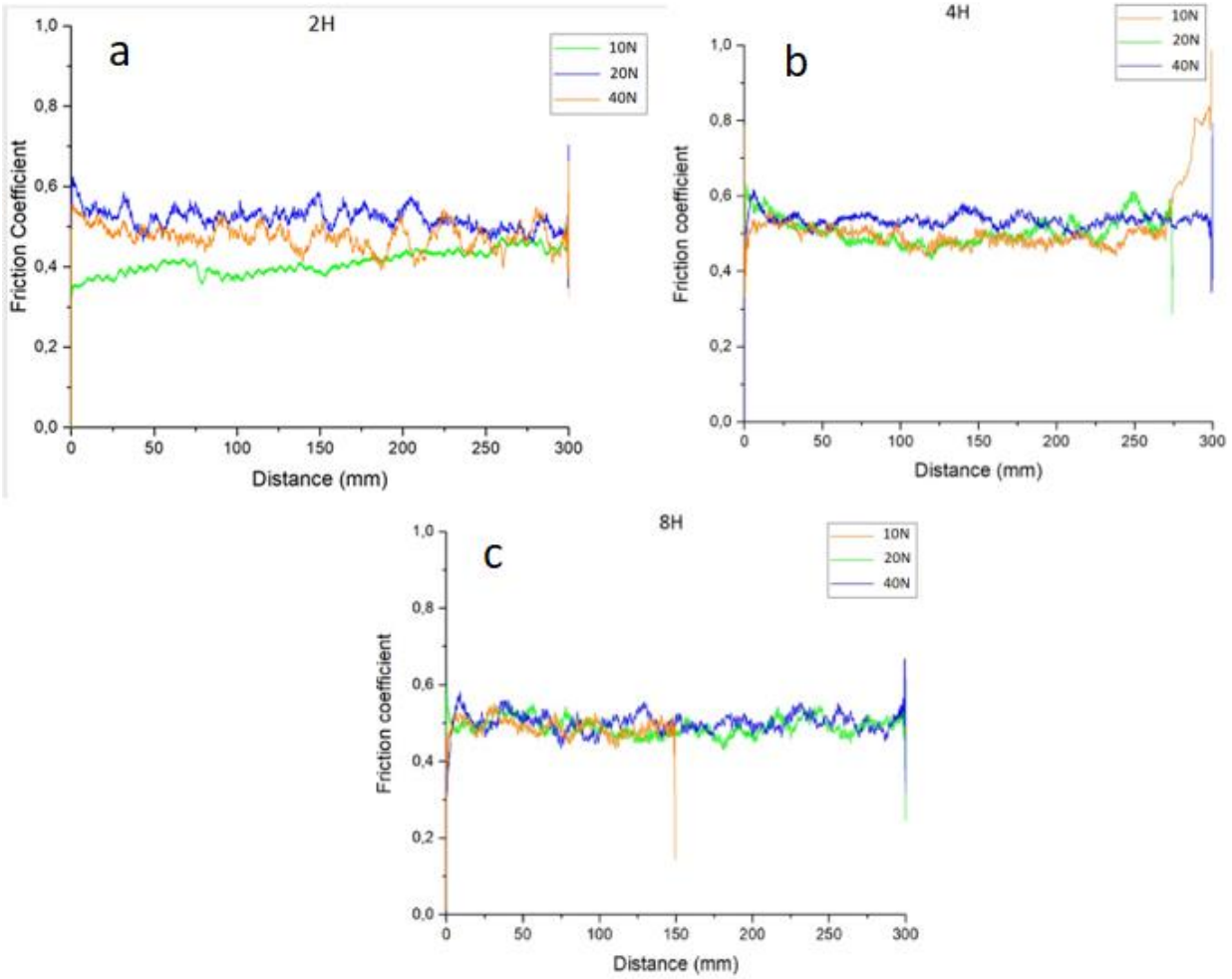


Figure 8. Friction coefficent distance plots of boronized samples at 10N, 20N and 40N (a) 800°C 2h (b) 800°C 4h (c) 800°C 8h

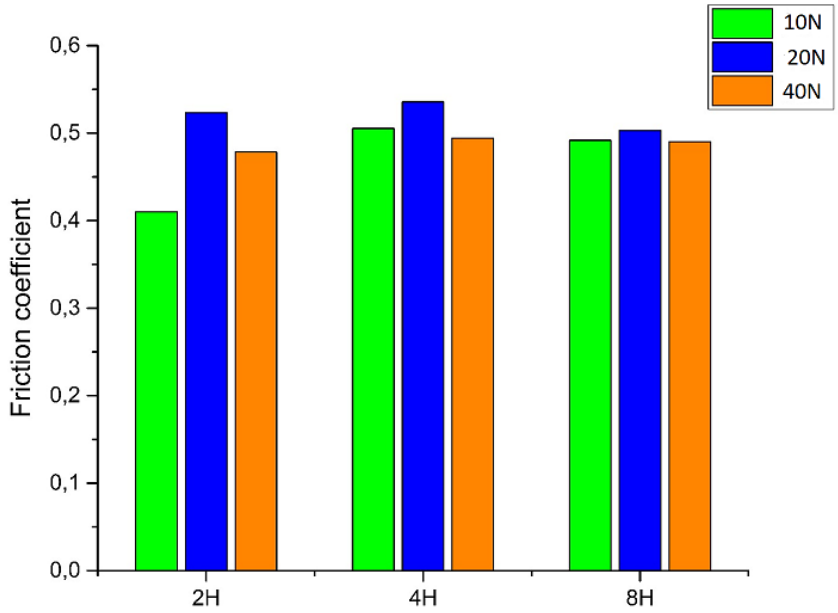


Figure 9. Friction Coefficent

2.4 Hardness

Hardness test measurements were made on the Qness Q10 A+ micro hardness measuring device. The hardness measurement results are given in the figure.

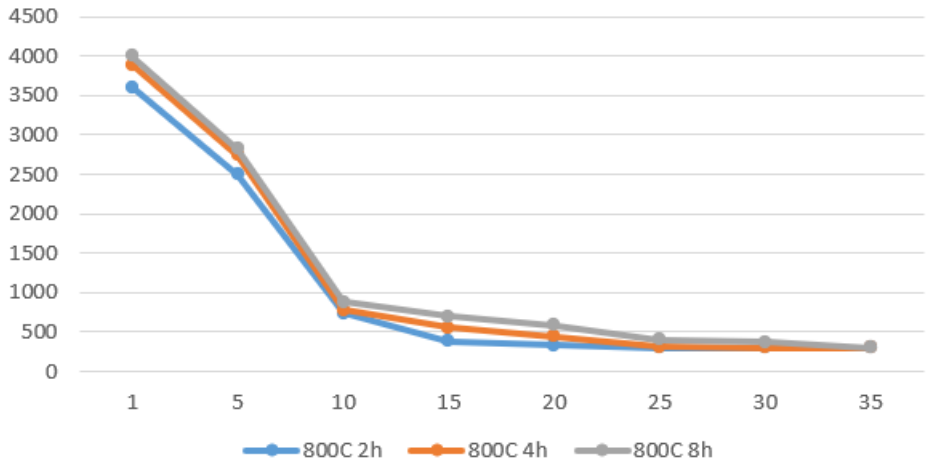


Figure 10. Distance from the surface (µm) hardness measurement results



Figure 11. Qness Q10A+ microhardness tester

2.5 Material Characterization

After boriding, the samples were subjected to XRD measurement. XRD measurements were made with the Rigaku ultima IV X Ray diffraction spectrometer device.

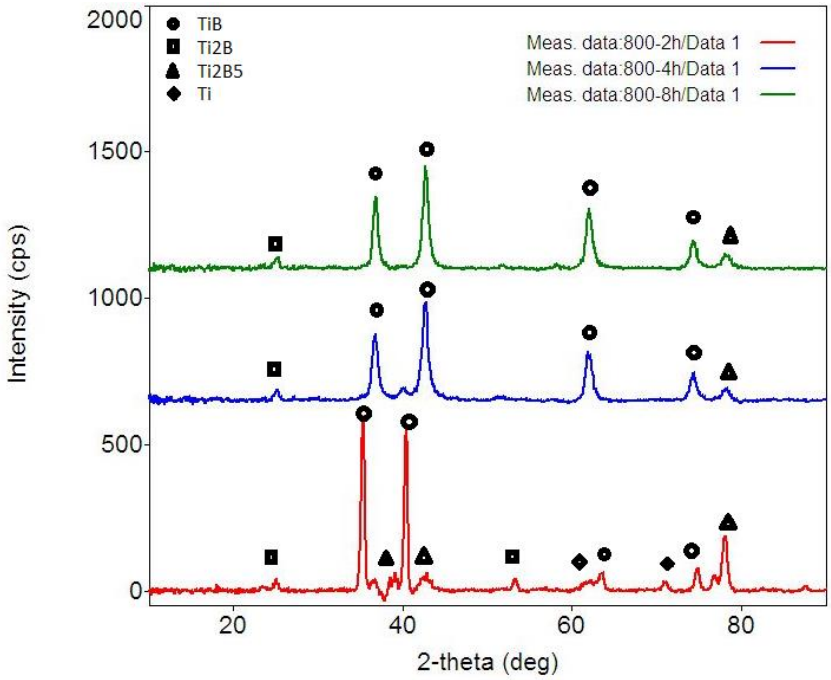


Figure 12. XRD analyzes of 800°C 2h, 4h, and 8h samples

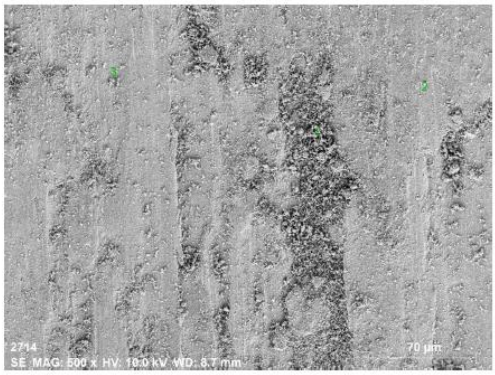


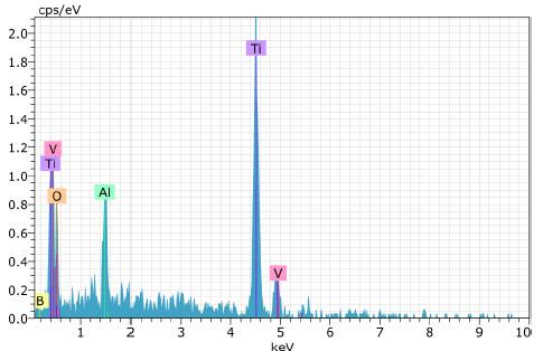
Figure 13. Rigaku ultimate IV X-Ray diffraction spectrometer

After boronization, EDX analyzes were made and sem images were taken on Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem device. In addition, wear images of the worn samples were also taken on the same device.



Figure 14. Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem cihazı

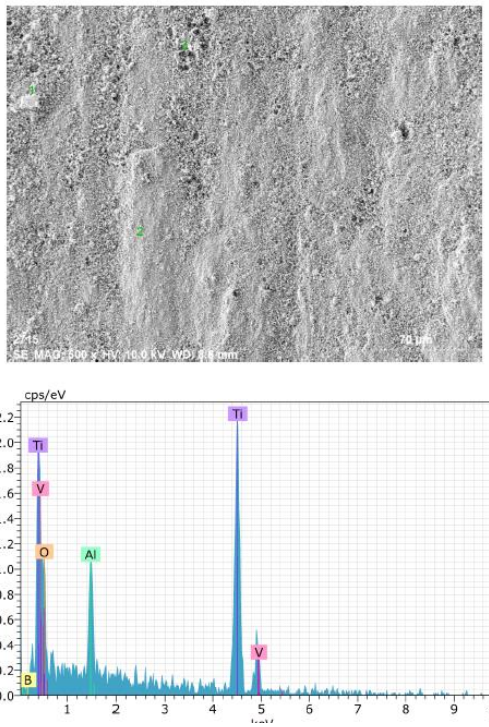




Mass percent (%)

Spectrum	B	O	Al	Ti	V
1	1.61	12.16	4.22	80.49	1.52
2	0.00	0.00	6.20	89.02	4.78
3	7.11	1.14	6.25	85.50	0.00
Mean value:	2.91	4.43	5.56	85.00	2.10
Sigma:	3.73	6.72	1.16	4.29	2.44
Sigma mean:	2.15	3.88	0.67	2.48	1.41

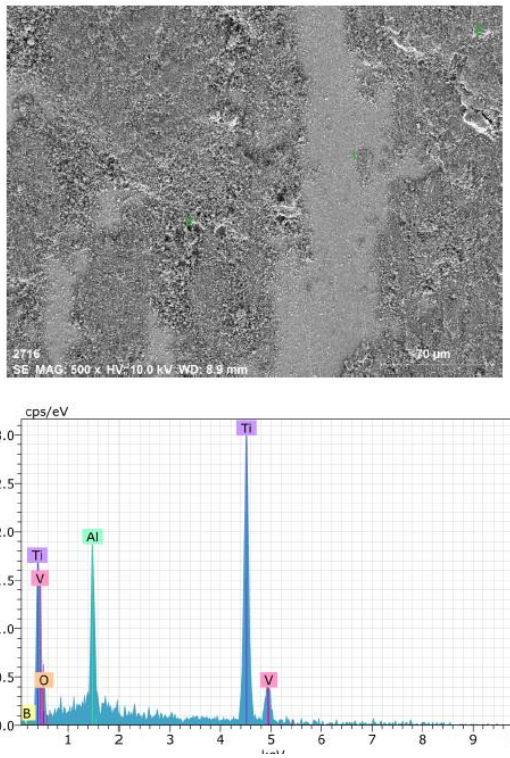
Figure 15. 800°C de 2h borlanmış numunenin SEM görüntüsü ve EDX analizleri



Mass percent (%)

Spectrum	B	O	Al	Ti	V
1	1.80	17.45	4.43	75.69	0.63
2	5.35	40.54	2.81	49.83	1.47
3	0.39	26.57	3.86	64.79	4.39
Mean value:	2.51	28.19	3.70	63.44	2.16
Sigma:	2.56	11.63	0.82	12.98	1.97
Sigma mean:	1.48	6.71	0.47	7.49	1.14

Figure 16. SEM image and EDX analysis of the 2h boronized sample at 800°C



Mass percent (%)

Spectrum	B	O	Al	Ti	V
1	0.69	0.83	7.36	90.70	0.42
2	0.86	33.59	3.59	58.93	3.03
3	4.71	46.16	2.08	45.31	1.75
Mean value:	2.09	26.86	4.34	64.98	1.73
Sigma:	2.27	23.40	2.72	23.29	1.31
Sigma mean:	1.31	13.51	1.57	13.45	0.75

Figure 17. SEM image and EDX analysis of the 2h boronized sample at 800°C

When the SEM images and XRD analyzes are examined, it is seen that the samples boronized for a longer time reach higher peak values, which is evident in the microstructure.

3. Conclusion

Commercial usage areas of Ti6Al4V alloy are increasing day by day. We do some additional processes to make the different properties of the materials used better according to the area needed. When we perform these operations, we want to obtain higher mechanical properties without decreasing values such as biocompatibility, corrosion resistance, toughness and wear resistance. Boriding process allows us to obtain better wear resistance, hardness resistance and corrosion properties without sacrificing the material's own properties. When the tests and analyzes are examined, we see that the TiB and Ti2B layers formed in the structure have different peaks at different temperatures. This situation emerges when we examine the microstructure of the material and EDX analysis. However, with the wear test, we see how effective the boron layer on the surface is. When the hardness values of the materials are examined from the surface, this gives us information about the thickness of the layer. Here, while the layer thickness is thinner at lower waiting times, the increase in the waiting time ensures that the layer is thicker. Another situation that should not be overlooked here is the adjustment of the boriding time of the material under optimum conditions. Since the high-thickness layer will have a brittle structure, it may not provide the desired mechanical properties.

When Figure 15, Figure 16 and Figure 17 are examined, it is seen that the microstructure of the samples changes with the increase of the boriding time. The increase in the boron layer shows this to us with XRD graphics. The hardness values of the samples changing from the surface indicate that the boriding process time is proportional to the hardness. In addition, the hardness values from the surface also increase in the samples boronized for a longer time.

In general, Ti6Al4V is a suitable material for boriding. Box boriding process is preferred especially because of its low cost and ease. As a result of the boriding process, the hardness value increased as the layer thickness and penetration depth increased with the increase in the time of the material. We see this increase in hardness values in the wear test results. Abrasion depths and wear rates resulting from wear gave better results with increasing coating thickness.

The study shows that box boriding process is a simple process for application and control of parameters. Ti6Al4V samples produced by boriding process reached the desired wear and hardness values. By increasing the boriding time, these properties can be preserved up to the inner parts of the alloy. Wear test results show us this.

Referanslar

Atar E., Kayali S., Cimenoglu H., (2008), Characteristics and wear performance of borided Ti6Al4V alloy, 202, 4583-4590, Surface and Coatings technology

Atar E., Kayali S., Cimenoglu H., (2009), Surface Modification of Ti6Al4V Alloy by Pack Boriding, Aperta Ulakbim.

Duan Y,, Li, p., Chen Z., Shi J., Ma L. (2018) Surface evolution and growth kinetics of Ti6Al4V alloy in pac briding, 742, 690-701, Journal of alloys and compounds.

Duan Y., Wang X., Liu D., (2020), Characteristics, wear and corrosion properties of borided pure titanium by pack boriding near α → β phase transition temperature, 46, 16380-16387, Ceramics international

Keddam M., Taktak S., (2017), Characterization and diffusion model for the titanium boride layers formed on the Ti6Al4V alloy by plasma paste boriding, 399, 229-236, Applied surfaace science.

Li p., Liu D., Bao W., (2018), Surface characterization and diffusion model of pack borided TB2 titanium alloy, 44, 18429-18437, Ceramics İnternational.

Paretti V., Ferrais S., (2018), Surface treatments for boriding of Ti6Al4V alloy in view of applications as a biomaterial, 126, 21-28, Tribology international.

Yao Q., Sun J., Fu Y., (2016), An Evaluation of a Borided Layer Formed on Ti-6Al-4V Alloy by Means of SMAT and Low-Temperature Boriding, 993, Mdpi, Materials.