Kırıkkale University International Journal of Engineering Research and Development

International Peer Reviewed Journal
e-ISSN: 1308-5514



Volume: 15
Issue: 3
DECEMBER 2023

Kırıkkale Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi

Uluslararası Hakemli Dergi
Cilt: 15 Sayı: 3 Aralık 2023

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ / KIRIKKALE UNIVERSITY

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

Sahibi / Owner

Ersan ASLAN
Rektör / Rector

Baş Editör/Editor in Chief

Ali Payıdar AKGÜNGÖR

Yardımcı Editörler / Associate Editors

Murat LÜY
Ersin KORKMAZ
Emrah KANTAROĞLU

Alan Editörleri / Area Editors

Murat INAL (Kırıkkale Üniversitesi) – Biyomühendislik / Bioengineering
Beste Çağdaş TUNALI (Kırıkkale Üniversitesi) – Biyomühendislik / Bioengineering
Orhan Gazi ODACIOGLU (Kırıkkale Üniversitesi) – İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering
Saruhan KARTAL (Kırıkkale Üniversitesi) – İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering
Atilla ERGUZEN (Kırıkkale Üniversitesi) – Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering
Enes AYAN (Kırıkkale Üniversitesi) – Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering
Fahrettin HORASAN (Kırıkkale Üniversitesi) – Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering
Tolga EREN (Kırıkkale Üniversitesi) – Elektrik Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering
Özge Pınar AKKAŞ (Kırıkkale Üniversitesi) – Elektrik Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering
Hacı Mehmet ALAKAŞ (Kırıkkale Üniversitesi) –Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering
Ali Fırat İNAL (Kırıkkale Üniversitesi) –Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering
Tuna AYDİN (Kırıkkale Üniversitesi) –Malzeme ve Metalurji Mühendisliği / Metallurgical and Materials Engineering
Aziz Barış BASYİGİT (Kırıkkale Üniversitesi) –Malzeme ve Metalurji Mühendisliği / Metallurgical and Materials Engineering
Osman BİCAN (Kırıkkale Üniversitesi) –Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering
Hakan ARSLAN (Kırıkkale Üniversitesi) –Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering
Tolga DEMİRCAN (Kırıkkale Üniversitesi) –Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering

Dergi Sekreteryası / Journal Secretariat

Buğra Hatipoğlu (Kırıkkale Üniversitesi)
Selen Öztürk Akbıyık (Kırıkkale Üniversitesi)
Zeynep Çabuk (Kırıkkale Üniversitesi)
Kadriye Nur Erman (Kırıkkale Üniversitesi)
Mustafa Yurdakul (Kırıkkale Üniversitesi)
Ceylan Çiçek (Kırıkkale Üniversitesi)

Ahmet Enes Saraç (Kırıkkale Üniversitesi)
Gazi Günel (Kırıkkale Üniversitesi)

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

Aralık 2023 / December 2023
Özel Sayı / Special Issue

Kapak Tasarım / Graphics Design: Hüseyin AYDİLEK

Danışma Kurulu / Editorial Board
(Alfabetik Sıralama / Alphabetical)

A. Serdar YILMAZ Sütçü İmam Üniversitesi

Ahmet Kürşat TÜRKER Kırıkkale Üniversitesi

Ayten ÇELEBİ KESKİN Kırıkkale Üniversitesi

Ertuğrul ÇAM Samsun Üniversitesi

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 SAHMARAN Hacettepe Üniversitesi

Mustafa YİĞİTOĞLU Kırıkkale Üniversitesi

Mustafa TÜRK Kırıkkale Üniversitesi

Nihat İNANÇ Kırıkkale Üniversitesi

Ömer Muhammet SOYSAL Louisiana State University

Özgür ANIL Gazi Üniversitesi

Recep ÇALIN Kırıkkale Üniversitesi

Sami SAKALLI – 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	**Dalma ve Tel Erozyon İle İşlenen Geometrilerin İşleme Parametrelerinde Oluşan Yüzeylerin Deneysel Olarak İncelenmesi** ***Holes Drilled by Electro Erosion and Wire Erosion Experimental Investigation of Surfaces Formed by Changing Cutting Parameters*** *Oğuzhan CAN, Yusuf IŞIK,M. Taylan Daş* **DOI: 10.29137/umagd.1165180**	**1s-15s**
2	**İstatiksel Kodlama Yöntemlerinin Türkçe ve İngilizce Metinlerde Sıkıştırma Başarımı Karşılaştırma Örneği** ***A Comparison of Text Compression Performance of Statistical Coding Methods in Turkish and English*** *İbrahim ÖZTÜRK, Hakan Celil KAYA* **DOI: 10.29137/umagd.1294273**	**16s-27s**
3	***Daralan ve Genişleyen Geometriye Sahip Bir Mini Kanalda Kanal Geometrisinin Isı Transferine Olan Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi*** ***Numerical Investigation of the Effects of Channel Geometry on Heat Transfer in a Mini Channel with Narrowing and Expanding Geometry*** *Bahadır Gemicioğlu, Tayyip Demirbaş,Tolga Demircan* **DOI: 10.29137/umagd.1309466**	**28s-41s**
4	**Çok Fonksiyonlu DDCC+ Tabanlı Akım-Modlu Dört Bölgeli Çarpma Devresi** ***Multi-Function DDCC+ Based Current-Mode Four-Quadrant Multiplier Circuit*** *Tayfun UNUK* **DOI: 10.29137/umagd.1317071**	**42s-48s**
5	***Diagnosing Covid-19 Disease from Computed Tomography Images with Deep Learning and Machine Learning*** *Gözde KAHRAMAN, Zafer CİVELEK* **DOI: 10.29137/umagd.1159663**	**49s-63s**
6	**The Effect of SiC and MgO Ceramic Reinforcements on the Mechanical Behavior and Electrical Properties of the Composite Structure in Al7075/SiC/MgO Hybrid Composites** *Mustafa Yasin ERTEN, Rüstem YILMAZEL, Ahmet FİLAZİ, Muharrem PUL* **DOI: 10.29137/umagd.1321830**	**64s-73s**
7	**Design and Synthesis of A Novel N-Substituted Aminoalcohol Derivative with Hexachlorocyclotriphosphazene** *Ömer SONKAYA* **DOI: 10.29137/umagd.1318985**	**74s-81s**
8	**Investigation of Electrical Conductivity in Cement Mortars with Waste Iron Chips** *Rüstem YILMAZEL, Ahmet FİLAZİ,Muharrem PUL* **DOI: 10.29137/umagd.950070**	**82s-91s**
9	**Vakumlanmış Silindirik Güneş Kollektör Tüplerinde Geometrik Uyumluluğun Sayısal Analizi** ***A Numerical Analysis For Geometrical Compatibility Of Cylindrical Evacuated Tubes*** *Ömer Resuloğlu* **DOI: 10.29137/umagd.1320446**	**92s-97s**

10	**Gendered Dimensions of Transport and Women's Social Exclusion in Abidjan (Côte d'Ivoire)** *Bassirou Bande, Hülagü Kaplan* **DOI: 10.29137/umagd.1334337**	**98s-112s**
11	***Numerical Analysis of Bio-Hybrid Crashworthiness Design and Investigation of Energy Absorption Performances Under Oblique Impact*** *Hakan Burçin ERDOĞUŞ* **DOI: 10.29137/umagd.958557**	**113s-122s**
12	***Goal Programming Approach for Service Staff Scheduling Problem in A Restaurant*** *Hüseyin Ertan İNAN* **DOI: 10.29137/umagd.1309302**	**123s-132s**
13	**Farklı Priz Hızlandırıcı Katkıların Püskürtme Beton Performansına Etkisinin Karşılaştırmalı Analizi** ***Comparative Analysis of the Effect of Different Setting Accelerator Admixtures on Shotcrete Performance*** *Hasan Polat,Cengiz Özel* **DOI: 10.29137/umagd.1297157**	**133s-142s**
14	**Çelik Üretiminde Ortaya Çıkan Atık Demir Oksit'in Aventurin Sırlarında Yeniden Kullanımı** ***The Reuse of Spent Iron Oxide of Steelmaking into the Aventurine Glazes*** *Aslı Çakır Arianpour,Farzin Arianpour* **DOI: 10.29137/umagd.1312191**	**143s-152s**
15	**Faz Değişim Malzemelerinde Kullanılan İnorganik Nanomalzemelerin MULTIMOORA Yöntemiyle Önceliklendirilmesi** ***Prioritization of Inorganic Nanomaterials Used in Phase Change Materials by MULTIMOORA Method*** *Hasret Akgün, Ece Turan,Aysun Özkan,Zerrin Günkaya,Müfide Banar* **DOI: 10.29137/umagd.1318413**	**153s-165s**
16	**Farklı Beton ve Çelik Sınıfı Kullanımının Yapıların Zaman Tanım Alanında Analiz Sonuçlarına Etkilerinin İncelenmesi (Ocak 2020 Elazığ Depremi Örneği)** ***Analysis of the Effects of Utilizing Different Concrete and Steel Grades on theTemporal Response of Structures: A Case Study of the January 2020 Elazığ Earthquake*** *Nazan Yeniçelik, Şule Bakırcı Er,Eda Avanoğlu Sıcacık* **DOI: 10.29137/umagd.1340206**	**166s-178s**
17	**Bir Mekanik Jiroskopun Yalpalama Tahmininde Uzun Kısa Süreli Bellek Ağı Yaklaşımı** ***Long-short-term memory network approach to forecast the precession of a mechanical gyroscope*** *İlyas KAÇAR* **DOI: 10.29137/umagd.1293684**	**179s-193s**
18	**Ağır Silah Namlusunun Mekanik Otofretaj İşleminde Gerilme Dağılımının Sayısal Olarak İncelenmesi** ***Numerical Investigation of Stress Distribution in Swage Autofrettage Processfor Heavy Weapon Barrel*** *Doğan Baran, Osman Bican,Yahya Doğu* **DOI: 10.29137/umagd.1364476**	**194s-208s**

19	**Endüstriyel Hangar Tipi Çelik Yapıda Farklı Makas ve Çapraz Türlerinin Yapısal Sistem Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi** ***Investigation The Effects Of Various Truss And Brace Kinds On The Structural System In Industrial Hangar Type Steel Structure*** *Yağmur Dikiciaşık, İbrahim Tarık Sen, Serdar Çarbaş* **DOI: 10.29137/umagd.1362366**	**209s-233s**
20	**Beton Esaslı Prefabrike Cephe Panellerinin Tarihsel Gelişiminin Farklı Ülkelerdeki Örnekler Üzerinden Değerlendirilmesi** ***Evaluation of the Historical Development of Concrete Based Prefabricated Facade Panels through Examples from Different Countries*** *Mediha Gültek, Güneş Mutlu Avinç, Pelin Sarıcıoğlu,Aslı Yıldız* **DOI: 10.29137/umagd.1323771**	**234s-249s**
21	**Proaktif Trafik Kaza Risk Değerlendirme Yaklaşımı ve Türkiye İçin Uygulanabilirliğinin Tartışılması** ***Proactive Traffic Accident Risk Assessment Approach and Discussion of its Applicability for Türkiye*** *Erdem DOĞAN, Ersin KORKMAZ* **DOI: 10.29137/umagd.1367522**	**250s-256s**
22	**Bilinmeyen PLC Programının Makine Öğrenmesi Yöntemleriyle Taklit Edilmesi** ***Imitating of an Unknown PLC Program with Machine Learning Methods*** *Faruk Ulamış,Yasin Yüce,Bülent Cesur* **DOI: 10.29137/umagd.1364512**	**257s-269s**
23	**Taşıma Gücü Düşük Farklı Zeminlerde CPT Değerlerine Göre Yüzeysel Temel Tasarımı** ***Shallow Foundation Design According to CPT Value on Different Soils with Low Bearing Capacity*** *Tuğçe Bekdemir, Baran Toprak* **DOI: 10.29137/umagd.1370297**	**270s-288s**
24	***Asansörlerde Kullanılan Otomatik Kapı Mekanizması Raylarının Tribolojik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi*** ***The Experimental Study of Tribological Properties of the Automatic Door Mechanism Rails Used in the Elevators*** *Ertuğrul Durak, Mesut Tor* **DOI: 10.29137/umagd.1378962**	**289s-301s**
25	**A Feasibility Analysis of the Use of ISAR Training Data in Machine Learning-Based SAR ATR** *Enes Yiğit, Şevket Demirci, Umut Özkaya* **DOI: 10.29137/umagd.1402020**	**302s-308s**
26	**Image Encryption Implementation by Using Memristor Based Chaotic Systems and DNA Coding** *Cagri Candan, Hasan Ulutaş* **DOI: 10.29137/umagd.1399028**	**309s-317s**

MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

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

UMAGD, (2023) 15(3), 01-15.

10.29137/umagd.1165180

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:03 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue

Araştırma Makalesi / Research Article

Dalma ve Tel Erozyon İle İşlenen Geometrilerin İşleme Parametrelerinde Oluşan Yüzeylerin Deneysel Olarak İncelenmesi

Holes Drilled by Electro Erosion and Wire Erosion Experimental Investigation of Surfaces Formed by Changing Cutting Parameters

Oğuzhan Can[1], Yusuf Işık[2] M. Taylan Daş[3*]

[1]Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450 Yahşihan, Kırıkkale, TÜRKİYE

***Başvuru/Received**: 16/08/2022* ***Kabul / Accepted**: 02/12/2022* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Öz

BBu çalışma, Inconel 718 ve Ti-6Al-4V malzemelerine tel erozyon ve dalma erozyon ile kare ve silindirik geometrili delik formu işlemleri yapılarak, EDM (Electrical discharge machining) parametrelerinin yüzey kalitesine etkileri ve en iyi yüzey kalitesine ulaşmak amaçlanmıştır. Havacılık endüstrisinde kullanım alanları artmakta olan Inconel 718 ve Ti-6Al-4V malzemelerin tok ve sert özelliklerinden dolayı talaşlı imalat ile üretim sürecinde takım sarfiyatının artmasına neden olmaktadır. Ayrıca talaşlı imalat sonrası elde edilen yüzey kalitesi, elektro erozyon ile elde edilen yüzeyden daha kötü olduğu için dalma erozyon ve tel erozyon gibi alışılmamış imalat yöntemleri bu çalışmada tercih edilmiştir. Değişken dalma erozyon parametreleri olarak; darbe süresi (Ton), bekleme süresi (Toff) ve servo – kontrol voltajı, sabit olarak servo ilerleme hızı alınmıştır. Değişken tel erozyon parametreleri olarak SF (kesim hızı), sabit parametreler olarak MAO (Mikroark Oksidasyon), WP (Su Basıncı), tel çapı alınmıştır. Deneylerde tel erozyon için 0.25 mm çapında pirinç tel kullanılmıştır. Dalma erozyonda 8 mm çapında bakır elektrot kullanılmıştır. Deneyler sonucunda numunelerin yüzeyleri SEM (Tarama Elektron Mikroskop) mikroskobunda incelenmiştir. Sonuç olarak, farklı özelliklere sahip malzemelerde tel erozyon ve dalma erozyon işlemleri sonucunda oluşan yüzeylerdeki değişimler işlem parametrelerine bağlı olarak değerlendirilmiş ve tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler

"Dalma Erozyon, Elektro Erozyon , Ti-6Al-4V, Inconel 718,"

Abstract

In this study, it is aimed to reach the best surface in surface quality by testing different parameters by performing wire erosion, plunge erosion, hole drilling and square forming processes on Inconel 718 and Ti-6Al-4V materials. Due to the fact that Inconel 718 and Ti-6Al-4V materials, which are increasingly used in the aviation industry, are tough and hard materials, machining also causes in the production process and more tool consumption. In addition, since the surface quality of machining is worse than electro-erosion, unconventional manufacturing methods such as plunge erosion and wire erosion have been preferred. As a variable; pulse duration (Ton) and dwell time (Toff) and servo-control voltage, constant table advance speed, wire tension. SF (cut rate), MAO (Microarc future), WP(water prediction) as the wire can resist erosion,and wire diameter were taken. In the experiments, 0.25mm diameter brass wire was used for wire erosion. Copper material of 8mm diameter was used in plunge erosion. As a result of the experiments, the microstructures of the samples were examined under SEM (Scanning Electron Microscope) microscopes and their microstructures were examined. As a result, it has been observed that microstructure changes in materials with different properties as a result of wire erosion and plunge erosion processes change depending on the process parameters

Key Words

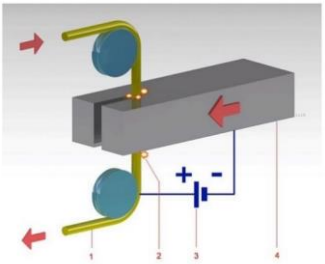
"Electro Erosion, Wire Erosion, Ti-6Al-4V, Inconel 718 "

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

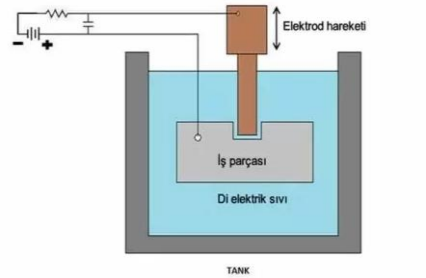
1. Giriş

Savunma ve havacılık alanında çalışmaların artmasıyla beraber ortaya çıkan yeni malzemeler ve bunları işlemede geleneksel imalat yöntemlerinden olan talaşlı imalat yöntemleri yetersiz kalmaktadır. Bu yeni malzemelerden olan Inconel 718 ve Ti-6Al-4V malzemeler aynı şekilde talaşlı imalatta üretimi zor malzemelerdir. Bu çalışma, özellikleri farklı talaşlı imalat ile işlenmesi zor Inconel 718 ve titanyum alaşımlı Ti-6Al-4V malzemeleri kullanılarak, değişik kesme parametrelerinde tel erozyon ve dalma erozyon tezgahlarında işleme yapılarak malzeme yüzeyinde meydana gelen değişimi incelenerek en iyi yüzey elde edilmesi amacıyla yapılmıştır.

Elektro erozyon yönteminde; gerilim, vurum akımı, vurum süresi, vurum ara süresi, tabla hızı, dielektrik sıvı basıncı, tel çapı, tel ilerleme hızı, servo – kontrol voltajı, SF (kesim hızı), MAO (Mikroark oksidasyon), WP (su basıncı), tel çapı ve elektrot malzeme özellikleri gibi işlem parametreleri yüzey kalitesini ve mikro yapısını değiştirmektedir. Böylece, işlem parametrelerinin seçimi yüzey kalitesinin belirlenmesinde oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Yanlış parametre seçiminde, tel kopmaları ve bakır elektrot aşınmaları gibi işlem kararlığını etkileyen olumsuz sonuçlarla karşılaşılmaktadır. Tel erozyon ve dalma erozyonda yüksek sertlikte, keskin köşeli (tel çapı kadar yarıçapa sahip köşeler), iş parçası kalınlığı fazla olan, çapı küçük olan delikler (0-1mm), iyi yüzey kalitesi hedeflenen parçalar için uygun bir imalat yöntemidir. Dalma erozyonlarda bunlara ilave olarak karmaşık şekilli parçalar erkek bakır veya pirinç formları işlenerek üretimi yapılabilmektedir. Ay ve Aydoğdu. (Ay, M., Aydoğdu, D., 2010) yaptıkları çalışmada tel erozyonda işlemede parametrelerin değiştirilerek parçaların ebatlarındaki değişimin analizlerle yapıldığından bahsedilmiştir. Bu bahsedilen analizler ile numuneler üzerindeki korelasyon katsayısının elde edildiği ve değeri gözlemlenmiştir. Aynı zamanda bu analizler ile parçanın boyutsal değişiminde en etkili olanın itme süresi olduğunu vurgulamıştır. Tosun ve ark.(Tosun, N., Coğun, C., 2002) yaptıkları çalışmada farklı parametreler deneyerek ilerleme hızının tel erozyon ile işlemede nasıl değişkenlik gösterdiğini gözlemlemiştir. Çalışmanın sonucunda bozulan yüzey pürüzlülüğü artan ilerleme hızı ile ilişkili olduğu görülmüştür. Çaydaş (Çaydaş, Ulaş. 2008) yaptığı çalışmada tel erozyon yöntemiyle işleme üzerine yaptıkları çalışmada vurum süresi, gerilim, dielektrik sıvı dolaşımı ve tel ilerleme hızı gibi değişen parametrelerle alüminyum malzeme işlenerek yüzeyi incelenmiştir. Nihat Tosun ve ark., (Tosun, N., Coğun, C., 2002) yaptıkları çalışmada WEDM (Wire Electrical Discharge Machining) ' de darbe süresi, tel hızı, açık devre gerilimiyle, dielektrik yıkama basıncının iş parçası yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel olarak artan darbe süresi, açık devre gerilimi ve tel hızının yüzey pürüzlülüğü Ra değerini arttırdığı, artan dielektrik akışkan basıncının ise yüzey pürüzlülüğü Ra değerini düşürdüğü verilmiştir.



Şekil 1. Tel erozyon şeması (*Elektroerozyon,2022*)



Şekil 2. Dalma erozyon şeması (*Makinaegitim,2022)*

Yukarıda Şekil.1'de tel erozyon da işlemenin takım, iş parçası ve tel ilerleme yönü şematik olarak gösterimi mevcuttur. Şekil.2 de ise dalma erozyonda dielektrik sıvıya daldırılan iş parçası ve elektrot hareketi gösterilmektedir.

2. Literatür

Tablo 1'de mevcut dalma erozyon cihazları kullanılarak çalışılan malzemeler ve işlem kalitesi için kullanılan parametreler gösterilmiştir. Ayrıca kullanılan cihazlarda işlem için seçilen elektrot çeşitlerine bakıldığında ağırlıklı olarak pirinç, bakır ve grafit tercih edildiği görülmektedir. Parçaların işleme parametresi olarak dalma erozyon için tabla ilerleme hızı, vurum süresi, Ton ve Toff parametrelerinin kullanıldığı literatürde mevcuttur.

Tablo 1. Dalma erozyon literatür taraması

	Yazarlar	Ham Malzeme Cinsi	Kesim ölçüleri	İşleme Yöntemi	Parametreler				Elektrot
1	Ay, M., Aydoğdu, D., (2010)	M303 extra plastik kalıp çeliği	10x10x10	Dalma erozyon	Tabla ilerleme hızı (SF)(mm/dak)	Vurum süresi (µs)	Vurum ara süresi(µs)	x	Pirinç
2	Göv, K., (2017).	Inconel 718, Titanyum alaşımı Ti-6Al-4V	Delik çapı Ø500-400-300 µm	Dalma erozyon	Deşarj akımı (I)	Akım uygulanma (Ton)	Bekletme süresi (Toff)	x	Pirinç, bakır, grafit
3	Okka, M.A., Yılmaz, O., (2009)	Inconel 718 ve Ti-6Al-4V	Delik çapı 0,4 ile 3 mm arasında kör delik	Dalma erozyon	Current (A	Ton (µs)	Toff (µs)	Capacitance (µs)	Bakır ve pirinç
4	Oğuz E. ve ark.(2016)	Ti6Al4V ve IN718	Delik çapı 2 mm	Dalma erozyon	Boşalım akımı (I)	Vurum süresi ((µs)	Bekletme süresi (µs)	x	Pirinç
5	Gülcan O. ve ark. (2015)	SAE 1040 Çelik	60x60x10 mm	Dalma erozyon	Boşalım akımı (I)	Vurum süresi (µs)	Kutuplaşma	Bekleme süresi	Bakır - krom toz metal
6	Yıldız Y. (2010)	C-122 Bakır	Ø3x300 mm	Dalma erozyon	Akım (A)	Açık vurum süresi (µs)	Kapalı vurum süresi (µs)	x	Berilyum-Bakır Alaşımı
7	Anıl Kumar ve ark.(2014)	Inconel 718	65x25x4 mm	Dalma erozyon	Peak current	Açık vurum süresi	Duty cycle	Gap voltage	Bakır
8	Sharanjit S. ve Arvind B.(2011)	x	10-6-10-4 mm3	Dalma erozyon	Peak current	Açık vurum süresi	Kapalı vurum süresi	Voltage	x
9	Joudivand S. ve ark.(2015)	AISI H13 Çelik	10x15x8 mm	Dalma erozyon	Akım (A)	Açık vurum süresi (µs)	Kapalı vurum süresi	Gapvoltage	Grafit

Tablo 2'de mevcut tel erozyon cihazları kullanılarak çalışılan malzemeler ve işlem kalitesi için kullanılan parametreler gösterilmiştir. Ayrıca kullanılan cihazlarda işlem için seçilen tel elektrot çeşitlerine bakıldığında ağırlıklı olarak pirinç ve bakır tercih edildiği görülmektedir. Parçaların işleme parametresi olarak tel erozyon için Deşarj akımı(I), Tel İlerleme Hızı (m/dak), akım (A) parametrelerinin kullanıldığı literatürde mevcuttur.

Tablo 2. Tel erozyon literatür taraması

	Yazarlar	Ham Malzeme Cinsi	Kesim ölçüleri	İşleme Yöntemi	Parametreler				Tel çeşidi
1	Tosun, N., Coğun, C., (2002)	4140 Çelik	Delik çapı 0.25 mm	Tel erozyon	Deşarj akımı (I)	Vurum süresi (µs)	Gerilim (V)	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Pirinç
2	Çaydaş, Ulaş(2008).	Alüminyum Alaşımı	4, 8, 16 mm	Tel erozyon	Dielektrik Sıvı Sirkülasyon Basıncı (kg/cm2)	Vurum süresi (µs)	Gerilim (V)	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Pirinç
3	Gürbüz H. Ve Ark. (2019)	Takım çeliği ve EN 1.4301 paslanmaz çelik	10x10x25 mm	Tel erozyon	Akım (A)	Vurum süresi (Ton) (µs)	Vurum ara süresi (µs)	Gerilim	Bakır, Pirinç, Çinko kaplı pirinç
4	Özek, C., Özel, C., (2003)	Ç8620 Çeliği	Tel Çapı 0.05- 0.4 mm	Tel erozyon	Akım (A)	Gerilim	x	x	Pirinç, Molib, Tungsten
5	Kuş, A. , Motorcu, A.R., (2017)	Waspaloy süper alaşım	Ø 36,6 mm x 200 mm	Tel erozyon	Akım (A)	Vurum süresi (µs)	İki vurum arası geçen süre	Açık devre gerilimi	Farklı teller
6]	Kuş, A. , Motorcu, A., (2016)	Karma kompozit Al-B4C/Gr	200 µm	Tel erozyon	İlerleme hızı(m/min)	Açık vurum süresi (µs)	Kapalı vurum süresi (µs)	x	Alumix 123
7	Yazar, M. , Özdemir, A., (2010).	1040 Çelik, 1035 Çelik, 1045 Çelik	Genişlik 5 mm	Tel erozyon	Diş Sayısı (Z)	Elipsin değeri (mm)	Elipsin b değeri (mm)	a/b Oranı	x
8	Çaydaş, U. , Hasçalık, A., (2004)	AISI D5 Takım çeliği	20 mm2, 40 mm2, 80 mm2	Tel erozyon	Gerilim (V)	Vurum akımı	Vurum ara süresi (µs)	Tel gerilmesi	Pirinç, Molibden, Tungsten
9	Yurtkuran, E. Ve Ark.(2011)	Al-14.9Si-2.4Cu-0.55Mg	40 x 20 x 10 mm	Tel erozyon	Vurum süresi (µs)	Vurum ara süresi (µs)	Akım (I)	Gerilim (V)	Alüminyum
10	Tosun N. Ve Ark.(2002)	SAE 4140 Çelik	Kalınlık 10 mm	Tel erozyon	Vurum süresi (µs)	Open Circuit Voltage	Wirespeed	Dielektric flushing pressure	Pirinç
11	Özerkan, H. B., (2019)	SAE 1040 Çelik	Uzunluk 46 mm	Tel erozyon	Vurum süresi (µs)	Powder type	Powder concentration	x	Bakır
12	Vineet S. Ve Pulak P. (2014)	M2 Yüksek Hızlı Çelik	15x15x15 mm Delik çapı 7 mm	Tel erozyon	Discharge current	Açık vurum süresi	Duty cycle	Gap voltage	Bakır
13	Jia TAO Ve Ark.(2008)	Al6061	Kalınlık 1.27 mm	Tel erozyon	Thetension	Wirespeed	Open circuit	Gap voltage	Pirinç
14	L. Lı. Ve Ark(2013)	Inconel 718	x	Tel erozyon	Peak current	Açık vurum süresi (µs)	Pulse current (A)	x	Cu-Si-C

3. Malzeme ve yöntem

3.1. Malzeme

Deneysel çalışmada, farklı özelliklere sahip Inconel 718 ve titanyum alaşımlı Ti-6Al-4V malzemeler iş parçası olarak kullanılmıştır. 25 mm çapında 10 mm kalınlığında Ti-6Al-4V malzeme ve 12x100x219 mm ebatlarında Inconel 718 plaka kesilerek numuneler hazırlanmıştır.

3.2. Ti-6Al-4V

Yüzeyi parlak, sert ve paslanmaya karşı dayanımlı olan titanyum alaşımlarından Ti-6Al-4V malzeme bu deneysel çalışmada kullanılmıştır. Titanyum genel olarak atom numarası 22 ve sembolü Ti olan kimyasal bir elementtir. Dayanımı yüksek, hafif, korozyona karşı oldukça dayanıklı ve parlak grimsi bir geçiş metalidir. Alüminyum, molibden, vanadyum gibi elementlerle alaşım yapabilir. Bu mukavemeti yüksek, hafif alaşımlar, jet motorları, uzay araçları, askeri, kimyasal ve gıda gibi birçok alanda yaygın kullanılmaktadır. Toksik özelliği olmayan titanyum hiçbir mikro organizma ile reaksiyona girmez. Bu nedenle vücut içi ve dışı sağlık alanında geniş bir kullanım alanına sahiptir. (Fıratkocortodonti, 2022)

Tablo 3. Ti-6Al-4V malzemenin kimyasal bileşimi (Bircelik,2022)

Kalite	Al	V	C	Fe	O	N	H	Ti
Ti-6Al-4V	%5.5 ile 6.5 arası	%3.5 ile 4.5 arası	%0.08 max	%0.25 max	%0.13 max	%0.05 max	%0.012 max	Kalan tüm miktar

3.3. Inconel 718

Inconel 718 alaşımında nikel bulunan malzemeler içinde en çok tercih edilen malzemelerdendir. Aşırı derecede korozyona karşı yüksek mukavemete sahiptir. Sadece yaşlandırma yöntemi ile sertlik verilebilen Inconel malzeme değişen sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruyabilmektedir. Inconel malzemenin gerilim direnci, kırılma direnci, kopma direnci çok yüksektir. Inconel 718 kalite malzemenin bir önemli özelliği de kaynak yapılabilirliği çok iyidir. Bu yüzden kaynaklı montajlarda kullanımı yaygındır. Uzay sanayisinde ve havacılıkta yaygın olarak tercih edilmektedir. Kimyasallarla temas eden parçalarda, denizcilik araçlarında ve parçalarında, nükleer reaktör parçalarında, roket motor parçalarında, çok özel amaçlar için üretilen depo tanklarında, bağlantı elemanlarında, vanalarda ve türbin pervane bıçaklarında Inconel 718 sıkça tercih edilmekte ve kullanılmaktadır. (Bircelik,2022)

Tablo 4. Inconel 718 alaşımının kimyasal bileşimi, (Bircelik,2022)

Kalite	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb+Ta	C	Mn	Si	Al
Ti-6Al-4V	%50 ile 55 arası	%17 ile 21 arası	%12 ile 24 arası	%2.8 ile 3.3 arası	%4.75 ile 5.5 arası	%0.08 max	%0.36 max	%0.35 max	%0.2 ile 0.8 arası

3.4. Elektro erozyon

Elektro erozyon parçayı istenilen şekil ve ölçüde üretmek için elektrik boşalması ile oluşan ark oluşumunun kullanıldığı yöntemdir. Elektriği ileten malzemeler bu yöntem ile işlenebilir. Bu yöntemde talaş kaldırma takım (elektrot) ile işlenecek parça arasında oluşan ark kıvılcımlarının etkisi ile gerçekleşir. İş parçası ve takımın temas etmediği sadece kıvılcımlar ve ergime yoluyla talaş kaldırıp parça erozyona tabi tutularak parça üzerinde çukurlar oluşturulur. Takım ile işlenen parça arasında minimum mesafe 0.0125 mm ile 0.05 mm arasında olmalıdır. Bu mesafe ile elektrik arkı oluşması mümkündür. 8000^{o}C - 12000 ^{o}C aralığında değişen sıcaklığın sebep olduğu bu yöntemde ark tıkanmasını engellemek için talaşlar dielektrik sıvı ile uzaklaştırılır. Dolaşım hızına bağlı olan dielektrik sıvının performansı, dolaşım pompası kullanımı veya benzeri yöntemlerle arttırılabilir.

Takım olarak bakır ve pirinç elektrot katot (-), iş parçası ise anot (+) olarak tanımlanır. Ancak alüminyum elektrotlar, çelik elektrotlar, çelik işlemede kullanılan bakır- tungsten elektrotlar ile kaba işlem için kullanılan grafit elektrotlar bu genellemenin dışındadır. Bu elektrotlar (+) yüklü, ters kutuplu takımlar olarak kullanılabilir. (SEM,2022)

3.5. Tel erozyon

Tel erozyonda takım olarak farklı çaplarda bakır, grafit, pirinç, sert metal tel elektrot kullanılır. Bobin tarafından sarılı olan bu tel parça işlemesi boyunca, aşındıkça ileri doğru itilir. Tel kopması durumunda üretim durdurularak tel bağlanır ve işleme kaldığı yerden devam edilir. Telin avantajı takım değiştirme gereksinimi olmadan farklı iş parçalarının da işlenebilmesidir. Sertliği yüksek olan titanyum karbür, tungsten, kalıp çeliği gibi malzemelerin kesiminde kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak küçük çaplı dairesel delik işlemlerinde ve özellikle köşe yarıçapı istenmeyen keskin köşelerin kesiminde tercih edilir. (SEM,2022)

3.6. Dalma erozyon

Dielektirik sıvı içinde yer alan parçadan talaş kaldırmak için takım sıvısının içine daldırılır. Aşındıkça sayısal kontrolü takımı ileri iter. Tel erozyona göre farkı, aynı ark süresinde daha fazla malzeme aşındırılması amaçlanmasıdır. Dalma erozyonda en önemli nokta iş parçası ile takımın temas etmeden sadece elektrik ark yöntemiyle parçanın işlenmesidir. Asıl kullanım amacı diğer imalat yöntemlerinde işlenmesi için eksenlerin görmediği yüzeye işlenen bakır ile rahatlıkla girilebilir. Aynı şekilde tel erozyonda olduğu gibi küçük çaplı (0,2-1 mm) uzun deliklerin delinmesinde de dalma erozyon yöntemi tercih edilir. (SEM,2022)

3.7. SEM görüntüleme

Taramalı elektron mikroskobu olarak bilinen SEM (Scanning Electron Microscope), Tarama yöntemi ile görüntü elde edilen bu yöntemde odaklı elektron demeti kullanılır. Elektron atom etkileşimi sonucunda parça yüzeyinde kompozisyon ve topografi hakkında farklı sinyaller üretilerek bilgilere ulaşılır. Elektron demeti raster tarama ile yüzeyi tarar ve demetin konumu, algılanan sinyalle eşleştirilerek görsel oluşturulur. 1 nanometreden daha yüksek çözünürlüğe ulaşmanın en iyi yolu sem görüntülemedir. SEM cihazları yüksek vakumda, iletken ve kuru yüzeyleri incelemek için kullanılır. Fakat nemli koşullarda, düşük vakumda, çok düşük sıcaklıklardan yüksek sıcaklıklara değişen koşullarda çalışabilen özelleşmiş cihazlar da vardır.

SEM'de görüntü oluşturmak için genelde elektron demeti tarafından uyarılan numune atomlarının yaydığı ikincil elektronlardan (SE) yararlanılır. Numunenin farklı bölgelerinden ayrılan ikincil elektronların sayısındaki değişim ilk olarak demetin yüzeyle buluşma açısına, yani yüzeyin topografisine bağlıdır. İkincil elektronlar ile birlikte geri saçılan elektronlar, karakteristik elektron demeti, X-ışınları, numune akımı ve iletilen elektronlarla da numuneden farklı sinyaller elde edilerek uygun kompozisyon ve topografi analizleri yapılır.

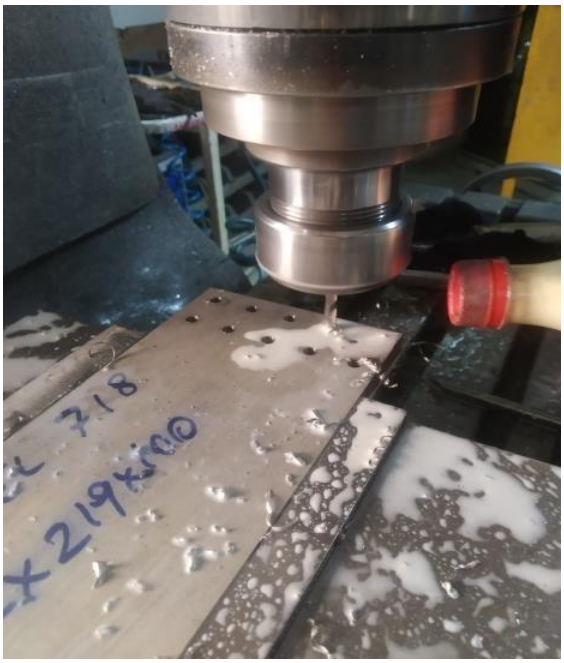
Kullanılacak numune atomlarının en dış yörüngesindeki elektronları ile enerjisi yüksek demet elektronlarının elastik olmayan birleşimi ile düşük enerjili Auger elektronları oluşur. Numune yüzeyi hakkında bilgi taşıyan bu elektronlar Auger spektroskopisinin çalışma prensibini oluşturur. Yine yörünge elektronları ile olan girişimler sonucunda yörüngelerinden atılan veya enerjisi azalan demet elektronları numune yüzeyine doğru hareket ederek yüzeyde birikir. Bu elektronlar ikincil elektron olarak tanımlanır. İkincil elektronlar numune odasında bulunan sintilatörde birikerek ikincil elektron görüntüsü sinyaline çevrilir. İkincil elektronlar numune yüzeyinin 10 nm veya daha düşük derinlikten geldiği için numunenin yüksek çözünürlüğe sahip topografik görüntüsünün elde edilmesinde tercih edilir. (SEM,2022)

4. Deneysel Çalışma

4.1. Numunelerin hazırlanması ve deneyin yapılışı

Inconel 718 alaşımlı malzemeden hazırlanan numuneler öncelikli olarak 12x100x219 mm ebatlarında hazırlanmıştır. İş parçasına dik işlem tezgahında, 5 mm çapında ön delik delme işlemi yapıldıktan sonra dalma erozyon tezgahında belirlenen parametrelerde 8 mm çapında delik delme ve 5x5 mm ölçüsünde kare form oluşturma işlemi yapılmıştır. İşlenen geometriler işleme merkezinde kesilerek 10x12x15 ebatlarında ortadan bölünmüş şekilde ayrı numuneler haline getirilmiştir. İşleme merkezinde kesilen yüzeyler polisaj işlemi ile düzgün bir yüzey oluşana kadar parlatmaya tabi tutulmuştur.

Şekil.3'de Inconel malzemeye ön delik delme işlemi, Şekil 4'de dalma erozyon tezgahında delik delme işlemi, Şekil.5'de ise kare form işleme işlemenin görseli yer almaktadır.



Şekil 3. Inconel 718 alaşımlı malzemeye ön delik delme işlemi



Şekil 4. Inconel 718 alaşımlı malzemenin dalma erozyon ile delik delme işlemi



Şekil 5. Inconel 718 alaşımlı malzemenin dalma erozyon ile kare form işleme

4.2. Numunelerin hazırlanması ve deneyin yapılışı

Titanyum alaşımlı Ti-6Al-4V malzemeler 25 mm çapında millerden 10 mm boyunda kesilerek iş parçaları hazırlanmıştır. Yüzeyler polisaj işlemi görerek temiz ve parlak bir yüzey elde edilmiştir. Numuneler ön delik delme sonrası tel erozyon tezgahında her numuneye 2 adet 10 mm çapında delik ve 4x4 mm ebatlarında kare form işlenmiştir. Son olarak delinen delikler ortadan ikiye bölünerek yüzey inceleme numuneleri oluşturulmuştur**.** Şekil 7 ve 8'de ön işlem ve delme işlemi tamamlanmış numune sırasıyla gösterilmiştir.

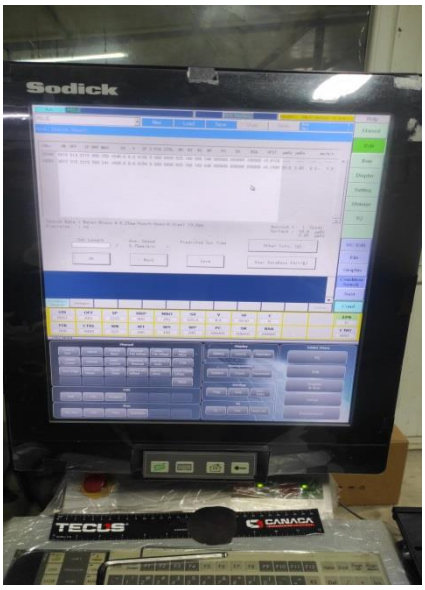
Şekil 6'da hızlı delik delme işlemi ile titanyum malzemeye ön delik delme işleminin görseli bulunmaktadır. Şekil 7'de titanyum malzemeye tel erozyon ile delinmiş deliklerin görseli bulunmaktadır. Şekil 8' de ise tel erozyon tezgahının işleme sırasında kontrol panelinin görseli bulunmaktadır.



Şekil 6. Ti-6Al-4V malzemeye ön delik delme



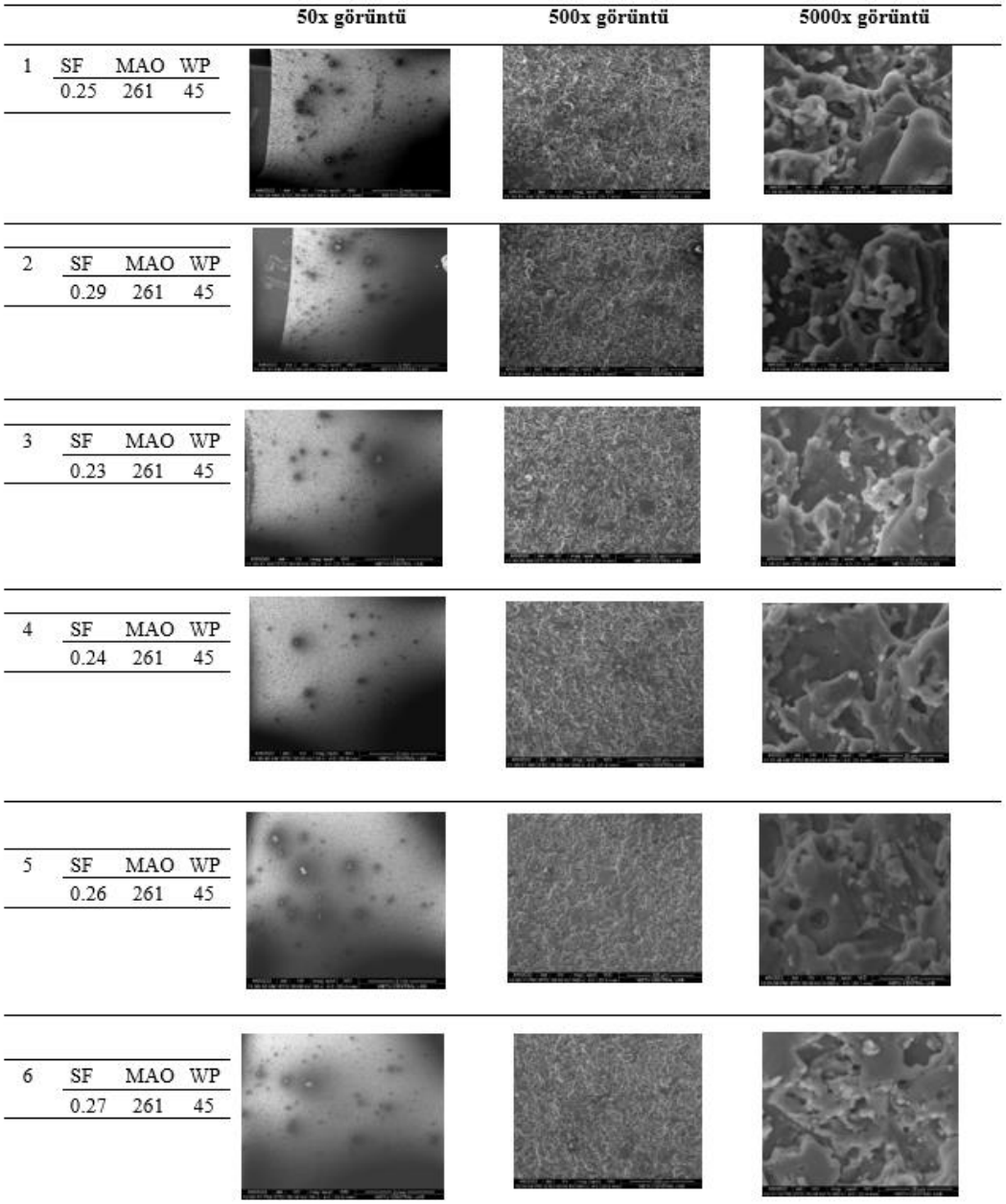
Şekil 7. Ti-6Al-4V malzemeye tel erozyonda delik delme



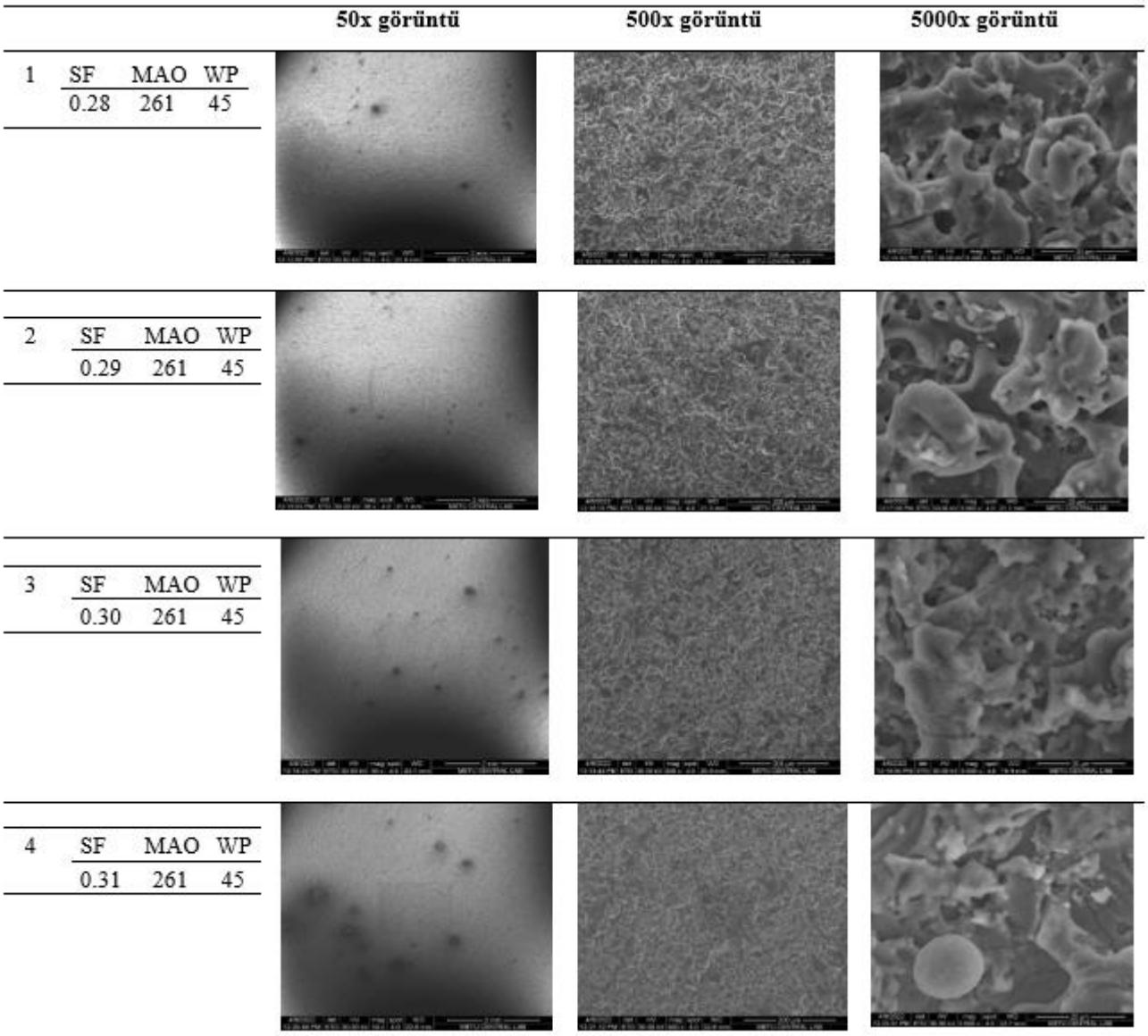
Şekil 8. Tel erozyon tezgahının kontrol paneli

4.3. Numunelerin SEM görüntüleri

10 mm çapında delinen Ti-6Al-4V malzemelerin SEM görüntüleri tel erozyon tezgahı ile işlenen ve SEM görüntüleri (Şekil 9. ve Şekil 10) alınan Ti-6Al-4V malzeme için dairesel ve kare kesitli işlemelerde yüzey kalitesi bakımından bir farklılık görülmemektedir. Burada tel erozyon prosesinin geometriden bağımsız proses parametreleri ve iş parçası malzeme parametrelerinin etkin olduğu anlaşılmaktadır. Tel erozyon işlem parametreleri SF, MAO ve WP'nin farklı değerleri ile yapılan deneysel çalışmada tel erozyon yüzeylerinde SF değerinin artışıyla mikro çatlak oluşumunun arttığı gözlemlenmektedir. Ayrıca artan SF değeri ile iş parçası yüzeyinde oluşan beyaz katmanın daha küresel formlar aldığı görülmektedir.



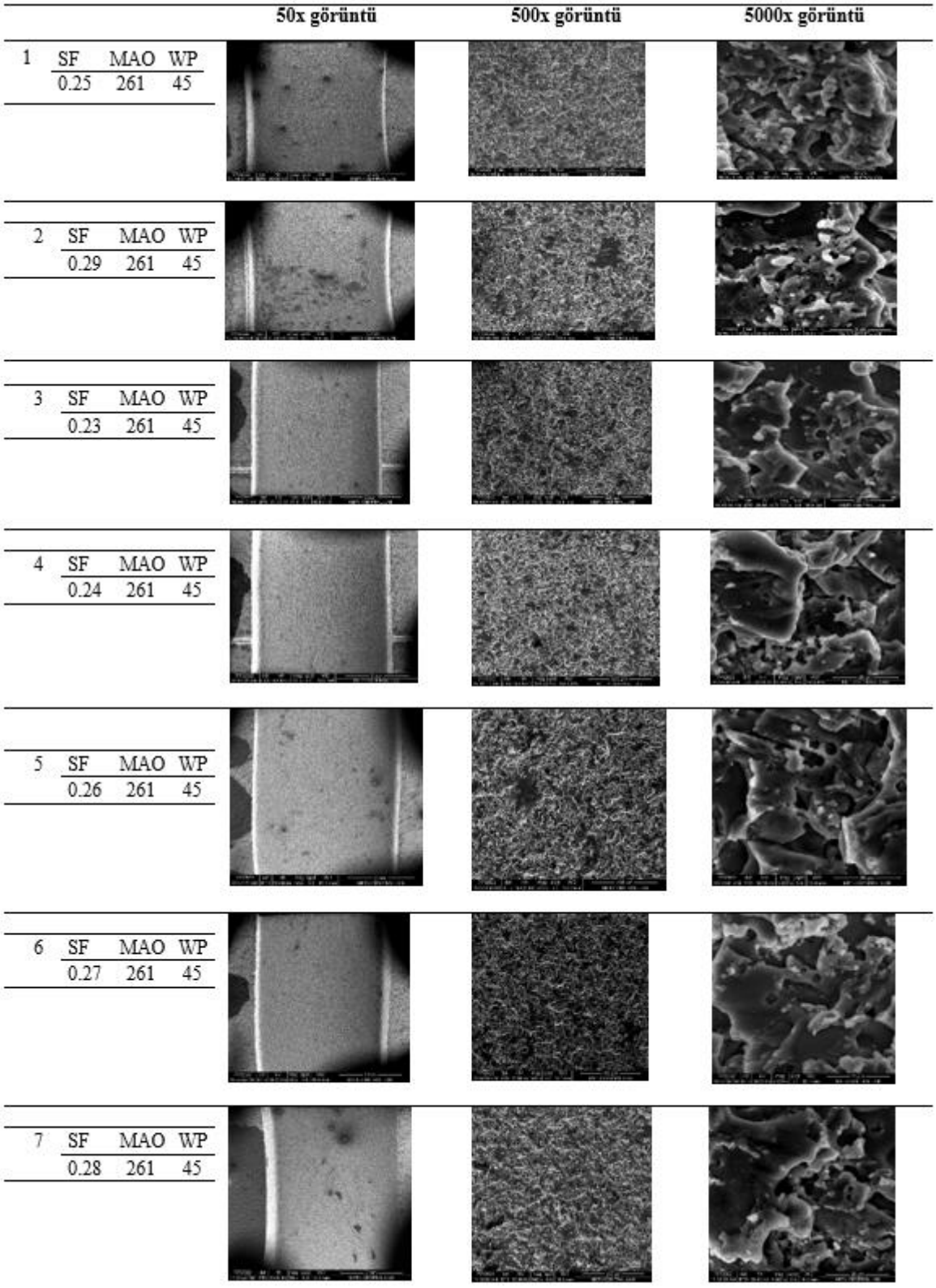
Şekil 9. Tel erozyon ile 8 mm çapında delinen işleme yüzeyi Ti-6Al-4V



Şekil 10. Tel erozyon ile 5x5 mm kare form işleme yüzeyi Ti-6Al-4V

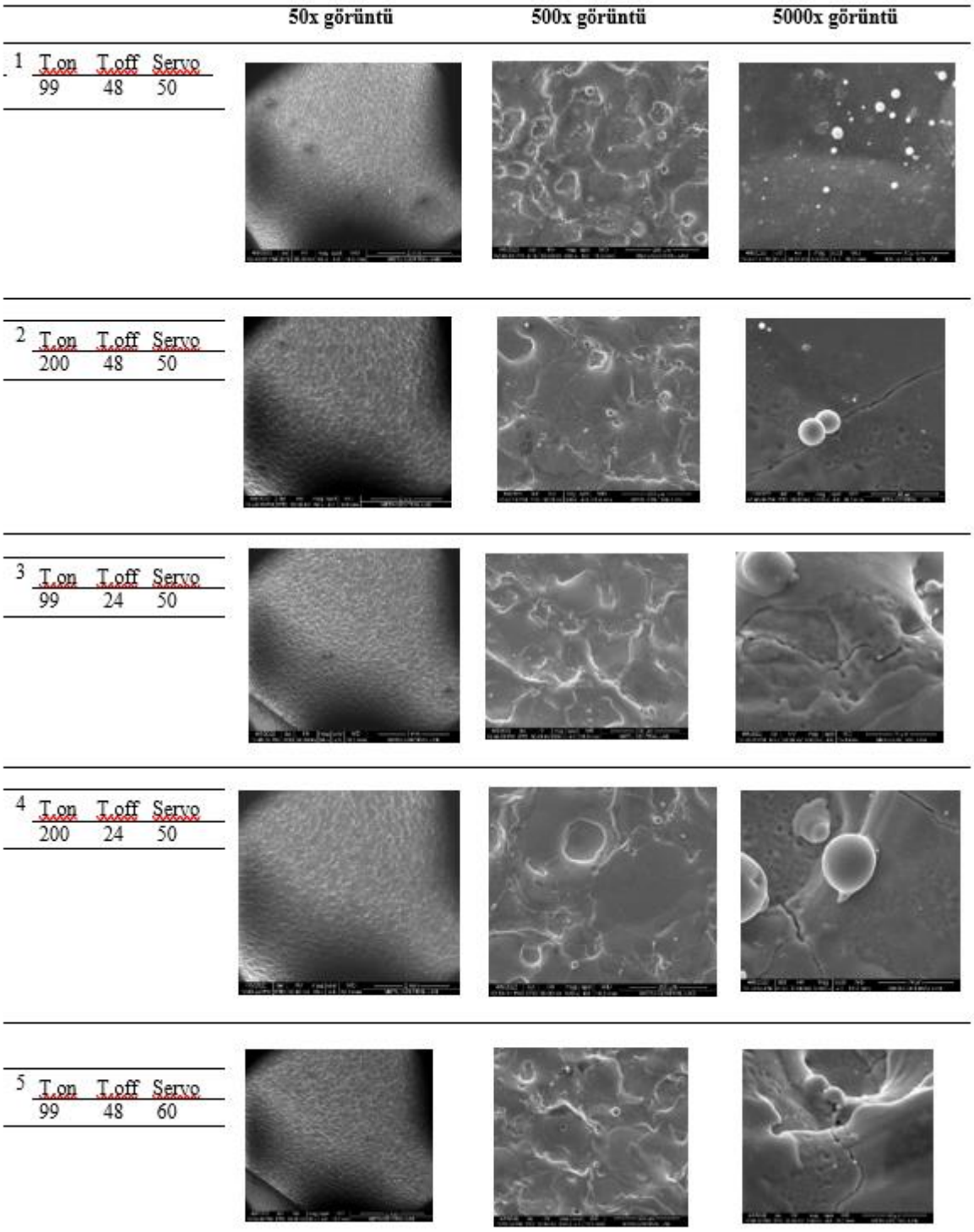
Şekil 9, 10,11,12 ve 13' de tel ve dalma erozyonda işlenen Titanyum ve Inconel malzemelerin SEM'de 50x, 500x ve 5000x büyütülerek elde edilmiş görselleri yer almaktadır.

Tel erozyon ve dalma erozyon işleminde Inconel 718 ve Ti-6Al-4V malzemelerinin 8 mm çapında işlenen delik (Şekil 9 ve Şekil 12) ve 5x5 mm kare form (Şekil 10 ve Şekil 11) için SEM görüntüleri incelenmiş ve yüzey kalitesinin işleme geometrisiyle ilişkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. SF değerinin artmasıyla yüzeyde az da olsa mikro çatlak oluşumunun arttığı gözlemlenmiştir. Yine SF değerinin artmasıyla yüzey daha yayvan hale gelmiş ve beyaz katmanda oluşan baloncukların büyüdüğü ve yüzeye yayıldığı gözlemlenmiştir.



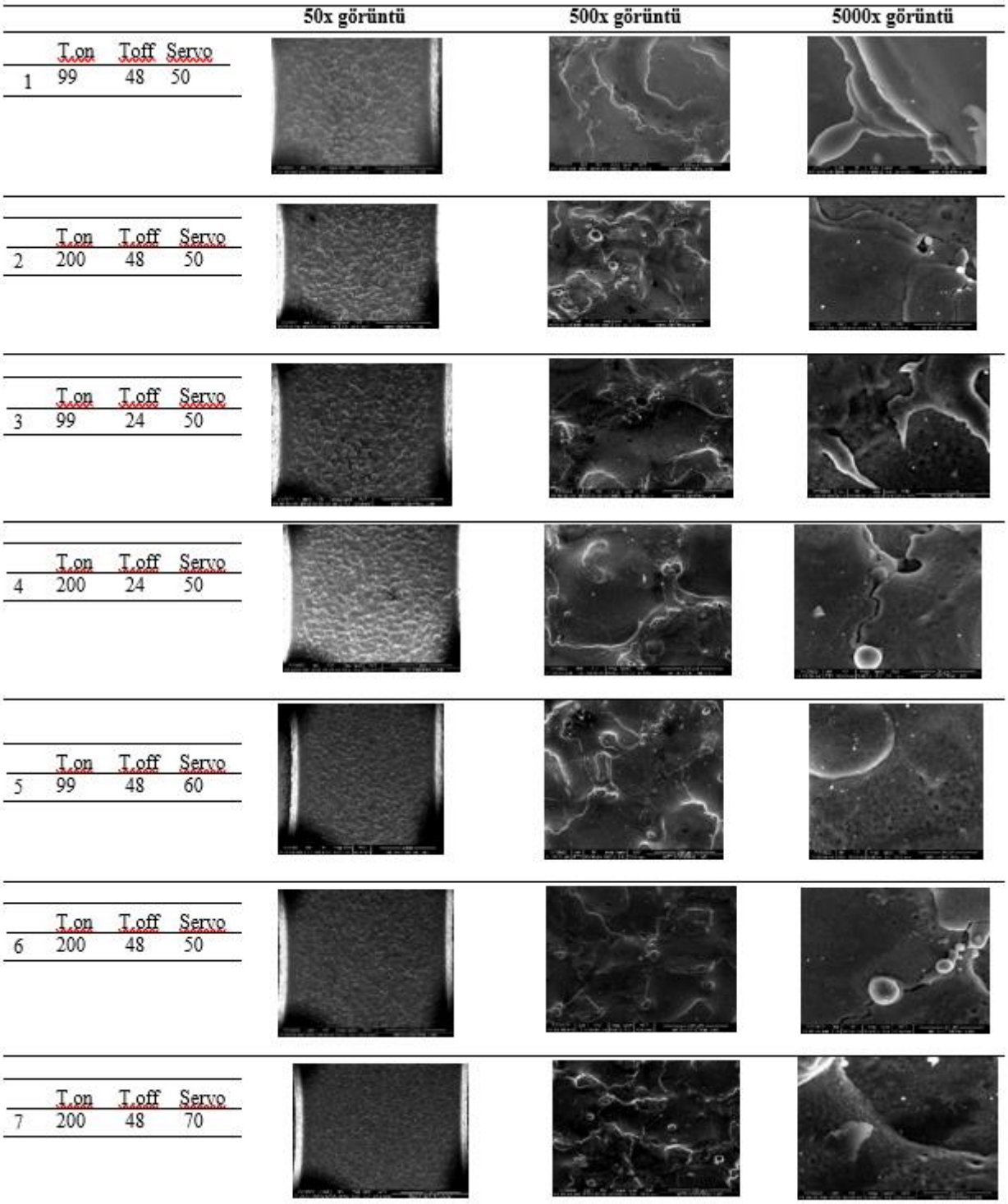
Şekil 11. Dalma erozyon ile 4x4 mm kare delik işleme yüzeyi Inconel 718

Dalma erozyon ile Inconel 718 malzeme için işleme sonucunda elde edilen SEM görüntüleri incelemesinde silindirik veya kare kesitli bir geometrinin işlenmesinin yüzey kalitesi bakımından bazı farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Silindirik geometrili elektrot ile işlemede küresel baloncuk oluşumunun kare kesitli elektrota göre daha fazla oluştuğu ve yine silindirik kesitli elektrot ile işlenen yüzeyde mikro çatlak oluşumunun kare kesitli elektrota göre daha fazla olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 12. Dalma erozyon ile 8 mm delik işleme yüzeyi Inconel 718

Dalma erozyon Inconel 718 işlemelerinde EDM (Electrical discharge machining) parametrelerinden Ton ve Toff'un Servo'ya oranla daha etkili olduğu görülmektedir. Ton'daki artış mikro çatlak oluşumunu arttırırken, Toff'un artışı çatlak oluşumunu etkilemezken çatlak boyutunu azaltma yönündedir. Dalma erozyon yüzeyi tel erozyon yüzeyine oranla çok daha yayvan ve düzgün bir dağılıma sahip olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 13. Dalma erozyon ile 5x5 mm kare form işleme yüzeyi Inconel 718

5.Sonuçlar

Deneysel olarak çalışılan, Ti-6Al-4V ve Inconel 718 malzemelerinin dalma ve tel erozyon işleme davranışlarının yüzey inceleme sonuçları şu şekildedir;

- Geleneksel yöntemler ile işlenmesi zor her iki malzeme de tel ve dalma erozyon yöntemleri ile işlenebilmiştir.
- Üstün özellikli malzemeler olarak bilinen Ti-6Al-4V ve Inconel 718 malzemelerinin EDM işleme sırasında oluşan yüzey hatalarının azaltılması için uygun EDM parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır.
- Ti-6Al-4V malzeme için yüzey kalitesinin uygun ve çatlakların azaltılması için SF değerinin düşürülmesi önerilmektedir.
- Aynı şekilde Inconel 718 malzemenin tel erozyon performansının artırılması için SF değerinin düşük seçilmesi önerilmektedir.
- Dalma erozyon parametreleri bakımından Ton ve Toff'un Servo'ya oranla daha etkin bir parametre olduğu tespit edilmiştir.
- Inconel 718 malzemenin dalma erozyon işlemesinde Ton parametresinin düşük Toff parametresinin biraz daha yüksek olması önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası 2019-054.

Referanslar

Ay, M., Aydoğdu, D., (2010) " Tel erozyonda kesme parametrelerinin parçanın boyut ölçüsüne etkilerinin deneysel incelenmesi" Makine Teknolojileri Dergisi Cilt: 7, No: 13, (31-44)

Beri, N. , Maheshwari, S. , Sharma, C. , Kumar, A., (2014) "Surface Quality Modification Using Powder Metallurgy Processed CuW Electrode During Electric Discharge Machining of Inconel 718" Procedia Materials Science 5:2629-2634

Bircelik,2022, https://bircelik.com/tr/kategori/Inconel-718 (15.08.2022)

Bircelik,2022, https://bircelik.com/tr/kategori/titanyum-grade-5 (15.08.2022)

Çaydaş, U. , Hasçalık, A., (2004) "Tel Erozyon Yönteminde Işlem Parametrelerinin Malzemenin Mikroyapı ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi" Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Çaydaş, Ulaş(2008). Ti6Al4V alaşımının elektro erozyon ve elektro kimyasal işleme yöntemleriyle işlenebilirliğinin araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, 2008.

Elektroerozyon,2022 https://tr.wikipedia.org/wiki/Elektroerozyon (16.08.2022)

Erdem, O., Coğun, C., Ultekin, L., Ozerkan, H.B., Uslan, İ., (2016) "Toz katkılı ve ısıtılmış dielektriğin elektro erozyon ile işlemede (EEİ) delk delme performansı üzerine etkisi" Mimarlık Fakültesi Dergisi 31,3,531-544

Fıratkocortodonti, 2022, https://firatkocortodonti.com/titanyum-nedir (15.08.2022)

Göv, K., (2017) " Havacılık ve uzay malzemelerinde soğutma sıvısının elektro erozyonla delinen deliklerin performans parametrelerine etkisinin deneysel incelenmesi", Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 32,1,293-301

Gülcan, O. , Uslan, İ. , Usta, Y. , Çoğun, C., (2015) "Elektro Erozyon İle İşlemede Cu-Cr T/M Elektrot Kullanımının İşleme Performansına Etkisi" Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 30, 3

Gürbüz, H., Baday, Ş., Hamarat, İ., (2019) " Cnc tel elektro erozyon tezgâhında işleme hızı üzerine elektrot malzemesinin, soğutma tipinin ve iş parçası malzemesinin etkisinin araştırılması " Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi , Cilt: 24, Sayı :1

Joudivand Sarand, M. H. , Shabgard, M. R., (2015) "Investigation of the effect of thermal diffusivity coefficient of tool material on electrode-tool wear in the EDM process" Archives of Civil and Mechanical Engineering volume 15, pages806–821

Kuş, A. , Motorcu, A.R., (2017) "Nikel esaslı waspaloy alaşımının tel erozyon yöntemiyle işlenmesinde taguchi metodu ile yüzey pürüzlülüğü için optimum kesme parametrelerinin tahmini " Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 32, 1, 0-0

Kuş, A. , Motorcu, A., (2016) "Wire Electrical Discharge Machining of a Hybrid Composite: Evaluation of Kerf Width and Surface Roughness" Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi 21, 1, 243-258

Li, L., Guo, Y.B., Wei, X.T., Li, W., (2013) " Surface integrity characteristics in wire-EDM of Inconel 718 at different discharge energy " Sciverse Science Direct, 6,220-225

Makinaegitim,2022 https://www.makinaegitimi.com/elektro-erozyon-nedir (16.08.2022)

Okka, M.A., Yılmaz, O., (2009) "Uzay ve Havacılık Malzemelerinde Elektriksel Erozyon ile Hızlı Deli Delme Performansının Deneysel İncelenmesi" 5.Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi Cilt: 51, Sayı: 608

Özek, C., Özel, C., (2003) "Tel erezyon tezgahında Ç8620 dişli çeliğinin kesilme davranışlarının araştırılması" Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi 5,2,47-52

Özerkan, H. B., (2019) "Experimental fatigue life determination of thermo-diffusion surface boronized of AISI 1040 steel " Journal of Mechanical Science and Technology, Cilt: 33, Sayı:10 ,(4957-4962)
SEM,2022 https://tr.wikipedia.org/wiki/Taramal%C4%B1_elektron_mikroskobu (16.08.2022)
Singh, S. , Bhardwaj, A.,(2011) "Review to EDM by Using Water and Powder-Mixed Dielectric Fluid" Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering 10(02):199-230

Srivastava, Vineet, and Pulak M. Pandey.(2014) "Statistical modeling and material removal mechanism of electrical discharge machining process with cryogenically cooled electrode." Procedia Materials Science 5 (2014): 2004-2013.

Tao, J., Shih, A.J. and Ni, J., 2008. Near-dry EDM milling of mirror-like surface finish. International Journal of Electrical Machining, 13(1), pp.29-33.

Tosun, N. , Çoğun, C., (2002) "Tel erozyonda kesme parametrelerinin ilerleme hızına etkisi" Dizin Dergisi 43, 515, 16-20

Tosun, N., Coğun, C., (2002), " Tel erozyonda işleme parametrelerinin teldeki aşınma krater boyutlarına etkisinin istatistiksel incelenmesi " Makina Tasarım ve Imalat Dergisi Cilt: 4, Sayı: 3, (127-133)

Yazar, M. , Özdemir, A., (2010) "Eliptik Düz Dişlilerin Bilgisayar Destekli Tasarımı ve CNC Tel Erozyon ile İmalatı" Politeknik Dergisi 13, 4, 245-253

Yıldız, Yakup. Soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının elektro erozyon işleme performansına etkileri. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, 2010.

Yurtkuran, E. , Sur, G. , Gürün, H. , Çinici, H. , Polat, R., (2011) "Alüminyum Esaslı T/M Malzemelerin Tel Elektro Erozyon Tezgahında İşlenebilirliklerinin Araştırılması" Konferans: 6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'11)

MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

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

UMAGD, (2023) 15(3), 16-27.

10.29137/umagd.1294273

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:03 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue

Araştırma Makalesi / Research Article

İstatiksel Kodlama Yöntemlerinin Türkçe ve İngilizce Metinlerde Sıkıştırma Başarımı Karşılaştırma Örneği

A Comparison of Text Compression Performance of Statistical Coding Methods in Turkish and English

İbrahim Öztürk[1], **Hakan Celil Kaya** [2]

[1,2]*Osmaniye Korkut Ata University,Department of Electrical and Electronics Engineering,Osmaniye,TURKEY*

***Başvuru/Received**: 09/05/2023* ***Kabul / Accepted**: 12/07/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Öz

Veri sıkıştırma, dijital ortamda bulunan verilerin hafızada olduğundan daha az yer kaplayabilmesi için yapılan işlem adımları bütünüdür. Bu işlemler dosya türlerine göre değişen az ya da çok tekrar eden veri öbeklerinden yararlanarak gerçekleştirilir. Sıkıştırma hafızanın ve veri iletişim hattının taşıma kapasitesini daha verimli kullanımına olanak sağlamaktadır. Sıkıştırma teknikleri kayıplı ve kayıpsız olarak iki gruba ayrılmaktadırlar. Bu çalışmada sıkıştırma için istatiksel kodlamayı kullanan Huffman, Shannon-Fano ve Aritmetik kodlama yöntemlerinin İngilizce ve Türkçe metinler üzerindeki başarımları karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılmak üzere İngilizce için Calgary külliyatı içerisinde bulunan metin tabanlı dosyalar, Türkçe için gazetelerde yayımlanmış köşe yazılarından derlemeler yapılmıştır. Sonuçlar Aritmetik kodlamanın tasarruf oranı ölçütüne göre İngilizce metin dosyaları ortalaması %37,92, Türkçe metin dosyaları ortalaması %36,66 ile en yüksek başarımı sağladığı göstermektedir. Huffman kodlaması iki dil için sıkıştırma-açma işlemlerinde en hızlı sonucu vermiştir. İngilizce metin dosyalarının toplam sıkıştırma süresi 2,303 s, açma işlemi 2,988 s sürmüştür. Türkçe metin dosyalarının toplam sıkıştırma için geçen süre 8,142 s, açma işlemi de 10,555 s olarak ölçülmüştür. Kodlamalarda diller arasında sıkıştırma ve açma süreleri açısından başarım farkı görülmemiştir. İngilizce içerikli dosyaların ikisinde en düşük BPC değerini Huffman kodlaması verirken diğer dosyalarda Aritmetik kodlama vermiştir. Türkçe içerikli dosyaların tamamında en düşük BPC değerini Aritmetik kodlama vermiştir.

Anahtar Kelimeler

"Veri sıkıştırma, İstatiksel kodlama, Huffman kodlama, Shannon-Fano kodlama, Aritmetik kodlama"

Abstract

Data compression is a set of process steps performed to make data in the digital environment take up less space than in memory. These operations are performed using more or less repetitive data phrases that vary according to file types. Compression allows more efficient use of memory and data communication capacity. Compression techniques are divided into two types: lossy and lossless. In this study, the performance of Huffman, Shannon-Fano and Arithmetic coding methods based on statistical coding for compression is compared on English and Turkish texts. Text-based files from the Calgary corpus were used for English and newspaper columns for Turkish. The results show that arithmetic coding achieves the highest performance with an average of 37.92% for English text files and 36.66% for Turkish text files according to the saving rate criterion. Huffman coding gave the fastest compression-decompression results in both languages. The total compression time for English text files was 2.303 s and decompression took 2.988 s. For Turkish text files, the total compression time was 8.142 s and decompression time was 10.555 s. There was no performance difference between the languages in terms of compression and decompression times. Huffman coding produced the weakest BPC value in two English files, while Arithmetic coding produced the lowest BPC value in the other files. Arithmetic coding gave the lowest BPC value in all Turkish files.

Key Words

"Data compression, Statistical coding, Huffman coding, Shannon-Fano coding, Arithmetic coding"

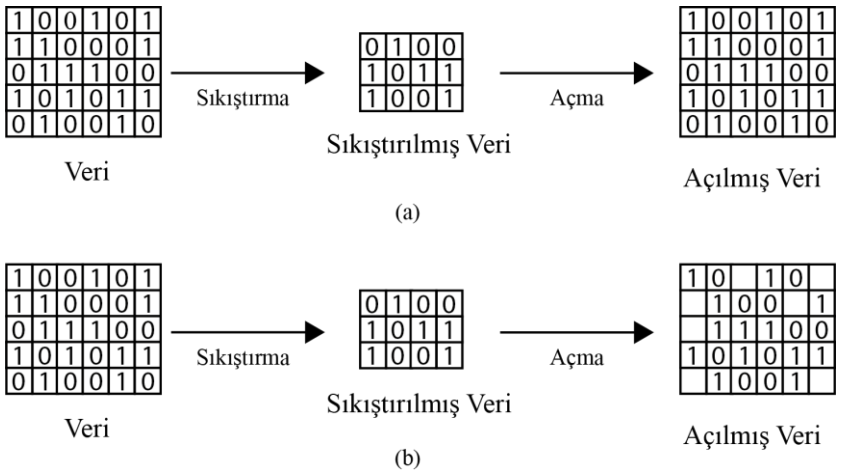
***Sorumlu Yazar: ibrahimozturk@osmaniye.edu.tr**

1. Giriş

Veri sıkıştırma, veriyi olduğundan daha az sayıda bit ile ifade etmektir (Çölkesen, 2021). Günümüzde birçok uygulama ve sistem, büyük miktarda veri işleme gereksinimine ihtiyaç duymaktadır. Verilerin daha az depolama alanı kullanacak şekilde sıkıştırılması, kaynakların verimli kullanılması açısından önem arz etmektedir. Ancak, sıkıştırma işleminin dezavantajları da bulunmaktadır. Sıkıştırma ve açma işlemleri, ilave işlem gücü gereksinimlerine ve gecikmelerine neden olmaktadır. Ayrıca, açma işlemi sırasında meydana gelebilecek veri kayıplarının tespiti ve onarımı sistem kaynaklarına ek yük de getirmektedir.

Sıkıştırma teknikleri kayıplı (lossless) ve kayıpsız (lossy) olarak iki ana gruba ayrılmaktadır (Öztürk & Mesut, 2021). Kayıplı sıkıştırma veri kaybının tolere edilebildiği durumlarda kullanılırken kayıpsız sıkıştırma ise tek bir bitin bile kaybolmasının veya değişmesinin göze alınamayacağı altyapılarda kullanılmaktadır. Kayıplı sıkıştırmada veri kaybı kabul edilebilir seviyelerde tutulurken sıkıştırma oranının arttırılması hedeflenmektedir (Ince et al., 2022). Video, ses ve fotoğraf gibi veri kaybının olası etkisinin daha az olduğu durumlarda genellikle kayıplı sıkıştırma yöntemleri kullanılmaktadır. Program kaynak dosyaları, metin dosyaları ve veri tabanı gibi hassas verilerin saklandığı durumlarda ise genellikle kayıpsız sıkıştırma yöntemleri tercih edilmektedir.

Kayıpsız sıkıştırma yöntemi, veri sıkıştırma işlemi sırasında hiçbir veri kaybına neden olmadığı için sıkıştırılmış veri açıldığında tam olarak orijinal veri tekrar elde edilebilmektedir. Şekil 1.a üzerinde bu durum gösterilmektedir. Diğer yandan, kayıplı veri sıkıştırma yöntemi veri sıkıştırılırken bazı veri kayıplarına neden olabilmektedir. Bu durumda sıkıştırılmış veri açıldığında orijinal verinin tamamı elde edilememektedir. Şekil 1.b üzerinde bu durum gösterilmektedir.



Şekil 1. Veri sıkıştırmanın **(a)** kayıpsız **(b)** kayıplı sıkıştırma üzerinden gösterimi.

Kayıpsız sıkıştırma yöntemleri sözlük tabanlı kodlama ve istatistiksel kodlama olarak ikiye ayrılmaktadır (Mesut, 2006). Sözlük tabanlı kodlama, sıkıştırılacak olan verinin içerisinde tekrar eden karakter veya karakter öbeklerinin belirlenmesiyle başlar. Daha sonra bu öbeklerden ve bunları ifade eden kod kelimelerinden (code word) oluşan bir sözlük oluşturulur. Ardından verideki öbekler, sözlükteki belirlenen kod kelimesi ile ifade edilerek kodlama gerçekleştirilir. Sözlük tabanlı kodlamada sık tekrar eden karakter öbeklerini içeren verilerin sıkıştırılması, daha düzensiz karakter öbekleri içeren verilerden daha başarılıdır (Sayood, 2006). Sözlük tabanlı kodlama yöntemlerinden bazıları LZ77 (Ziv & Lempel, 1977), LZ78 (Ziv & Lempel, 1978), LZSS (Storer & Szymanski, 1982) ve LZW (Lempel-Ziv-Welch) (Welch, 1984) olarak sıralanabilecektir.

İstatiksel kodlama yönteminde, verilerin içerisindeki karakter veya karakter öbekleri veri içerisinde kullanım olasılıkları belirlenerek kodlama gerçekleştirilir. Bu çalışmada Türkçe ve İngilizce metinlerdeki sıkıştırma başarımlarını karşılaştırmak için istatiksel kodlamayı kullanan Huffman (Huffman, 1952), Shannon-Fano (Shannon, 1948) ve Aritmetik kodlama (Abramson, 1963; Witten et al., 1987) kullanılmaktadır.

Çalışmanın Materyal ve Metot bölümünde derlenen metin dosyalarının ayrıntıları, kullanılan programlama dili ve yazılan programların çalıştırıldığı bilgisayarın özellikleri tanıtılmıştır. Huffman, Shannon-Fano ve Aritmetik kodlama yöntemlerine ek olarak karşılaştırma ölçütleri ve ölçütlerin seçilme amaçları irdelenmiştir. Yapılan ölçüm ve hesaplamalar Bulgular başlığı altında görselleştirilerek Sonuçlar kısmında değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada kullanılmak üzere İngilizce için Tablo 1'de özellikleri verilen Calgary külliyatından bibliyografi, kitap, haber ve makale içerikli dosyalar (Bell et al., 1989), Türkçe için Tablo 2' de özellikleri verilen farklı alanlardaki on farklı yazarın spor, ekonomi, siyaset ve edebiyat içerikli köşe yazılarından derleme yapılmıştır (Github, 2023). Farklı karakter sayısı, bir metindeki benzersiz karakterlerin sayısını ifade etmektedir. Sıkıştırılacak metindeki bu farklı karakter sayısı, sıkıştırma için önemli bir ölçüt olup sıkıştırılmış veri boyutunu önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Sayood, 2006). Dosyalarda kullanılan farklı karakter sayı ortalaması İngilizce 88, Türkçe'de ise 102'dir. Kullanılan veride her iki dil için onar adet dosya mevcut olup toplam dosya boyutu

İngilizce için 2,01 MB, Türkçe için 7,7 MB'dır. Çalışmalar Python dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Github, 2023). Bütün testler ve ölçümler Core i5-1135G7 @2.40 GHz işlemci, 8 GB Ram, Nvme SSD'ye sahip dizüstü bilgisayarda yapılmıştır.

Tablo 1. Calgary külliyatındaki İngilizce içerikli dosyalara ait özellikler

Dosya Adı	Dosya Boyutu (Byte)	Karakter Sayısı	Farklı Karakter Sayısı
bib	111.261	104.981	80
book1	768.771	752.149	81
book2	610.856	595.222	95
news	377.109	367.050	97
paper1	53.161	51.911	94
paper2	82.199	80.468	90
paper3	46.526	45.426	83
paper4	13.286	12.992	79
paper5	11.954	11.634	90
paper6	38.105	37.086	92

Tablo 2. Köşe yazılarından derlenen Türkçe içerikli dosyalara ait özellikler

Dosya Adı	Dosya Boyutu (Byte)	Karakter Sayısı	Farklı Karakter Sayısı
yazar1	747.412	671.671	103
yazar2	584.588	529.554	97
yazar3	860.366	782.918	102
yazar4	608.155	550.021	108
yazar5	834.856	757.877	99
yazar6	787.361	715.794	104
yazar7	557.230	503.906	107
yazar8	1.451.909	1.319.568	97
yazar9	1.058.118	959.438	104
yazar10	590.482	532.234	98

2.1. İstatiksel kodlama

ASCII (American Standard Code for Information Interchange - Bilgi Alışverişi için Standart Amerikan Kodu) bilgisayarda karakterleri ifade etmek için kullanılan kodlama standardıdır. Bu standartta kullanım sıklığından bağımsız olarak bütün karakterlerin kod kelimesi uzunluğu 8 bittir. İstatistiksel kodlamada veri içerisindeki yüksek olasılıklı karakter veya karakter öbeklerini daha kısa; düşük olasılıklı olanı daha uzun kod kelimesi kullanarak temsil edilmektedir (Öztürk & Mesut, 2021). Kullanım sıklığı belirlenmesi statik ve dinamik olmak üzere iki şekilde belirlenir. Statik olan yöntem kullanılan dilin karakteristik yapısına göre harflerin kullanım sıklıklarının her durumda aynı olduğu ön kabulüne dayanır. Tablo 3 üzerinde İngilizce ve Türkçe alfabelerde yer alan harflerin kullanım sıklığı alfabetik sırayla verilmiştir. Dinamik yöntemde ise veri dizisinde kullanılan harflerin kullanım sıklıkları ölçülerek her veri dizisine özgü olarak tekrardan hesaplanmaktadır (Diri, 1999). Bu yöntem dahilinde kodlanan veriye ek olarak sıkıştırılmış dosyanın içerisine sıkıştırılmış veriyi açma işlemi esnasında kullanılmak üzere harflerin kullanım sıklıkları da eklenmelidir.

Tablo 3. Türkçe ve İngilizce dillerinde harflerin kullanım sıklığı (Çelikel Çankaya et al., 2010; Güneş & Işık, 2018)

Harf	İngilizce	Türkçe	Harf	İngilizce	Türkçe
A	8,17%	13,26%	N	6,75%	4,92%
B	1,49%	2,10%	O	7,50%	2,17%
C	2,78%	1,16%	Ö	-	0,83%

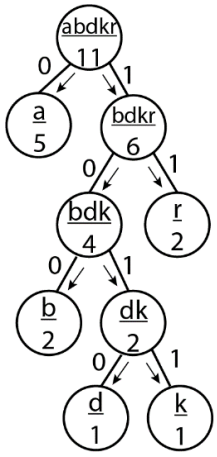
Tablo 3 (devam). Türkçe ve İngilizce dillerinde harflerin kullanım sıklığı (Çelikel Çankaya et al., 2010; Güneş & Işık, 2018)

Harf	İngilizce	Türkçe	Harf	İngilizce	Türkçe
Ç	-	1,38%	P	1,93%	1,23%
D	4,25%	2,46%	Q	0,10%	-
E	12,70%	8,96%	R	5,99%	5,51%
F	2,23%	0,81%	S	6,33%	3,37%
G	2,02%	1,46%	Ş	-	1,92%
Ğ	-	0,89%	T	9,06%	4,50%
H	6,09%	1,21%	U	2,76%	2,92%
I	6,97%	4,46%	Ü	-	2,03%
İ	-	6,59%	V	0,98%	0,99%
J	0,15%	0,09%	W	2,36%	-
K	0,77%	7,88%	X	0,15%	-
L	4,03%	6,51%	Y	1,97%	2,52%
M	2,41%	6,06%	Z	0,07%	1,81%

2.2. Huffman kodlama

David Huffman tarafından 1952 yılında geliştirilmiştir. Huffman kodlama GZIP, JPEG veya MPEG gibi sık tercih edilen sıkıştırma yöntemlerinin işlem basamaklarında kullanılır (Mesut, 2006). Kodlama işlemi veri dizisi içindeki karakterlerin kullanım sıklığına bağlı olarak oluşturulan Huffman ağacından, karakterler için tanımlanmış kod kelimesinin karakter yerine kullanılmasıdır. Veri dizisindeki karakter sayısına ve karakterlerin kullanım sıklıklarına bağlı olarak Huffman kodlaması %10 ile %90 oranında sıkıştırma başarımı sağlayabilmektedir. (Güzeldereli, 2012).

Örnek "abrakadabra" veri dizisinde "a" karakteri 5, "b" karakteri 2, "r " karakteri 2, "k" karakteri 1 ve "d" karakteri 1 defa kullanılmıştır. Bu değerler karakterlerin kullanım sıklığı tablosunu oluşturmaktadır. Bundan sonra hangi karakterin hangi kod kelimesi ile ifade edileceğini belirlemek için Şekil 2'de gösterildiği üzere Huffman ağacı oluşturulacaktır (Bulut, 2016). Huffman ağacını en düşük kullanım sıklığına sahip iki karakter olan [d,1] ve [k,1] karakterleri birleştirilip kullanım sıklığı toplanacaktır. Oluşan [dk,2] tabloda yerini alacaktır. Tabloda eklenen-çıkan karakterler ve değerleri ile sıralama değişmiş olacaktır. Tekrar tablodaki en düşük kullanım sıklığına sahip olan [b,2] ile [dk,2] birleştirilerek [bdk,4] tabloya eklenecektir. Bu işlemler tablodaki tek karakter kalana kadar devem edecek ve benzetim olarak Şekil 2'de gösterilen ağaca benzeyen yapı meydana gelmiş olacaktır.



Şekil 2. Huffman ağacıyla kodlama aşamalarının gösterimi

İlk oluşturulan kullanım sıklığı tablosundaki karakterler için kod kelimesinin belirlenmesi Huffman ağacından yukarıdan aşağıya doğru olmak üzere sağa ve sola ilerleyerek belirlenir. Sağa doğru giden dallar "1" ile işaretlenirken sola gidenler "0" ile işaretlenir (Oral & Aşşık, 2019). Her bir karaktere ulaşmak için geçilen dallar üzerindeki değerler birleştirilerek o karakterin kod kelimesi tanımlanmış olacaktır. Şekil 2'de belirtilen oklar takip edilerek 'a' karakteri "0", b karakterini "100", r karakterini "11", k karakterini "1011" ve d karakterinin de "1010" olacak şekilde kod kelimeleri belirlenmiş olacaktır.

2.3. Shannon-Fano kodlama

1940 yılında C. Shannon ve R. M. Fano tarafından ortaya konulmuştur. Huffman kodlamaya benzerlikler gösterse de işlem basamakları farklıdır. Ağaca benzer yapı yerine kodlanacak olan veri dizisinde kullanılan karakterlerin kullanım sıklıkları/oranı

azalan sırada olacak şekilde tablo oluşturulur (Çölkesen, 2021). Daha sonra oluşturulan tablo kullanım sıklıkları toplamı eşit ya da eşite en yakın olan yerden ikiye ayrılır. Üst grupta kalan karakterler "0" alt grupta kalan karakterler için kod kelimesine "1" eklenir. Daha sonra grupların elemanları birden fazla ise tekrar bölünür. Aynı şekilde üst gruptaki karakterlerin kod kelimesine "0", alt grupta kalan karakterlere "1" eklenir. Bu işleme gruplarda tek karakter kalana kadar devam edilir (Çölkesen, 2021; Diri, 1999). İşlem sonunda aşağıdan yukarı doğru her karakter için kod kelimeleri belirlenmiş olacaktır. Örnek olarak yine "abrakadabra" veri dizisi üzerinden devam edilecektir. Tablo 4 üzerinde gösterilen kullanım sıklıklarına göre ilk adımda olasılık toplamları tablonun eşit ya da eşite en yakın yer olan 0,45 ile 0,55 arasında yani "a" ile "b" arasında tablo ikiye ayrılacaktır. Üst grupta kalan "a" karakteri için kod kelimesi "0" olarak belirlenirken alt tarafta kalan gruptaki kod kelimeleri "b","r","k" ve "d" ye "1" eklenerek kodlamaya devam edilir. 2. adımda alt grup tekrar ikiye toplam oranları 0,18 ile 0,36 olacak şekilde "b" ile "r" arasından ikiye ayrılır. Üstte kalan "b" için "0" eklenerek kod kelimesi "10" olarak belirlenmiş olacaktır. Altta kalan gruptaki harflerin kod kelimelerine "1" eklenerek kodlamaya devam edilir. Kodlamaya 4. adımdan sonra Tablo 4 üzerinde gösterildiği üzere "a" karakteri "0", "b" karakteri "10", "r" karakteri "110", "k" karakteri "1100" ve "d" karakteri "1111" kod kelimesiyle ifade edilebilecektir.

Tablo 4. Shannon-Fano kodlamasının işlem basamaklarının gösterimi

Karakter	Olasılık	1. adım		2. adım		3. adım		4. adım		Kod Kelimesi
		Kod	Olasılık	Kod	Olasılık	Kod	Olasılık	Kod	Olasılık	
a	5/11=0,45	0	*0,45*							0
b	2/11=0,18	1		0	*0,18*					10
r	2/11=0,18	1	*0,55*	1		0	*0,18*			110
k	1/11=0,09	1		1	*0,36*	1	*0,18*	0	*0,09*	1110
d	1/11=0,09	1		1		1		1	*0,09*	1111

2.4. Aritmetik kodlama

Aritmetik kodlama, veri dizisi içerisindeki karakterlerin kullanım olasılıklarını kullanarak kodlanacak veri dizisini [0,1) sınırlar içerisinde gerçek bir sayı tarafından gösterilmesine dayanmaktadır (Çölkesen, 2021). Veri dizisindeki her bir karakter bu veri aralığını daraltır. Aralık daraldıkça veriyi ifade eden bit sayısı da artacaktır (Aktaner, 1995). Kullanım sıklığı yüksek olan karakterler ise aralığı daha az daralttığından onu gösteren bit sayısı da azalır. Dolayısıyla tekrar eden karakterler ne kadar çok ise veri dizisi de çok daha az bit ile kodlanabilecektir (Çölkesen, 2021; Mesut, 2006). Aritmetik kodlamada, veri dizisinin diğer dizilerden ayrılması için, her veri dizisinin benzersiz belirleyici ile ifade edilmesi gerekir. Bu belirleyici ise işlemlerin sonucunda hesaplanır ve etiket (tag) olarak adlandırılır (Mesut, 2006).

Örnek "abrakadabra" veri dizisini beş harfe sahip A=[a, b, r, k, d] alfabesini kullanır. Harflerin A üzerindeki olasılık dağılımları $P(a)$ = 0,45, $P(b)$ = 0,18, $P(r)$ = 0,18, $P(k)$ = 0,09 ve $P(d)$ = 0,09 olarak gösterilebilecektir. Etiketin hesaplanması için öncelikle alt sınırı 0 ile üst sınırı 1 olan sayı aralığı olasılık oranları baz alınarak alfabedeki harf sayısı olan 5 parçaya bölünür. 0 ile 0.45 arası "a", 0.45 ile 0.63 arası "b", ve 0.63 ile 0.81 arası "r", 0.81 ile 0.9 arası "k" ve 0.9 ile 0.99 arası da "d" için tahsis edilir. Kodlama işlemi veri dizisinin ilk karakteri "a" için 0 ile 0.45 aralığı artık yeni alt ve üst sınır olarak belirlenmiş olacaktır. Yeni alt ve üst sınırlara göre olasılık dağılımları baz alınarak tekrar 5 parçaya bölünür. 0 ile 0,2025 arası "a", 0,2025 ile 0,2835 arası "b", 0,2835 ile 0,3645 arası "r", 0,3645 ile 0,405 arası "k" ve 0,405 ile 0,4455 arası da "d" için tahsis edilir. Sıradaki karakter olan "b" için ayrılan alt sınır 0 ile üst sınırı 0,2025 aralığı yeni alt ve üst sınır olarak belirlenecektir. Tablo 5' te gösterilen tüm bu işlemler veri dizisindeki karakterlerin tamamı için sırasıyla gerçekleştirilir.

En son adımda ise alt sınırı 0,116590329711294 olan ve üst sınırı 0,116590400318678'in aritmetik ortalaması alınarak 0,116590365014986 etiket değeri hesaplanır. Bu değerin "0." kısmı hesaplamaya dahil edilmez (Diri, 1999). Onluk sayı sistemindeki 116590365014986 sayısı ikilik sayı sistemine (binary) çevrilerek elde edilen "11010100000100111001111010010100111101111001-010" ile veri dizisi kodlanmış olur.

Tablo 5. Aritmetik kodlamanın işlem basamaklarının gösterimi

Alfabe	Sınırlar	İlk Dağılım	Veri Dizisi										
			a	b	r	a	k	a	d	a	b	r	a
a	Alt	0	**0,0000**	0,0000	0,09112500	…	…	…	…	…	…	…	**0,116590329711294**
	Üst	0,45	**0,2025**	0,0911	0,10752750	…	…	…	…	…	…	…	**0,116590400318678**
b	Alt	0,45	0,2025	**0,0911**	0,10752750	…	…	…	…	…	…	…	0,116590400318678
	Üst	0,63	0,2835	**0,1276**	0,11408850	…	…	…	…	…	…	…	0,116590428561632

Tablo 5 (devam). Aritmetik kodlamanın işlem basamaklarının gösterimi

Alfabe	Sınırlar	İlk Dağılım	Veri Dizisi										
			a	**b**	**r**	**a**	**k**	**a**	**d**	**a**	**b**	**r**	**a**
r	Alt	0,63	0,2835	0,1276	**0,11408850**	…	…	…	…	…	…	…	0,116590428561632
	Üst	0,81	0,3645	0,1640	**0,12064950**	…	…	…	…	…	…	…	0,116590456804585
k	Alt	0,81	0,3645	0,1640	0,12064950	…	…	…	…	…	…	…	0,116590456804585
	Üst	0,9	0,4050	0,1823	0,12393000	…	…	…	…	…	…	…	0,116590470926062
d	Alt	0,9	0,4050	0,1823	0,12393000	…	…	…	…	…	…	…	0,116590470926062
	Üst	0,99	0,4455	0,2005	0,12721050	…	…	…	…	…	…	…	0,116590485047539

Kodlama anlatımlarında kullandığımız 11 karakterden oluşan "abrakadabra" veri dizisi ASCII standardı ile 8*11=88 bit ile gösterilirken Huffman kodlamasıyla 23 bit, Shannon-Fano ile 23 bit ve Aritmetik kodlamayla 47 bitle gösterilebilmiştir. Bu değerler kodlamanın genel başarımını göstermemektedir. Örnek veri dizisi kodlama yöntemlerini açıklarken daha kolay anlaşılması için kısa ve benzer karakterler içermesine dikkat edilmiştir. Veri dizisinin uzunluğu, metindeki benzerlikler ve karakterlerin kullanım sıklıkları kodlamanın başarımını önemli ölçüde etkilemektedir.

3. Başarım Karşılaştırma Ölçütleri

Karşılaştırma ölçütleri dosya boyutundaki tasarruf oranı, sıkıştırma-açma işlemleri için geçen süre, kodlanmış verinin karakter başına düşen bit sayısı ve en iyi sıkıştırma oranına ne oranda yaklaşıldığı temel alınarak seçilmiştir (Bulut, 2016; Mantoro et al., 2017; Rahman & Hamada, 2019; Shanmugasundaram & Lourdusamy, 2011; Stecuła et al., 2022). Başarım karşılaştırma temelinde sıklıkla kullanılan tasarruf oranı, sıkıştırma-açma süreleri, BPC ve entropi ölçütleri takip eden bölümde detaylandırılacaktır.

3.1. Tasarruf oranı

Sıkıştırma sonrası dosyanın hafızada kapladığı alandan dosya boyutuna göre yüzdesel olarak ne oranda tasarruf edildiğini ifade etmektedir. Tasarruf oranı, Denklem 1 kullanılarak hesaplanır.

$$tasarruf\ oranı = \frac{odb - sdb}{odb} * 100 \quad (1)$$

odb: orijinal dosya boyutunu, sdb: sıkıştırılmış dosya boyutunu ifade etmektedir.

3.2. Sıkıştırma-açma süresi

Dosya sıkıştırma ve açma işlemleri esnasında geçen süredir. Açma işleminden sonra verinin kayıpsız bir şekilde elde edildiği kontrol edilmiştir. Bu işlem orijinal dosya ile açılmış dosyanın SHA-256 (Gilbert & Handschuh, 2004) algoritması kullanılarak üretilen değerlerin tutarlılığıyla doğrulanmıştır.

3.3. BPC

Karakter başına düşen bit (Bit per character - BPC), dosyadaki her bir karakteri ifade etmek için karakter başında düşen bit sayısıdır. BPC değerlerinin hesaplanması Denklem 2 üzerinde yapılır. Sıkıştırma yöntemlerinin etkinliğini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Dolayısıyla düşük BPC değeri daha fazla veri tasarrufu sağlandığını ve sıkıştırma işleminin daha verimli olduğunu göstermektedir.

$$BPC = \frac{dosya\ boyutu\ (bit)}{dosyadaki\ karakter\ sayısı} \quad (2)$$

3.4. Entropi (H)

İlk defa 1948'de Claude E. Shannon tarafından tanımlanmıştır. Veri kaynağındaki rastgelelik ölçüsünü gösteren bit sayısını ifade etmektedir (Koşan et al., 2019; Shannon, 1948). Entropi dijital ortamda verinin işlenmesi ve saklanması süreçlerinde önemli bir ölçüt olarak kabul edilmektedir. Rastgele bir değişkenin değerini tahmin etme sürecindeki belirsizliği sayısal olarak ifade etmek için kullanılabilir (Bulut, 2017). Diğer bir ifadeyle entropi değeri en iyi kodlama işlemi sonucunda karakter başına düşebilecek en az bit sayısını vermektedir (Shannon, 1948). Entropi değerlerinin elde edilmesinde Denklem 3 kullanılmaktadır.

$$H = -\sum_{i=1}^{n} P_i \log_2 P_i \quad (3)$$

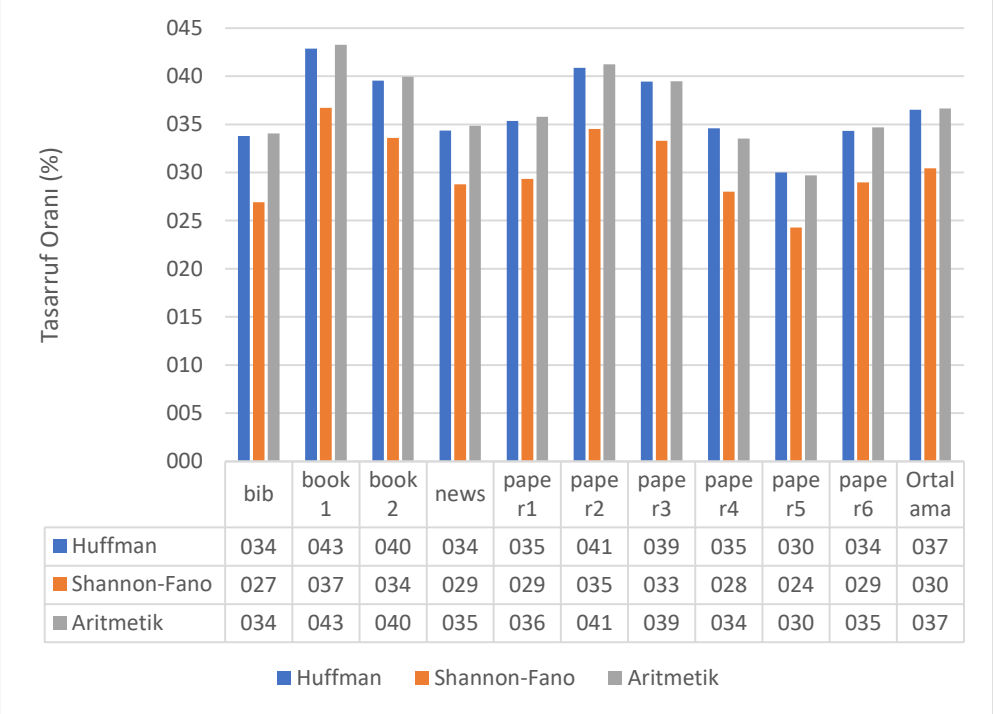
n: verideki toplam farklı karakter sayısı, i: verideki karakter sırası, H: entropi, P_i: i. karakterinin veri içerisinde bulunma olasılığını ifade etmektedir.

4. Bulgular

4.1. Tasarruf oranı

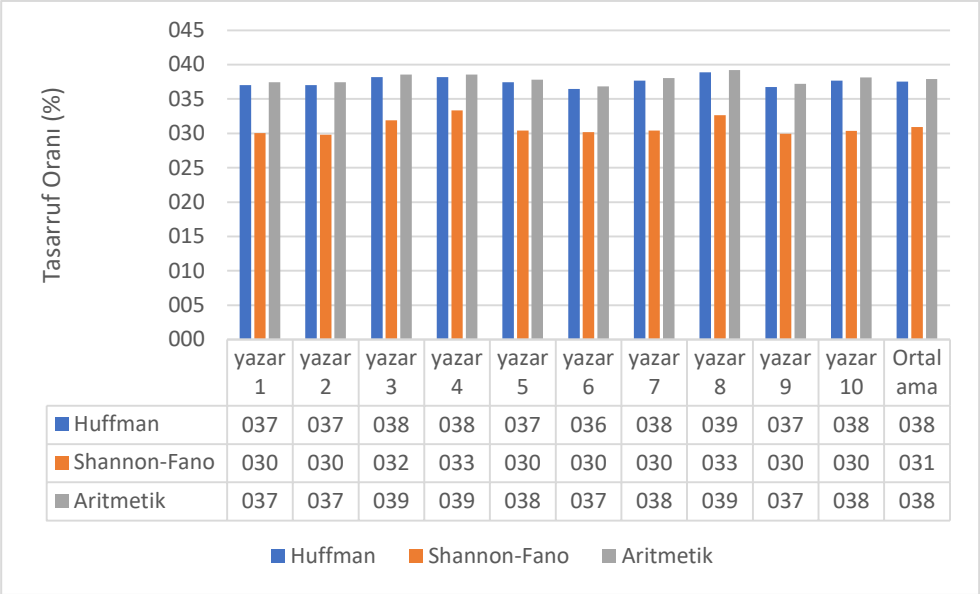
Metin dosyalarında tasarruf oranı hesaplamaları Denklem 1 kullanılarak elde edilmiştir. Tasarruf oranı başarımlarına bakıldığı zaman Huffman kodlama ve Aritmetik kodlamanın çok benzer sonuçlar ürettiği görülmüştür. Shannon-Fano kodlaması ise diğer iki kodlama yöntemine göre daha başarısız sonuçlar vermiştir. Bu durum çalışmada kullanılan her iki dil için de geçerlidir.

Kodlama işlemi ardından sıkıştırılmış İngilizce metin dosyalarının dosya boyutlarının ortalaması alındığında Huffman kodlama %36,51, Shannon-Fano kodlama %30,44, Aritmetik kodlama ile %36,66 oranında tasarruf sağlandığı görülmektedir. Türkçe metin dosyalarında ise Huffman kodlama %37,53, Shannon-Fano kodlama %30,91, Aritmetik kodlama ile %37,92 oranında tasarruf sağlanabildiği görülmektedir. İki dile ait metin dosyalarının ayrı ayrı tasarruf oranları Şekil 3 ve Şekil 4 üzerinde gösterilmektedir.



	bib	book 1	book 2	news	paper1	paper2	paper3	paper4	paper5	paper6	Ortalama
Huffman	034	043	040	034	035	041	039	035	030	034	037
Shannon-Fano	027	037	034	029	029	035	033	028	024	029	030
Aritmetik	034	043	040	035	036	041	039	034	030	035	037

Şekil 3. İngilizce içerikli dosyaların sıkıştırmayla sağlanan tasarruf oranları



Şekil 4. Türkçe içerikli dosyaların sıkıştırmayla sağlanan tasarruf oranları

4.2. Sıkıştırma-açma süresi

Süre ölçüm sonuçları farklı testler esnasında daha tutarlı olabilmesi için art arda yirmi defa tekrarlanarak aritmetik ortalama alınmıştır. Ölçümler sonucunda sıkıştırma-açma sürelerinde en iyi başarım Huffman kodlamasıyla elde edilmiştir. Bu durum iki dil için de geçerlidir. Bununla beraber Shannon-Fano kodlama Huffman kodlamaya çok yakın değerler üretmiştir. Aritmetik kodlama diğer iki kodlama yöntemlerine nazaran sıkıştırma-açma süresi açısında çok daha uzun sürmüştür. Aritmetik kodlama, Huffman ve Shannon-Fano kodlama yöntemlerine kıyasla daha yüksek bir tasarruf oranı sağlasa da daha karmaşık işlem adımları ve matematiksel hesaplamalar gerektirdiğinden dolayı süre açısından verimli değildir.

İngilizce metin dosyalarının sıkıştırma işlemi Huffman kodlamasıyla 2,303 s, Shannon-Fano kodlama ile 2,420 s, Aritmetik kodlama ile 11,802 s sürmüştür. Açma işleminde sıralama değişmeden Huffman kodlamasıyla 2,988 s, Shannon-Fano kodlama ile 3,199 s, Aritmetik kodlama ile 26,542 s olarak ölçülmüştür. Türkçe metin dosyalarının sıkıştırma için geçen süre Huffman kodlamasıyla 8,142 s, Shannon-Fano kodlama ile 8,819 s, Aritmetik kodlama ile 44,367 s olarak ölçülmüştür. Açma işleminde Huffman kodlamasıyla 10,555 s, Shannon-Fano kodlama ile 11,526 s, Aritmetik kodlama ile 101,609 s sürmüştür. Tablo 6 ve Tablo 7'de tüm dosyalar için sıkıştırma-açma süreleri detaylandırılmıştır.

Tablo 6. İngilizce içerikli dosyaların sıkıştırma-açma süreleri

	Sıkıştırma Süresi (s)			Açma Süresi (s)		
Dosya Adı	**Huffman**	**Shannon-Fano**	**Aritmetik**	**Huffman**	**Shannon-Fano**	**Aritmetik**
bib	0,155	0,155	0,667	0,188	0,202	1,441
book1	0,673	0,727	4,229	0,915	0,994	9,519
book2	0,568	0,602	3,257	0,772	0,836	7,551
news	0,391	0,415	2,133	0,531	0,567	4,760
paper1	0,095	0,098	0,323	0,111	0,117	0,699
paper2	0,115	0,120	0,463	0,140	0,148	1,042
paper3	0,093	0,095	0,282	0,102	0,108	0,623
paper4	0,063	0,062	0,105	0,066	0,065	0,202
paper5	0,063	0,059	0,098	0,065	0,063	0,188
paper6	0,085	0,086	0,243	0,097	0,099	0,517
Toplam	2,303	2,420	11,802	2,988	3,199	26,542

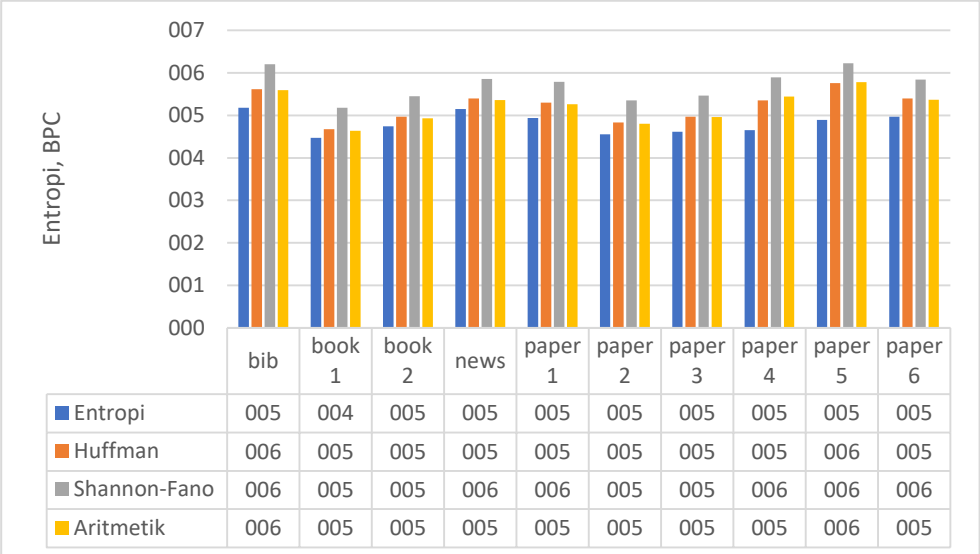
Tablo 7. Türkçe içerikli dosyaların sıkıştırma-açma süreleri

	Sıkıştırma Süresi (s)			Açma Süresi (s)		
Dosya Adı	**Huffman**	**Shannon-Fano**	**Aritmetik**	**Huffman**	**Shannon-Fano**	**Aritmetik**
yazar1	0,765	0,827	4,098	1,001	1,084	9,366
yazar2	0,615	0,654	3,238	0,781	0,866	7,373
yazar3	0,847	0,926	4,703	1,107	1,217	10,807
yazar4	0,617	0,649	3,316	0,796	0,848	7,725
yazar5	0,843	0,912	4,594	1,090	1,194	10,421
yazar6	0,806	0,871	4,370	1,050	1,136	10,001
yazar7	0,574	0,622	3,064	0,746	0,827	7,063
yazar8	1,410	1,545	7,915	1,818	1,982	18,096
yazar9	1,066	1,157	5,838	1,384	1,510	13,358
yazar10	0,599	0,655	3,229	0,781	0,862	7,400
Toplam	8,142	8,819	44,367	10,555	11,526	101,609

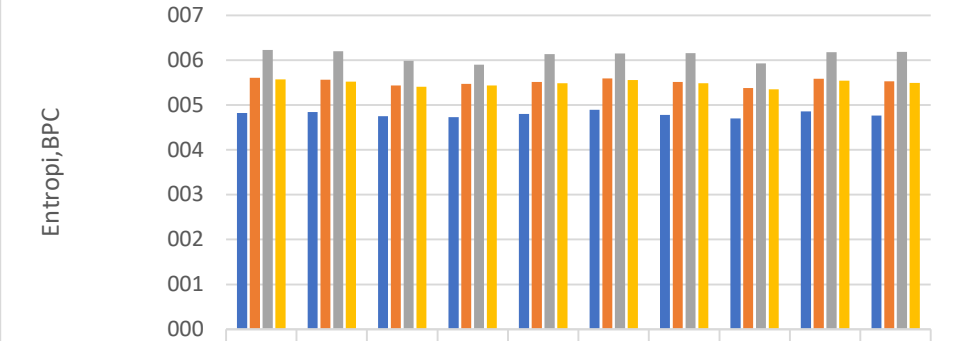
4.3. Entropi ve BPC

Entropi ile BPC değeri arasında doğru orantılı bir ilişki vardır. Verinin entropisi yüksekse yani veri düzensiz, rastgele ve bilgi içeriği yoğunsa sıkıştırma algoritması bu veriyi daha az etkili bir şekilde sıkıştırabilir. Bu durumda BPC değeri yüksek olacaktır. Verinin entropisi düşükse yani veri düzenli, tekrar fazla ve az bilgi içeriği barındırıyorsa sıkıştırma algoritması bu veriyi daha etkili bir şekilde sıkıştırabilir. Sonuç olarak, BPC değeri düşük olacaktır. Her bir dosya için ayrı ayrı, Entropi değeri Denklem 3 üzerinde ve BPC değeri ise Denklem 2 kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar Şekil 5 ve Şekil 6 üzerinde gösterilmiştir.

Entropi ortalama değerleri İngilizce içerikli dosyalarda 4,81, Türkçe içerikli dosyalarda ise 4,79 hesaplanmıştır. BPC ortalama değerleri İngilizce içerikli dosyalarda Huffman kodlamasıyla 5,22; Shannon-Fano kodlama ile 5,72, Aritmetik kodlamada ise 5,21 olarak hesaplanmıştır. Türkçe içerikli dosyalarda Huffman kodlama ile 5,52, Shannon-Fano kodlama ile 6,10, Aritmetik kodlama ile 5,48 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. İngilizce içerikli dosyaların Entropi ve BPC değerleri



	yazar 1	yazar 2	yazar 3	yazar 4	yazar 5	yazar 6	yazar 7	yazar 8	yazar 9	yazar 10
Entropi	005	005	005	005	005	005	005	005	005	005
Huffman	006	006	005	005	006	006	006	005	006	006
Shannon-Fano	006	006	006	006	006	006	006	006	006	006
Aritmetik	006	006	005	005	005	006	005	005	006	005

Şekil 6. Türkçe içerikli dosyaların Entropi ve BPC değerleri

Türkçe içerikli dosyalarda en düşük BPC değerini Aritmetik kodlama vermiştir. İngilizce içerikli dosyalardan paper4 ve paper5 üzerinde en düşük BPC değerini Huffman kodlama verirken diğer dosyalarda en düşük değeri Aritmetik kodlama vermiştir. Bu durumun sebebi, paper4 ve paper5 dosyalarının içerisinde diğer dosyalara göre daha az karakter bulunması ve bu nedenle tekrar eden karakter sayısının da göreceli olarak daha az olmasıdır. Ortalama BPC değeri Türkçe metinlerde İngilizce metinlere göre Huffman kodlamasında %5,63, Shannon-Fano kodlamasında %6,63 ve aritmetik kodlama da ise %5,20 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür. Ortalama entropi değerleri her iki dilde çok yakın sonuçlar vermiştir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada İngilizce ve Türkçe içerikli dosyaların istatiksel kodlamaları kullanarak sıkıştırma başarımları karşılaştırılmıştır. Kayıpsız veri sıkıştırma başarım testlerinde en çok tercih edilen dosyaları içermesi sebebiyle İngilizce içerikler için Calgary külliyatı kullanılmıştır. Türkçe için spor, ekonomi, siyaset ve edebiyat içerikli köşe yazılarından yapılan derleme kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan tüm metinler ASCII kodlamaya sahiptir.

Tasarruf oranında Aritmetik kodlama her iki dildeki metinlerde de en iyi sonuçları vermiştir. Huffman kodlaması Aritmetik kodlamaya yakın sonuçlar göstermiş olsa da İngilizce metinlerde %0,15 Türkçe metinlerde %0,40 oranında daha düşük başarım sağlanabilmiştir. Shannon-Fano kodlaması ise Aritmetik kodlama'ya göre İngilizce metinlerde %6,22 Türkçe metinlerde %7,02 farkla en düşük tasarruf oranına sahiptir.

Huffman kodlaması, her iki dilde sıkıştırma ve açma süreleri açısından en iyi sonuçları verirken, Shannon-Fano kodlaması da sonuçlarıyla oldukça yakın bir başarım sergilemiştir. Bununla birlikte, Aritmetik kodlama yöntemi süre açısından en düşük başarımı göstermiştir. Türkçe metinlerin toplam dosya boyutunun İngilizce metinlere oranı 3,82'dir. Bu oran yaklaşık olarak iki dil arasındaki toplam sıkıştırma-açma sürelerinde gözlemlenmektedir. Dolayısıyla diller arasında sıkıştırma-açma süreleri arasında fark olmadığı anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada test ve ölçümler için onar adet metin dosyası derlenmiştir. Sonraki çalışmalarda bu sayının daha fazla sayıda belirlenmesi ve içeriklerin zenginleştirilmesi ile doğruluk oranı daha isabetli tespit edilebilecektir. Bu çalışmada başarım karşılaştırmaları tasarruf oranı, sıkıştırma-açma süreleri, BPC ve entropi değerleri kullanılarak yapılmıştır. Bu ölçütlere bellek ve işlemci kullanımı gibi ölçütlerin eklenmesi kodlama yönteminin uygulama senaryosuna göre seçimine daha fazla belirleyicilik de sağlayabilecektir.

Bu çalışmada istatistiksel kodlama yöntemlerinden en çok bilinenleri tercih edilmiştir. Ayrıca, daha kapsamlı bir değerlendirme için seçilen kodlamaların yansıra Huffman kodlamanın varyasyonlarının, ANS (Asymmetric Numeral Systems- Asimetrik Sayı Sistemleri) kodlamanın performans odaklı iyileştirilmiş bir uygulaması olan FSE (Finite State Entropy - Sonlu Durum Entropisi) algoritmasının da dâhil edilmesi gelecekteki çalışmalarda isabetli olacaktır.

Kaynaklar

Abramson, N. (1963). *Information theory and coding.*

Aktaner, A. (1995). *Entropi Kodlama ile EKG Veri Sıkıştırma* İstanbul Teknik Üniversitesi]. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Bell, T., Witten, I. H., & Cleary, J. G. (1989). Modeling for text compression. *ACM Comput. Surv.*, *21*(4), 557–591. https://doi.org/10.1145/76894.76896

Bulut, F. (2016). Huffman Algoritmasıyla Kayıpsız Hızlı Metin Sıkıştırma. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, *3*(2), 0-0. https://doi.org/10.31202/ecjse.264192

Bulut, F. (2017). Bilgi Kuramındaki Entropi Kavramıyla İlgili Farklı Matematiksel Modeller. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, *1*(2), 167-174.

Çelikel Çankaya, E., Palaniappan, V., & Latifi, S. (2010). Fazlalıktan Yararlanarak Kayıplı Metin Sıkıştırma Gerçekleştirimi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *16*(3), 235 - 245.

Çölkesen, T. F. (2021). *Veri Yapıları ve Algoritmalar*. Papatya Yayınları.

Diri, B. (1999). *Türkçe'nin biçimbilim yapısına dayalı bir metin sıkıştırma sistemi* Yıldız Teknik Üniversitesi]. Fen Bilimleri Enstitüsü

Gilbert, H., & Handschuh, H. (2004). Security Analysis of SHA-256 and Sisters. In M. Matsui & R. J. Zuccherato, *Selected Areas in Cryptography* Berlin, Heidelberg.

Github. (2023). https://github.com/hckaya/stcc

Güneş, F., & Işık, A. D. (2018). Türkçede Sık Kullanılan Harfler ve Öğretilmesi. *Sınırsız Eğitim ve Araştırma Dergisi*, *3*(1), 1-26.

Güzeldereli, E. A. (2012). *Veri Gizlemede Sıkıştırma Algoritması Kullanımı ve Uygulaması* Sakarya Üniversitesi]. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Huffman, D. A. (1952). A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes. *Proceedings of the IRE*, *40*(9), 1098-1101. https://doi.org/10.1109/JRPROC.1952.273898

Ince, I. F., Bulut, F., Kilic, I., Yildirim, M. E., & Ince, O. F. (2022). Low dynamic range discrete cosine transform (LDR-DCT) for high-performance JPEG image compression. *The Visual Computer*, *38*(5), 1845-1870. https://doi.org/10.1007/s00371-022-02418-0

Koşan, M. A., Coşkun, A., & Karacan, H. (2019). Yapay Zekâ Yöntemlerinde Entropi *Journal of Information Systems and Management Research*, *1*(1), 15-22.

Mantoro, T., Ayu, M. A., & Anggraini, Y. (2017, 23-25 Nov. 2017). The performance of text file compression using Shannon-Fano and Huffman on small mobile devices. 2017 International Conference on Computing, Engineering, and Design (ICCED),

Mesut, A. (2006). *Veri Sıkıştrmada Yeni Yöntemler* Trakya Üniversitesi]. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Oral, M., & Aşşık, M. M. (2019). Kanonik Huffman Benzeri Kodlama için Kod Sözcüklerinin Uzunluklarını Cebirsel Olarak Hesaplayan Bir Algoritma. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *34*(4), 9-20. https://doi.org/10.21605/cukurova mmfd.702021

Öztürk, E., & Mesut, A. (2021). Kısa Metinlerin Sıkıştırılması için BERT Tabanlı bir Yöntem. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(32), 177-182. https://doi.org/10.31590/ejosat.1039450

Rahman, M. A., & Hamada, M. (2019). Lossless Image Compression Techniques: A State-of-the-Art Survey. *Symmetry*, *11*(10), 1274. https://www.mdpi.com/2073-8994/11/10/1274

Sayood, K. (2006). *Introduction to Data Compression*. Elsevier Science. https://books.google.com.tr/books?id=044wLaqZ8twC

Shanmugasundaram, S., & Lourdusamy, R. (2011). A Comparative Study Of Text Compression Algorithms. *International Journal of Wisdom Based Computing*, *2*(4), 68-76. https://doi.org/10.21917/ijct.2011.0062

Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, *27*(3), 379-423. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x

Stecuła, B., Stecuła, K., & Kapczyński, A. (2022). Compression of Text in Selected Languages-Efficiency, Volume, and Time Comparison. *Sensors*, *22*(17), 6393. https://www.mdpi.com/1424-8220/22/17/6393

Storer, J. A., & Szymanski, T. G. (1982). Data compression via textual substitution. *J. ACM*, *29*(4), 928–951. https://doi.org/10.1145/322344.322346

Welch, T. A. (1984). A Technique for High-Performance Data Compression. *Computer*, *17*(6), 8-19. https://doi.org/10.1109/MC.1984.1659158

Witten, I. H., Neal, R. M., & Cleary, J. G. (1987). Arithmetic coding for data compression. *Commun. ACM*, *30*(6), 520–540. https://doi.org/10.1145/214762.214771

Ziv, J., & Lempel, A. (1977). A universal algorithm for sequential data compression. *IEEE Transactions on Information Theory*, *23*(3), 337-343. https://doi.org/10.1109/TIT.1977.1055714

Ziv, J., & Lempel, A. (1978). Compression of individual sequences via variable-rate coding. *IEEE Transactions on Information Theory*, *24*(5), 530-536. https://doi.org/10.1109/TIT.1978.1055934

MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

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

UMAGD, (2023) 15(3), 28-41.

10.29137/umagd.1309466

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:03 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue

Araştırma Makalesi / Research Article

Daralan ve Genişleyen Geometriye Sahip Bir Mini Kanalda Kanal Geometrisinin Isı Transferine Olan Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Numerical Investigation of the Effects of Channel Geometry on Heat Transfer in a Mini Channel with Narrowing and Expanding Geometry

Bahadır Gemicioğlu [1*], Tayyip Demirbaş [2], Tolga Demircan [3]

*[*1,2,3] Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450 Yahşihan, Kırıkkale, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 04/06/2023 **Kabul / Accepted**: 16/07/2023 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Öz

Bu çalışmada yüksek sıcaklıklara ulaşan yüzeylerin soğutulması için kullanılan mini kanallı bir ısı alıcısının soğutma performansı incelenmiştir. Bu mini kanalın kanal uzunluğu boyunca kesit alanı değiştirilerek, düz kanal, daralan-genişleyen kanal ve genişleyen-daralan kanal olmak üzere üç ana kanal geometrisi belirlenmiştir. Ayrıca bu ana model geometrilerinde genişleme ve daralma açıları değiştirilerek farklı bölme sayısına sahip alt geometrik modeller oluşturulmuştur. Reynolds sayısı 500-2000 aralığında, bölme adeti de 3-12 aralığında değiştirilerek analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, tüm model geometrilerinde akışın Reynolds sayısının artması ile ısı transferinin arttığı gözlemlenmiştir. Bölme sayısının artışı ile hem daralan-genişleyen hem de genişleyen-daralan kanal tiplerinde Nusselt sayısının artış gösterdiği, dolayısıyla kanalın sahip olduğu bölme sayısının artırılması ısı transferini olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Daralan-genişleyen kesite sahip kanal tipinde diğer kanal tiplerine oranla daha yüksek Nusselt sayıları elde edilmiştir. Daralan-genişleyen kesite sahip modelin sonuçları düz kanal tipi ile kıyaslandığında, Nusselt sayısının ve termal performans faktörünün sırasıyla yaklaşık %50 ve %100 kadar artış gösterdiği görülmüştür. Dolayısıyla incelenen parametre aralığında daralan-genişleyen kesite sahip mini kanal geometrisinin soğutma performansının incelenen diğer kanal geometrilere oranla daha yüksek olduğu söylenebilir.

Anahtar Kelimeler

"Isı transferi, Mini kanal, Isı alıcısı, Kesit daralması, Kesit genişlemesi"

Abstract

In this study, the cooling performance of a mini-channel heat sink used for cooling surfaces reaching high temperatures is investigated. For this mini-channel, three main channel geometries, namely straight channel, narrowing-expanding channel, and expanding-narrowing channel, were determined by varying the cross-sectional area along the channel length. In addition, sub-models with different numbers of baffles were created by changing the expansion and contraction angles in these main model geometries. Analyses were performed by changing the Reynolds number in the range of 500-2000 and the number of baffles in the range of 3-12. As a result of the analyses, it was observed that heat transfer increased with increasing Reynolds number of the flow in all model geometries. With the increase in the number of baffles, the Nusselt number increased in both narrowing-expanding and expanding-narrowing channel types. Therefore, it is observed that the heat transfer is positively affected by increasing the number of baffles in the channel. Higher Nusselt numbers were obtained in the channel type with a narrowing-expanding cross-section compared to other channel types. When the results of the model with a narrowing-expanding cross-section are compared with the straight channel type, the Nusselt number and thermal performance factor have increased by approximately 50% and 100%, respectively. Therefore, it can be said that the cooling performance of the mini channel geometry with a narrowing-expanding cross-section is higher than the other channel geometries examined in the examined parameter range.

Key Words

"Heat transfer, Mini channel, Heat sink, Cross-sectional narrowing, Cross-sectional expansion"

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

1. Giriş

Aralıksız veya uzun süreli çalışan elektronik ve mekanik cihazlar yüksek sıcaklıklara ulaşabilmektedir. Bu durum cihazların kullanım ömrünün kısalmasına ve bozulmasına sebep olabilmektedir. Bu cihazların güvenli çalışma sıcaklıklarında tutulması ve çalışma performansının arttırılması için, kullanım esnasında etkili bir şekilde soğutulması gerekmektedir. Teknolojinin hızla ilerlemesi ve üretimin her aşamasında makinelerin aktif olarak kullanılması ile birlikte, cihazları daha etkin soğutma işlemi büyük önem kazanmıştır. Özellikle elektrik araç bataryaları, güneş panelleri, tıbbi cihazlar, süper bilgisayarlar vb. gibi ısınmaya eğimli birçok makine ve cihazda soğutma işlemi çok önem arz etmektedir. Günümüzde bu amaçla birçok farklı soğutma yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri de mini kanallar aracılığı ile yapılan soğutmadır. Bu soğutma işlemi, içerisine mini kanallar açılmış olan yüksek iletkenliğe sahip metallerin soğutulacak olan yüzeylere yerleştirilmesi, bu kanallar içerisinden ise düşük sıcaklıkta su, hava vb. gibi akışkanların geçirilerek yüzeyin soğutulması prensibi ile gerçekleştirilmektedir. Literatür incelendiğinde, araştırmacıların farklı mini kanal geometrilerinin, farklı kanal malzemelerinin, farklı soğutucu akışkan tiplerinin ve farklı çalışma parametrelerinin soğutma performansı üzerindeki etkileri üzerine çalıştığı görülmüştür. Literatürde bulunan benzer çalışmaların bir kısmı aşağıda verilmiştir.

Saeed ve ark. (2018), mikro kanallarda kanatçık sayısını ve kanatçıklar arasındaki mesafeleri değiştirerek, farklı hacim konsantrasyonuna sahip nanoakışkan kullanımı için, mini kanalın ısı transfer özelliklerini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının sonunda saf su yerine nanoakışkan kullanılması durumunda ısı transfer katsayısının değerinin önemli ölçüde arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, iki fazlı karışım modelinden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlar ile oldukça uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir. Rao ve ark. (2016) elektrikli bir aracın batarya ömrünü uzatabilmek için, faz değişim malzemesi (FDM) ve mini kanallın bir arada kullanıldığı birleştirilmiş bir batarya termal yöntemi üzerine çalışmışlardır. Kütlesel akış hızının, faz değişim sıcaklığının ve faz değiştiren malzemenin termal iletkenliğinin değişiminin etkilerini sayısal olarak incelenmiştir. Sonuç olarak FDM'nin ısıl iletkenliği ve faz değişim sıcaklığının değişiminden, FDM 'nin sıvı hacim oranının büyük ölçüde etkilendiğini belirtmişlerdir. Kanal sayısının artışı ile maksimum sıcaklığının ve maksimum sıcaklık farkının azaldığını gözlemlemişlerdir. Sarıca ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada, mini kanallarda Cu-su nanoakışkanın kullanımının sıcaklık performansı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Uzunluğu 250 mm, çapları 2mm ve 3mm olan kanal geometrileri ve giriş sıcaklığının 35 °C ve 40 °C değerleri için, farklı debilerde Cu-su nanoakışkanı kullanarak deneyler yapmışlardır. Sonuç olarak, Cu-su nanoakışkanının kullanımının su kullanımına göre soğutma performansı artırdığını gözlemlemişlerdir. En iyi performansın 3mm kanal çapı ve 40 °C giriş sıcaklığı olduğu durumda gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

Kılınç ve Şentürk (2019) soğutucu akışkan olarak suyun kullanıldığı mini kanallı bir ısı emici bloğun optimizasyonunu sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında soğutma performansı için tabanda oluşan maksimum sıcaklığı ve basınç düşümünü iki temel kıstas olarak ele alınmıştır. Soğutucu bloğun alüminyum, bakır ve silikon gibi farklı malzemelerden imal edilmesinin ısıl performansa olan etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, aynı geometri için en iyi ısıl performansın sırasıyla bakır, alüminyum ve silikon malzemelerde geçekleştiğini gözlemlemişlerdir. Ancak malzemelerin birim maliyetlerinin de seçimde önemli olduğunu ve ısıl performans açısından bakıra göre bir miktar düşük performansa sahip olan alüminyum malzemenin tercih edilebileceğini belirtmişlerdir. Wu ve ark. (2022) mini bir kanal içinde yer alan bir CPU'yu soğutmak ve ekonomik verimliliği araştırmak için, nano kapsüllenmiş faz değişim malzemesi (NPCM) ile su akışını sayısal olarak incelemişlerdir. Reynolds sayısının, yüzey ısı akısının ve hacim oranının değişiminin, sıcaklık dağılımı, maksimum yüzey sıcaklığı ve ekonomik verimlilik üzerindeki etkilerini irdelemişlerdir. Saf su kullanımı için Reynolds sayısının 50'den 100'e çıkarılması ile maksimum yüzey sıcaklığının 98,4'ten 82,5 ^{o}C'ye azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca, %3 hacim oranına sahip NPCM için, CPU yüzeyinin maksimum sıcaklığının saf suya göre 2,27 ^{o}C azaldığını gözlemlemişleridir. Reynolds sayısının artırılması ile, birim transfer edilen ısı yükünün arttığını belirtmişlerdir. Altay (2020), spiral eliptik ve kavisli yapılara sahip mikro kanallarda verimliliğinin arttırılması üzerine sayısal bir araştırma yapmıştır. Farklı Reynolds sayıları için, beş döngülü spiral eliptik ve 280° eğrilik açısına sahip kavisli mikro kanalların karıştırma performansını sayısal olarak değerlendirmiştir. Reynolds sayısı 30 olduğunda, her mikro mikser için çıkışa yakın bölümlerde 0.91'e kadar karıştırma indeksleri elde etmiştir. Ayrıca orta sarmallarda ve son sarmallarda 10'dan 100'e kadar değişen Reynolds sayılarında 0.90'dan fazla karıştırma indisleri elde etmiştir. Jha ve Malgwi (2021), dikey bir mikro kanalda gerçekleşen hidromanyetik doğal konveksiyon akışı için, iletken ve iletken olmayan duvarların etkileşimini teorik olarak incelemişlerdir. Akışkan hızı, manyetik alan, sürtünme, hacimsel akış hızı ve akım yoğunluğu için ifadeler elde etmişlerdir. Hall akımının varlığında, Hartmann sayısı arttıkça akışkan hızının, manyetik alanın ve akım yoğunluğunun azaldığını gözlemlemişlerdir.

Al-Hasani ve Freegah (2022), çift çıkışlı serpantin mini kanallı ısı emicinin hidrotermal değerlendirmesine ikincil akış açısı ve pim kanatçık etkisi üzerine sayısal bir çalışma yapmışlardır. Nusselt sayısını ve taban sıcaklığının homojenliğini geliştirmek için yeni modeller oluşturmuşlardır. Çalışmada sayısal sonuçları doğrulamak için temel model ve optimum model (model F) olmak üzere iki model üretilmiş ve deneysel olarak test edilmiştir. Sonuç olarak, çift çıkışlı serpantin mini kanallı ısı emici kullanımı ile performansta %1,47'lik bir artışa ve daha düşük bir maksimum taban sıcaklığına ulaşıldığını belirtmişlerdir. İncelenen F modelinin temel modele kıyasla, performansının %1,79, Nusselt sayısının ise %9,64 daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Zhou ve ark. (2020), mikro kanallar üzerine inceleme çalışması yapmışlardır. Bu kapsamda, mikro kanallarda kullanılan tek fazlı, iki fazlı ısı transferi korelasyonlarını tartışmışlardır. Tek fazlı ve iki fazlı akışkanlar için basınç düşüşü korelasyonları sunmuşlardır. Farklı çalışma akışkanlarının, çap ve en-boy oran değişiminin, şekil ve yapı değişiminin, yüzey pürüzlülüğünün, mikro kanal boru yerleşiminin, ısı transferi performansı ve basınç düşüşü üzerindeki etkilerini irdelemişlerdir. Chen ve ark. (2022), büyük batarya paketlerinde sistemin

sıcaklık farkını azaltmak için çift yönlü simetrik paralel mini kanallı soğuk plaka (PMCP) tasarlayarak enerji verimliliğini artırmaya çalışmışlardır. PMCP'nin performansını değerlendirmek için sayısal analizler yapmışlardır. Tasarladıkları PMCP'yi geleneksel PMCP sonuçları ile karşılaştırdıklarında, sıcaklık farkının %77 ve enerji tüketiminin ise %82 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir. Tasarlanan PMCP'nin sistemin soğutma performansını ve enerji tasarrufunu önemli ölçüde artırdığını belirtmişlerdir. Qi ve ark. (2009) yeni tip bir mini kanallı buharlaştırıcının performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Panjur kanat şeklinin performans üzerindeki etkisi üzerinde durmuşlardır. Düz tepeli panjur kanadı için, mini kanalın hava tarafının basınç düşüşünün azaldığını belirtmişlerdir. Oluklu panjur kanadına sahip mini kanallı buharlaştırıcı ile karşılaştırıldığında aynı ısı transfer oranını koruduğunu gözlemlemişlerdir. İki geçişli akış düzenlemesinin ısı transferi ve soğutucu akışkan tarafı basınç düşüşünün azaltılması için daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Nemati ve ark. (2021) dalgalı mini kanallı ısı alıcısının şekil optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Sıvı akışının üç boyutlu simülasyonlarını ve çok amaçlı bir optimizasyon algoritmasını birleştirilerek, su soğutmalı mini kanallı bir ısı alıcısı için optimum paremetreleri önermişlerdir. Kullanmış oldukları LINMAP çözümünün, pompalama gücünde yalnızca %10'luk bir artışla termal direnci düz bir kanala göre %87 oranında düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Sonuçları ayrıca tamamen dalgalı bir kanalla karşılaştırmışlar ve tamamen dalgalı bir kanalda ısıl direnç değerinin daha iyi olmasına rağmen, bu tür bir ısıl dirence erişmek için yüksek bir pompalama gücü gerektiğini belirtmişlerdir.

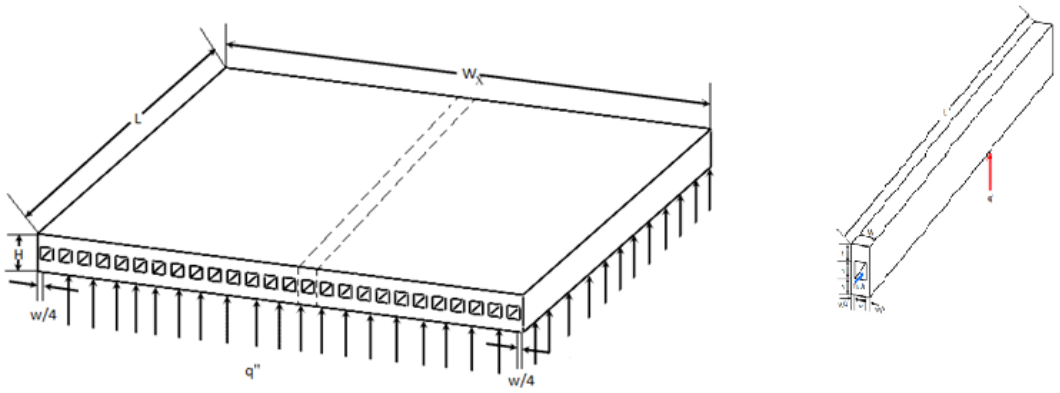
Ünverdi ve ark. (2020) mini kanallı gövde borulu bir ısı değiştiricinin tasarımını ve performansını deneysel olarak ele almışlardır. Bu kapsamda ısı geçişi ve basınç düşüşünü incelemişlerdir. Deneylerinin sonucunda, makro borular yerine mini kanallı boruların kullanılması ile hem gövde hem de boru tarafında kullanılan aracı akışkan miktarının azalacağını gözlemlemişlerdir. Bu durumun akışan-yüzey temas alanını artıracağını, daha küçük hacimde yoğun ısı geçişini sağlayacağını belirtmişlerdir. Şipal (2021) hfe 7000 soğutucu akışkanın mini kanallardaki yoğuşma özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. Yoğuşmaları hidrolik çapları 1,6 mm, 2,0 mm ve 2,5 mm olan paslanmaz çelik yatay mini kanallarda, 5-15 kg/saat aralığında debiler için deneyler yapmıştır. Sonuç olarak, kanal çapı küçüldüğünde ısı transfer katsayısının ve basınç düşümünün arttığını saptamıştır. Ayrıca kuruluk derecesi ve kütle akı yoğunluğunun artması ile ısı transfer katsayının ve basınç düşümünün arttığını belirlemiştir. Panchal ve ark. (2017) prizmatik bir lityum-iyon pil hücresi üzerine yerleştirilen mini kanallı soğuk plakalar içindeki sıcaklık ve hız dağılımlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarını farklı deşarj hızlarında ve farklı çalışma sıcaklıkları için gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, deşarj oranlarının ve çalışma sıcaklığının artması ile soğuk plakaların sıcaklığının arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, anot ve katota yakın bölgelerde batarya yüzey merkezine oranla daha yüksek sıcaklıklar gözlemlendiğini tespit etmişlerdir. Baş (2021) Al_2O_3-su ve ZnO–su nanoakışkanlarının farklı çaplardaki mini kanallarda akışını deneysel olarak incelemiştir. Yapılan deneyler sonucunda mini kanal çapı daraldıkça veya akışkan debisi arttıkça ısı taşınım katsayısının arttığını dolayısıyla gerçekleşen ısı transferi miktarının arttığını gözlemlemiştir. En yüksek ısı transferi miktarının, 500 μm çapa sahip kanalda 50 ml/dk hacimsel debi ile akan Al_2O_3-su nanoakışkanı için gerçekleştiğini belirtmiştir. Saadon ve ark. (2023) yakınsamalı-ıraksamalı mini kanallı ısı alıcılarında Fe3O4 ve Ag-H2O nanoakışkanlarını kullanarak ısı transferinin iyileştirilmesini sayısal olarak incelemişlerdir. Bu amaçla, farklı konsantrasyon hacim oranlarında (%0 – %0,075) ve farklı Reynolds sayısı aralıklarında (200–1000) sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Analizlerden elde etikleri sonuçlar aracılığı ile taban sıcaklığının, Nusselt Sayısının, sürtünme faktörünün ve termal direncin değişimini incelemişlerdir. Sayısal sonuçlar neticesinde nanoakışkan ve geometride yakınsama-ıraksama kullanımının mini kanallı ısı alıcısının hidrotermal performansını artırabileceğini gözlemlemişlerdir.

Yukarıda da belirtildiği üzere, literatürde mini kanallar üzerine yapılmış birçok sayısal ve deneysel çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, kanal geometrisi, akışkan tipi, akışkan debisi, sıcaklığı vb. birçok parametrenin ısı transferi üzerindeki etkilerinin incelendiği görülmüştür. Literatürde kanal giriş geometrisinin değişimi üzerine yapılmış çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda kare, yuvarlak, üçgen, dikdörtgen, çokgen vb. kanal kesit geometrilerinin ve geometrik boyutlarının değişiminin incelendiği çalışmalara rastlanılmıştır. Ancak ilgili çalışmalarda, kanal geometrik boyutlarının kanal uzunluğu boyunca değişmediği ve sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden bu çalışmada, dikdörtgen kesitli bir mini kanal ele alınmış ve bu mini kanalın kesit boyutunun akış boyunca daralma ve genişleme yaparak değiştiği kabul edilmiştir. Farklı eğime sahip daralma ve genişlemeler ele alınarak, farklı bölme sayısına sahip kanal modelleri oluşturulmuştur. Bu sayede kanal bölme sayısının ve akış giriş hızının ısı transferine olan etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, kanal geometrisi, bölme adedi, Reynolds sayısı gibi parametrelerin değişiminin; basınç kaybına, tüketilen güç miktarına, çıkış sıcaklık değerine, ısı alıcısının ortalama sıcaklığına ve ortalama Nusselt sayısına olan etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

2. Materyal Metot

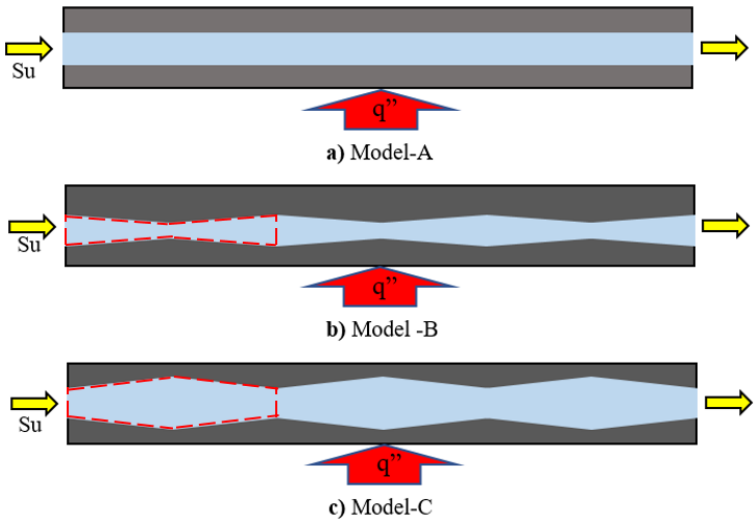
2.1. Problemin tanımı

Bu çalışmada mini kanallar aracılığı ile yapılan soğutma işleminde kanal kesit geometrisinin değişiminin ısı transferi ve soğutma performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda birden çok mini kanala sahip bir ısı alıcısı geometrisi belirlenmiştir. Bu geometrinin alt yüzeyine sabit ısı akısı uygulanmış ve kanallar içerisinden soğuk akışkan geçirilerek ısı alıcısının soğutma performansı belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan sayısal analizlerde hem işlem kolaylığı hem de zaman tasarrufu sağlaması açısından, ısı alıcısının orta kısmında yer alan bir mini kanal çözüm alanı olarak seçilmiştir. Bu mini kanalın iki yan yüzeyine simetri sınır şartı atanarak, analizler tek bir mini kanal için yapılmıştır. Bu çalışmada incelenen ısı alıcısının ve çözüm için seçilen geometrinin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Isı alıcısının ve çözüm için seçilen ve simetri koşulu uygulanan tek bir mini kanalın şematik gösterimi.

Bu çalışmada öncelikle dikdörtgen kesite sahip H yüksekliğinde, W genişliğinde ve L uzunluğunda bir geometri belirlenmiş ve bu kanal geometrisi Model-A olarak tanımlanmıştır. Model-A geometrisinde kanal giriş kesiti sabit alınmak kaydı ile, önce kesit genişlemesi sonra kesit daralması işlemi yapılarak Model-B geometrisi oluşturulmuştur. Benzer olarak, Model-A geometrisinde yine kanal giriş kesiti sabit alınmak kaydı ile, önce kesit daralması sonra kesit genişlemesi işlemi yapılarak Model-C geometrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerin şematik gösterimi Şekil 2'de verilmektedir. Kesit daralması ve kesit genişlemesi işlemlerinin açıları değiştirilerek, farklı bölme sayılarına sahip yeni geometriler elde edilmiştir. Şekil 2'de daralan-genişleyen ve genişleyen-daralan kesite sahip modellerde bölme bölümünün temsil ettiği kısımlar kırmızı kesik çizgiler ile gösterilmiştir. Bu kapsamda, Model-B ve Model-C geometrileri için, bölme sayısı 3, 6, 9 ve 12 şeklinde değişen alt geometriler oluşturulmuştur. Bu sayede hem kesit genişleme ve daralma işleminin hem de genişleme-daralma açısının soğutma performansı üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 2. Model geometrilerinin şematik gösterimi a) Model-A, b) Model-B ve c) Model-C.

Oluşturulan tüm model geometrilerinin ana geometrik boyutları ve uygulanan sınır şartları birbirleri ile eş alınmıştır. Bu kapsamda tüm modeller için kanalın katı kısmının uzunluğu 40 mm, genişliği 3 mm, yüksekliği ise 1,5 mm olarak belirlenmiştir. Bu katı kısmın içerisinde kanal uzunluğu boyunca devam eden 1mmx1mm kesit giriş alanına sahip bir boşluk olduğu ve bu boşluktan soğutucu akışkanın aktığı düşünülmüştür. Yapılan sayısal analizlerde çözüm hacmi olarak hem katı kısım hem de akışkanın aktığı kısım birlikte kullanılmıştır. Dolayısıyla sayısal çözümler her iki kısım için elde edilmiştir. Tüm modellerde kanalın dış geometrik boyutları ve akışkanın giriş ve çıkış kesit alanları değişmemekte, ancak genişleme ve daralma işlemleri nedeniyle modelden modele kanal boyunca akış kesit alanı değişiklik göstermektedir. Mini kanalın malzemesi ve kullanılan soğutucu akışkan tipi literatürde bulunan benzer bir çalışmaya (Gao ve ark., 2022) uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir. Bu kapsamda, kanal malzemesi olarak soğutma performansı açısından faydalı termofiziksel özelliklere sahip olan yarı iletken Bizmut Tellürit malzemesi, soğutucu akışkan olarak ise pek çok mühendislik uygulamasında soğutucu akışkan olarak kullanılan su tercih edilmiştir. Bu malzemelerin termofiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Soğurtucu akışkan (Su) ve katı (Bi_2Te_3) malzemenin termofiziksel özellikleri (Gao ve ark., 2022)

Malzeme	k (W/m^2.K)	ρ (kg/m^3)	c_p (J/kg.K)	μ (Pa.s)
Bi_2Te_3	130	2330	2090	-
Su	0,613	997,1	4179	0,000855

3. Çözüm Yöntemi

3.1. Diferansiyel denklemler

Çalışma kapsamında incelenen problem sayısal olarak çözülmüştür. Bu çözümde kullanılan temel diferansiyel denklemlerinin genel hali aşağıda verilmiştir (Foong ve ark., 2009)

Süreklilik Denklemi

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0 \quad (1)$$

Momentum Denklemi (x-yönlü)

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \quad (2)$$

Momentum Denklemi (y-yönlü)

$$\rho\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \quad (3)$$

Momentum Denklemi (z-yönlü)

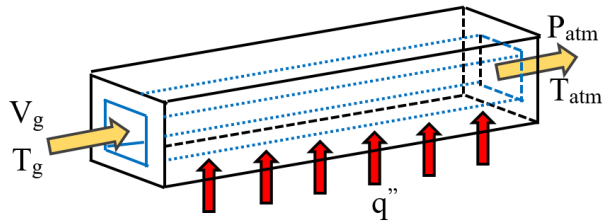
$$\rho\left(u\frac{\partial z}{\partial x}+v\frac{\partial z}{\partial y}+w\frac{\partial z}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial z}+\mu\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 z}{\partial z^2}\right) \quad (4)$$

Enerji Denklemi

$$\rho\, c_p\left(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}\right)=k_f\nabla^2 T+2\,\mu\left(\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right)+\mu\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 \quad (5)$$

3.2. Sınır şartları

Bu çalışma kapsamında incelenen tüm model geometrilerinde, akışkanın kanala giriş sıcaklığı 298,15 K olacak şekilde sabit alınmış, kanal giriş hızı ise Reynolds sayısının formülünden çekilerek belirlenmiştir. Bu kapsamda akışın Reynolds sayısı 500, 1000, 1500, 2000 olacak şekilde belirlenerek laminer akış koşulları oluşturulmuştur. Akışkanın kanaldan çıkış basıncı ise atmosfer basıncına, çıkış sıcaklığı ise atmosfer sıcaklığına eşit olarak kabul edilmiştir. Kanalın üst yüzeyinin yalıtıldığı, alt yüzeyine ise q"=350000 W/m^2 değerinde sabit bir ısı akısı uygulandığı düşünülmüştür. Kanalın yan yüzeylerine ise simetri sınır şartı uygulanmıştır. İncelenen kanal geometrisi ve sınır şartlarının şematik gösterimi Şekil 3'de verilmektedir.



Şekil 3. Mini kanal geometrisi ve sınır şartlarının şematik gösterimi.

3.3. Matematiksel denklemler

Sayısal çözümün uygulanışı sırasında ve sayısal çözümden elde edilen sonuçların irdelenmesi sürecinde kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

Bu kapsamda, incelenen akışın Reynolds sayısı ve hidrolik çapı aşağıdaki eşitlikler yardımıyla belirlenmektedir (Çengel ve Cimbala, 2006).

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho U D_h}{\mu} \tag{6}$$

$$D_h = \frac{4A}{P} \tag{7}$$

Laminer akışta sürtünme faktörü, basınç farkı ve güç hesabı ise sırasıyla aşağıdaki eşitlilikler yardımıyla elde edilebilmektedir (Çengel ve Cimbala, 2006).

$$f=56{,}92/\mathrm{Re} \tag{8}$$

$$\Delta P=f\frac{L}{D_h}\rho\frac{U^2}{2} \tag{9}$$

$$P=\Delta P\dot{V} \tag{10}$$

Isı geçişi, kütlesel debi ve hacimsel debi ise aşağıda şekilde belirlenmektedir (Incropera ve ark., 2007).

$$\dot{Q}=\rho\dot{V}c_p(T_ç-T_g) \tag{11}$$

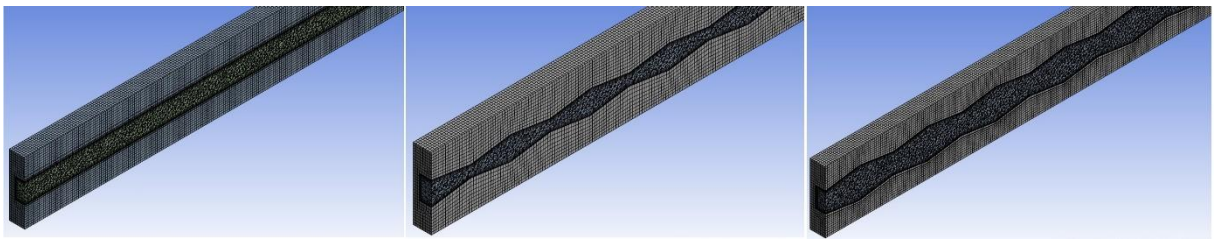
$$\dot{V}=VA \tag{12}$$

Akışın termal performans faktörü (TPF) ise ısı transferindeki artışın basınç kaybına oranı olarak tanımlanabilir. Termal performans etkeni aşağıdaki verilen eşitlik sayesinde hesaplanmıştır. (Çengel ve Cimbala, 2006)

$$TPF = \frac{\frac{Nu_0}{Nu}}{\left(\frac{f_0}{f}\right)^{1/3}} \tag{13}$$

4. Sayısal Yöntem

Çalışma kapsamında ele alınan akışının laminer, sürekli ve sıkıştırılamaz olduğu kabul edilmiştir. Kanal malzemesi olarak Bizmut Tellürit (Bi_2Te_3) seçilmiş olup, sıvı (akışkan) kısmı için ise saf su tercih edilmiştir. Süreklilik, momentum ve enerji denklemleri Fluent paket programı aracılığı ile çözülmüştür. Bu kapsamda öncelikle, problem geometrisi sonlu hacimlere bölünerek ağ yapısı oluşturulmuştur. Problemin diferansiyel denklemleri ayrıklaştırılarak cebirsel denklemlere dönüştürülmüştür. Bu denklemler SIMPLE algoritması kullanılarak, verilen sınır şartları için hesaplamalı akışkanlar dinamiği vasıtasıyla sayısal olarak çözülmüştür. Bu sayede problemin akış ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Sayısal çözüm sırasında kullanılan ağ yapıları Şekil 4'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, hem katı kısma hem de akışkan kısmına ağ yapısı oluşturulmuştur. Akışın katı yüzey ile temasta bulunduğu yüzeylere, yani sınır tabakanın gerçekleştiği yüzeylere daha sık olacak şekilde ağ yapısı kullanılmıştır. Katı ile akışkanın temasta olduğu yüzeylerin akışkan tarafında bulunan ilk meshin kalınlığı y^+=1 değeri için hesaplanarak belirlenmiştir.

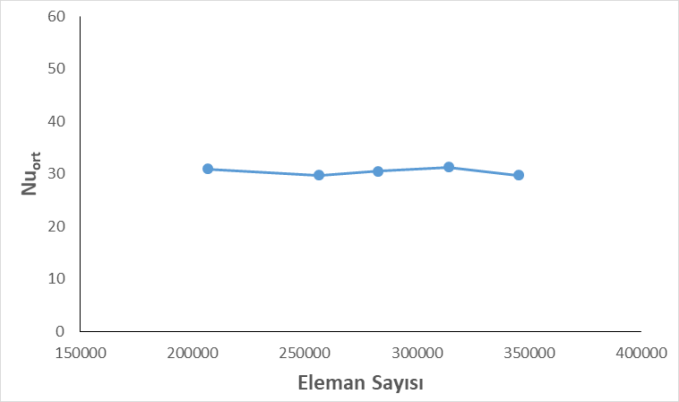


a) **b)** **c)**

Şekil 4. Ağ yapılarının görünüşü a) Model-A, b) Model-B ve c) Model-C

Sayısal çözüm sırasında kullanılan ağ yapısı elde edilen sonuçları etkileyebilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada incelenen tüm geometriler için öncelikle ağ yapısından bağımsızlaştırma işlemi yapılmış ve her geometri için optimum ağ yapısı belirlenmiştir. Yapılan tüm analizlerde belirlenen optimum ağ yapıları kullanılmıştır. Örnek olarak Model-A geometrisi için ağ yapısından bağımsızlaştırılması sürecinde elde edilen sonuçlar Şekil 5'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere farklı ağ yapıları için elde

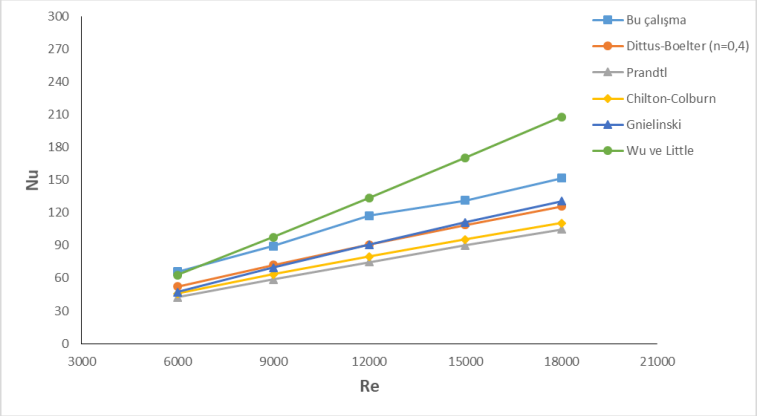
edilen sonuçlar birbirine yakın çıkmaktadır ve eleman sayısının artışından etkilenmemektedir. Bu model geometrisi için 282954 elemana sahip ağ yapısı optimum ağ yapısı olarak belirlenmiştir. Benzer süreçler diğer model geometriler için de uygulanmıştır.



Şekil 5. Model-A için ortalama Nusselt sayısının eleman sayısı ile değişimi.

4.1. Sayısal yöntemin güvenilirliğinin test edilmesi

Bu çalışmada kullanılan sayısal yöntemden elde edilen sonuçların doğruluğunun ve güvenilirliğinin belirlenebilmesi amacıyla literatürde bulunan benzer sonuçlar ile karşılaştırılmalar yapılmıştır. Bu kapsamda literatürde bulunan benzer (Yıldırım, 2018) bir çalışmanın geometrisi ve sınır şartları birebir kullanılarak sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürde bulunan ampirik denklemler ile mukayese edilmiştir. Bu karşılaştırma Şekil 6'da verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere elde edilen sonuçlar, ampirik bağıntılardan elde edilen sonuçlara oldukça yakın çıkmıştır. Çizilen eğrilerin birbirleri ile uyum içinde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla kullanılan sayısal yöntemin ve elde edilen sonuçların güvenilir bir aralıkta olduğu öngörülebilir.



Şekil 6. Sayısal sonuçların literatür ile karşılaştırılması.

Şekil 6'da verilen eğrilerin oluşturulması için kullanılan ampirik bağıntılar (Yıldırım, 2018) aşağıda verilmiştir.

Dittus-Boelter: $Nu = 0{,}023*Re^{0,8}*Pr^{0,4}$ (14)

Prandtl: $Nu = [(f/8)*(Re/Pr)]/[1+8{,}7*(f/8)^{1/2}*(Pr-1)]$ (15)

Chiltorn-Colburn: $Nu = 0{,}332*Pr^{1/3}*Re^{1/2}$ (16)

Gnielinski: $Nu = [(f/8)*(Re-1000)*Pr]/[1+12{,}7(f/8)^{1/2}*(Pr^{2/3}-1)]$ (17)

Wu ve Little: $Nu = 0{,}00222*Re^{1,09}*Pr^{0,4}$ (18)

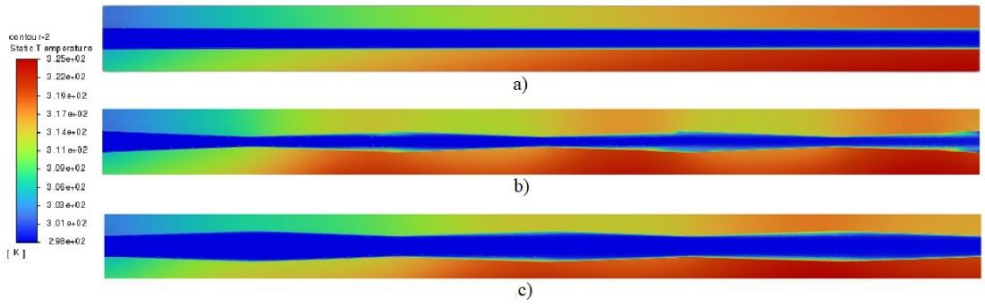
5. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada yüksek sıcaklıklara ulaşan elektronik elemanların soğutulması için kullanılan bir mini kanallı ısı alıcısının soğutma performansı incelenmiştir. Bu amaçla, ısı alıcısını oluşturan kanallardan bir tanesi sayısal olarak modellenmiştir. Mini kanal için üç farklı model geometrisi ve 4 farklı Reynolds sayısı için analizler yapılmıştır. Bu model geometrilerinde genişleme ve daralma açıları değiştirilerek farklı bölme sayısına sahip alt geometriler oluşturularak, bu alt geometrik modeller için analizler tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçların daha anlaşılabilir şekilde yorumlanabilmesi için, bu çalışmada kullanılan geometriler için isimlendirme sistematiği oluşturulmuştur. Modellerin isimlendirilmesi Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Model geometrilerin isimlendirilmesi

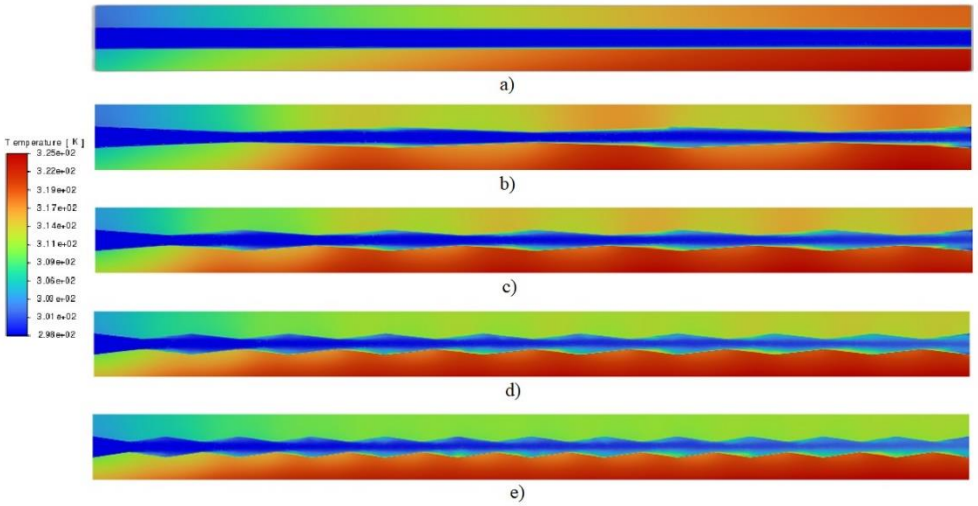
Kanal Yapısı	Ana Model	Bölme Sayısı	Alt Model
Düz Kanal	Model-A	-	Model-A
Daralan-Genişleyen Kanal	Model-B	3	Model-B1
		6	Model-B2
		9	Model-B3
		12	Model-B4
Genişleyen-Daralan Kanal	Model-C	3	Model-C1
		6	Model-C2
		9	Model-C3
		12	Model-C4

Reynolds sayısı 2000 olduğu durumda, düz kanal ve üç bölmeli kanal geometrileri için elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil 7'de birlikte verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere üç model geometrisi için genel olarak bir benzerlik söz konusudur. Kanalın alt yüzeyine ısı akısı uygulanmasından dolayı kanalın alt yüzeyleri daha sıcak, üst yüzeyleri ise daha soğuk bölgelere sahiptir. Kanalın içerisinden geçen akışkanın sıcak yüzeye temas etmesinden dolayı, kanal iç yüzeylerinden akışkana doğru bir ısı transferi gerçekleşmekte ve suyun kanal çıkışına doğru bir miktar sıcaklığı artmaktadır. Bu durum akışkan içerisinde ısıl sınır tabakanın oluşmasını sağlamaktadır. Benzer olarak kanalın katı kısımlarının sıcaklığı da kanal boyunca çıkış istikametinde artış göstermektedir. Özellikle kanalın ilk yarım bölgesinde soğutma işleminin başarılı olduğu ve diğer yarısına göre daha düşük yüzey sıcaklıkları elde edildiği görülmektedir. Ancak kanal kesit geometrisinin değişmesi, kanal boyunca görülen bu sıcaklık dağılım değerlerinin modellere göre farklılaşmasına sebep olmaktadır. Özellikle model-B geometrisinde kanalın katı kısmının sıcaklıklarının diğer modellere göre daha düşük sıcaklıklara ulaştığı görülmüştür.

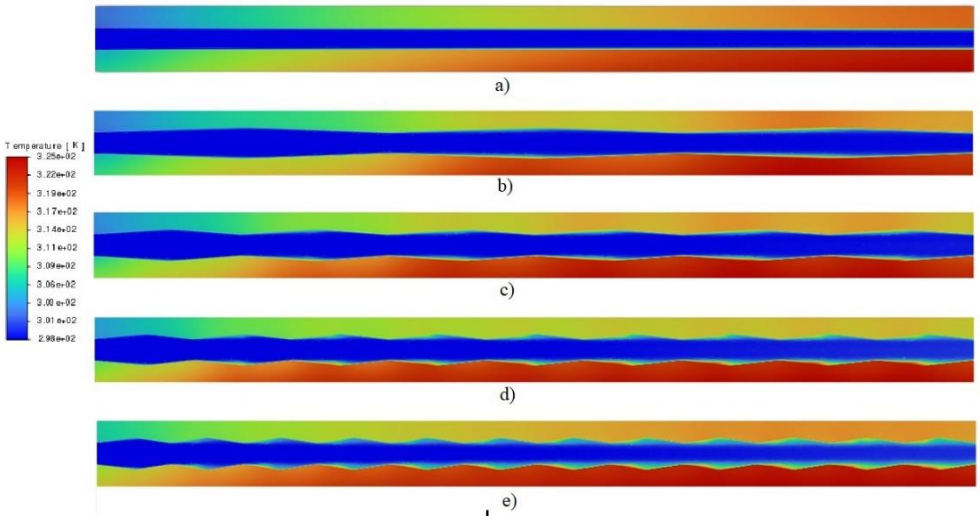


Şekil 7. Reynolds sayısı 2000 için kanal boyunca sıcaklık dağılımları a) Model-A, b) Model-B1 ve c) Model-C1.

Şekil 8'de ise Reynolds sayısı 2000 için, düz kanal geometrisi ve farklı bölme sayılarına sahip daralma-genişleme yapan Model-B geometrileri için elde edilen sıcaklık dağılımları birlikte verilmektedir. Bu şekil aracılığı ile bölme sayısının sıcaklık dağılımı üzerindeki etkileri gözlemlemeye çalışılmıştır. Şekilden incelendiğinde artan bölme sayısı ile kanal yüzeylerinden akışkana doğru gerçekleşen ısı transferinin arttığı görülmektedir. Bu durum kesit daralma ve genişlemesi nedeniyle, akışkan-katı yüzey temas alanının artmasından hem de ısıl sınır tabakanın bozulmasından kaynaklı olduğu öngörülebilir. Bölme sayısı arttıkça, özellikle kanalın üst yüzeylerinde oluşan sıcaklık değerlerinin belirgin bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir.



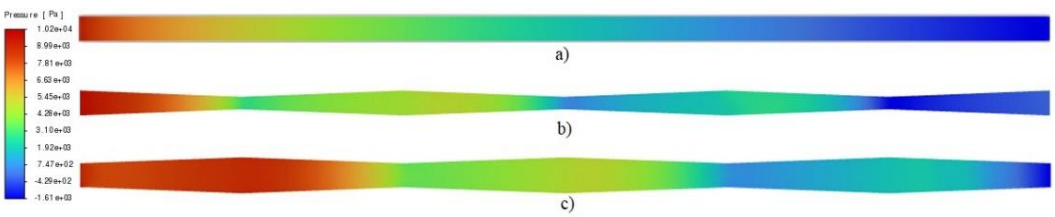
Şekil 8. Reynolds sayısı 2000 için kanal boyunca sıcaklık dağılımları a) Model-A, b) Model-B1, c) Model-B2, d) Model-B3 ve e) Model-B4.



Şekil 9. Reynolds sayısı 2000 için kanal boyunca sıcaklık dağılımları a) Model-A, b) Model-C1, c) Model-C2, d) Model-C3 ve e) Model-C4.

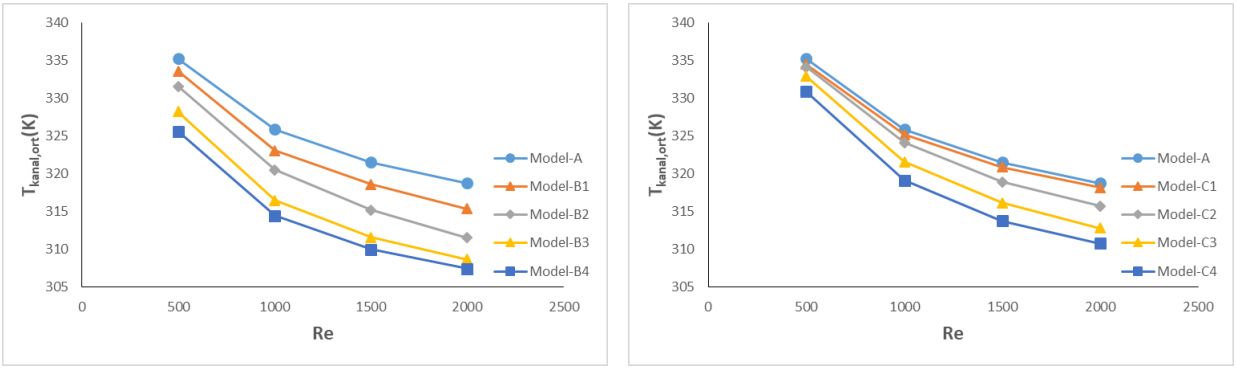
Reynolds sayısı 2000 için, düz kanal geometrisi ve farklı bölme sayılarına sahip genişleme-daralma yapan Model-C geometrileri için elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil 9'da birlikte görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere bölme sayısının değişimi sıcaklık dağılımı üzerinde etkili olmuştur. Genişleyen-daralan kesite sahip modeller içinde, bölme sayısı arttıkça daha iyi bir soğutmanın gerçekleştiği ve kanalın katı kısımlarının sıcaklığının azaldığı görülmüştür. En düşük kanal yüzey sıcaklıkları, en fazla bölmeye sahip modelde gerçekleşmiştir. Ayrıca kanal kesitinin genişleme-daralma bölgelerinde yüzeye yakın bölgelerde su sıcaklıklarının farklılaştığı görülmektedir. Bu durum ilgili bölgelerde sınır tabakanın bozulması ve ısı transferini artması ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Şekil 10'da ise Reynolds sayısı 2000 için düz kanal, daralan-genişleyen kanal ve genişleyen-daralan kanal geometrileri için elde edilen basınç dağılımları birlikte verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere her üç geometride de kanal girişinden kanal çıkışına doğru bir basınç azalması söz konusudur. Ancak en büyük basınç düşüşü Model-B geometrisinde gözlemlenmiştir. Bu durum Model-B geometrisinin, diğer geometrilere oranla daha küçük kesit alanına sahip bölgelerinin bulunması ile ilişkilidir.



Şekil 10. Reynolds sayısı 2000 için kanal boyunca basınç dağılımları a) Model-A, b) Model-B1, c) Model-C1

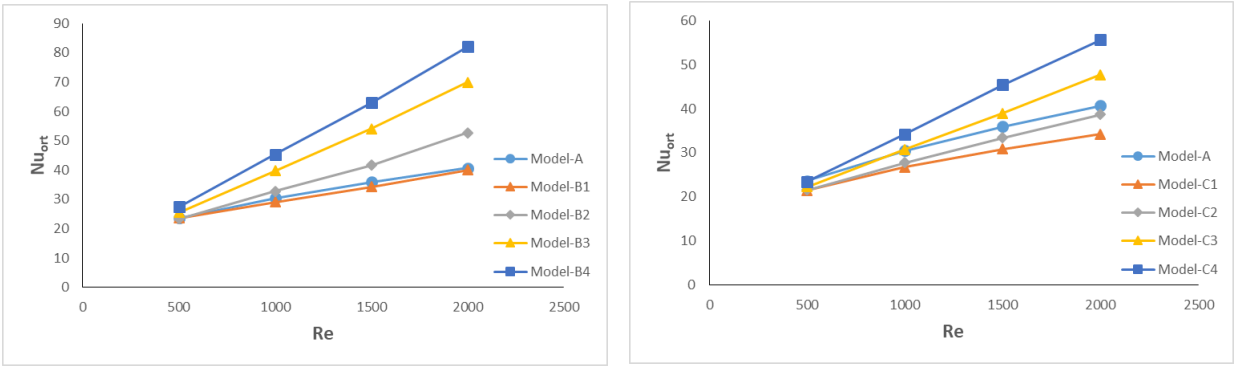
Şekil 11'de kanalın katı kısmının ortalama sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi farklı model geometrileri için birlikte verilmiştir. Şekil incelendiğinde tüm model geometriler için çizilen eğrilerde, Reynolds sayısı arttıkça kanalın katı kısmının ortalama sıcaklığının azaldığı görülmektedir. Bu durumun Reynolds sayısının artışı ile zorlanmış konveksiyonun daha baskın hale gelmesi ile ilişkili olduğu öngörülmüştür. Şekil 11a'da daralan-genişleyen kanal (B modeli) için farklı bölme sayısına sahip modeller, Şekil 11b'de ise bu sefer genişleyen-daralan (C modeli) kanal için farklı bölme sayısına sahip modeller düz kanal (A modeli) ile karşılaştırılmıştır. Her iki şekilden de görüldüğü üzere maksimum kanal sıcaklıkları düz kanal geometrisinde gerçekleşmiştir. Kanalın sahip olduğu bölme sayısında ki artış ile kanalın ortalama sıcaklığında bir azalış gerçekleşmektedir. Dolayısıyla bölme sayısının artışının ısı transferi üzerinde olumlu etkisi olduğu söylenebilir.



a) **b)**

Şekil 11. Farklı model geometrileri için ortalama kanal sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi a) daralan-genişleyen kanal b) genişleyen-daralan kanal.

Şekil 12'de ise ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi farklı model geometrileri için birlikte verilmiştir. Ortalama Nusselt sayısı, akışkanın katı yüzey ile temasta olduğu alt yüzeyin alanı boyunca yerel Nusselt sayısının ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla akışın alt yüzeyinin yüzey sıcaklıkları kullanılmıştır. Bir önceki şekillere benzer olarak, bu şekillerin irdelenmesinde de düz kanal geometrisi için elde edilen sonuçlar referans olarak alınmıştır. Bu sebeple şeklin iki şıkkına da düz kanal için çizilen eğriler eklenmiştir. Şekil 12 incelendiğinde tüm model geometrileri için Reynolds sayısının artması ile Nusselt sayısının arttığı görülmektedir. Şekil 12a'da daralan-genişleyen kanal için farklı bölme sayısına sahip modellerden elde edilen eğriler görülmektedir. En düşük Nusselt sayısı düz kanal için elde edilirken, bölme sayısının artışı ile Nusselt sayısının da arttığı görülmüştür. Tüm Reynolds sayılarında en yüksek Nusselt sayıları bölme sayısının en fazla olduğu 12 bölmeli (Model-B4) modelde gözlemlenmiştir. Benzer olarak Şekil 12b'de ise genişleyen-daralan kanalın modelleri için çizilen eğriler birlikte görülmektedir. Ancak bu kanal geometrisinde 3 ve 6 bölmeye sahip modeller için elde edilen ortalama Nusselt sayısı değerlerinin, düz kanaldan elde edilen sonuçlara göre daha düşük çıktığı görülmektedir. 9 ve 12 bölmeye sahip modeller için elde edilen Nusselt sayıları ise düz kanaldan elde edilenden daha yüksek çıkmıştır. Genişleyen-daralan kanal modelleri içinde, tüm Reynolds sayılarında en yüksek Nusselt sayıları bölme sayısının en fazla olduğu 12 bölmeli (Model-C4) modelde gözlemlenmiştir.

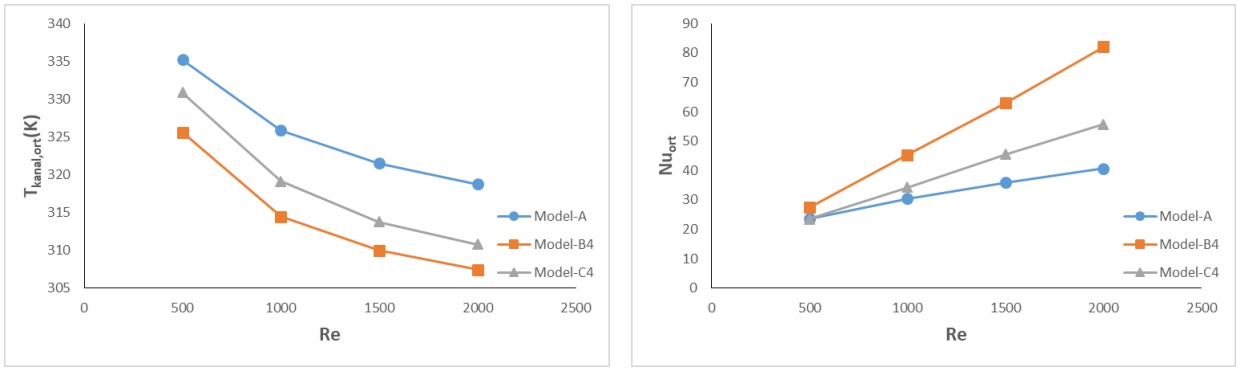


a) **b)**

Şekil 12. Farklı model geometrileri için ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi a) daralan-genişleyen kanal b) genişleyen-daralan kanal.

Bölme sayısı 12 olduğu durumda farklı kanal kesit tipleri için, katı kısmın ortalama sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 13a'da, ortalama Nusselt sayısı ile değişimi ise Şekil 13b'de verilmektedir. Hem Model-B geometrileri hem de Model-C geometrileri için en iyi soğutma performansının 12 bölmeye sahip modellerde elde edildiği yukarıdaki grafiklerde görülmektedir. Bu sebeple bu grafiklerde 12 bölmeye sahip modeller olan Model-B4 ve Model-C4 düz kanal sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 13a'da

görüldüğü üzere ortalama kanal sıcaklığının en düşük değerleri daralan-genişleyen geometride, en yüksek değerleri ise düz kanal geometrisinde elde edilmiştir. Bu durum tüm Reynolds sayıları için geçerlidir. Şekil 13b'de ise ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişim eğrileri görülmektedir. Şekil incelendiğinde daralan-genişleyen kanal için çizilen eğri en üste, düz kanal için çizilen eğri ise en alta yer almaktadır. Dolayısıyla kesit genişlemesi ve daralması işleminin, düz kanala göre ısı transferini olumlu yönde etkilediği söylenebilir. Ayrıca daralma-genişleme işleminin genişleme-daralma işlemine göre ısı transferini olumlu yönde etkilediği ve daha iyi bir soğutma gerçekleştirdiği görülmüştür.

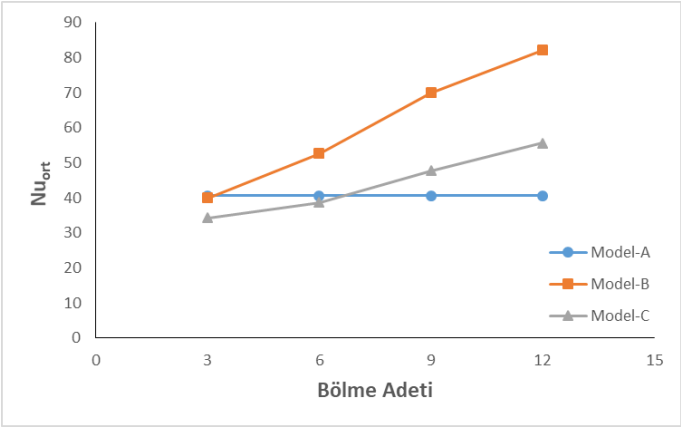


a) **b)**

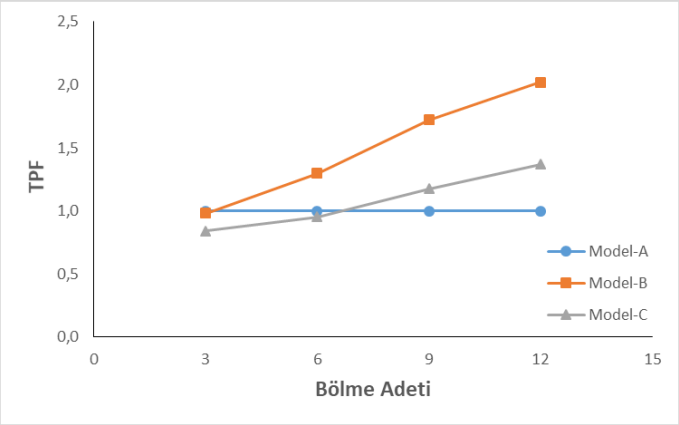
Şekil 13. Bölme sayısı 12 için kanal kesit tiplerinin düz kanal ile karşılaştırılması a) Kanal katı kısmın ortalama sıcaklığı b) Ortalama Nusselt sayısı.

Şekil 14'te Reynolds sayısı sabit 2000 değerinde tutulduğunda, farklı bölme sayısına sahip modeller için elde edilen ortalama Nusselt sayıları birlikte verilmiştir. Düz kanalda herhangi bir kesit değişimi olmamasından dolayı tek bir Nusselt sayısı belirlenip grafikte tüm bölme sayıları için kullanılmıştır. Bundan dolayı düz kanal için çizilen eğri yatay bir çizgi şeklinde görülmektedir. Bu eğri diğer iki eğrinin yorumlanabilmesi açısından bir referans olarak kullanılabilir. Şekilden de görüldüğü üzere hem genişleyen-daralan (Model-C) kanal tipinde hem de daralan-genişleyen (Model-B) kanal tipinde kanalın bölme sayısı arttıkça ortalama Nusselt sayısı da artış göstermektedir. Genişleyen-daralan kesitli kanal düz kanal ile karşılaştırıldığında, küçük bölme adetleri için ortalama Nusselt sayısı daha düşük iken büyük bölme adetlerinde daha yüksektir. Dolayısıyla bu kanal tipinde bölme sayısının sadece yüksek olduğu durumlarda düz kanal tipine oranla ısı transferinin olumlu yönde etkilendiği söylenebilir. Daralan-genişleyen kanal tipinde ise, üç bölmeye sahip durum hariç diğer tüm modellerde ortalama Nusselt sayısının değeri düz kanala göre daha yüksek elde edilmiştir. Özellikle 12 bölmeye sahip kanal için, ortalama Nusselt sayısının yaklaşık olarak %50 oranında artırdığı görülmektedir. Dolayısıyla daralan-genişleyen kesit geometrisinin ısı transferi üzerinde oldukça etkili olduğu söylenebilir.

Reynolds sayısı sabit 2000 olduğu durumda, farklı bölme sayısına sahip modeller için elde edilen termal performans faktörü (TPF) değerleri Şekil 15'te birlikte verilmiştir. Termal performans faktörü, kazanılan ısı transfer oranının kaybedilen basınç farkına (sürtünme kayıpları) oranı olarak tanımlanabilmektedir. Termal performans faktörü için oluşturulan eğriler genel olarak ortalama Nusselt sayısı için elde edilen eğrilere benzer bir profil çizmektedir. Bölme sayısının artması termal performans faktörünün artmasını sağlamaktadır. Düz kanal kesitinin kontrol grubu olarak belirlenerek yapılan bir irdelemede, 12 bölme adetine sahip genişleyen-daralan kesite sahip kanalda TPF değerinin düz kanala oranla yaklaşık %36 ve yine 12 bölme adetine sahip daralan genişleyen kesite sahip modelde ise %100 oranında artış gösterdiği görülmüştür.

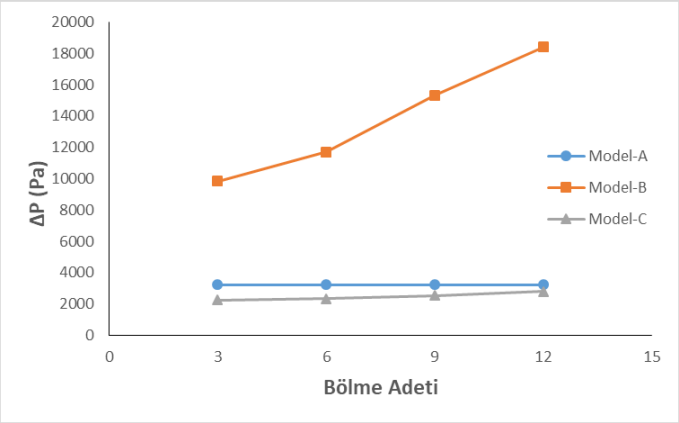


Şekil 14. Reynolds sayısı 2000 olduğunda farklı kesit geometrileri için, ortalama Nusselt sayısının bölme adeti ile değişimi.



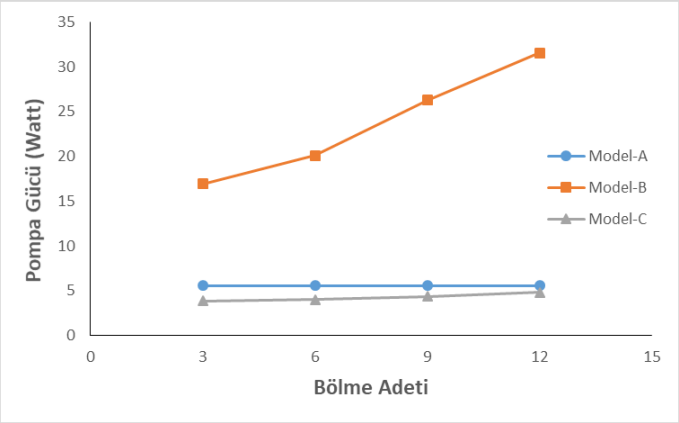
Şekil 15. Reynolds sayısı 2000 olduğunda farklı kesit geometrileri için, termal performans faktörünün bölme adeti ile değişimi.

Şekil 16'da ise Reynolds sayısı 2000 değerinde sabit tutulduğunda farklı kanal kesit geometrileri için, bölme sayısının değişiminin basınç farkı üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Basınç fark değeri, kanal giriş basıncı ile çıkış basıncı arasındaki fark kullanılarak elde edilmiştir. Düz kanal kesiti için elde edilen basınç fark değerleri kontrol grubu olarak seçilir ve diğer kesitler için elde edilen değerler düz kanal sonuçları ile karşılaştırılabilir. Şekil incelendiğinde genişleyen-daralan kanal tipinde tüm bölme sayıları için elde edilen basınç farkının, düz kanala göre daha düşük olduğu görülmektedir. Genişleyen-daralan kesite sahip kanalda bölme sayısındaki artış kanal girişi ile kanal çıkışı arasında gerçekleşen basınç farkını fazla etkilememiştir. Ancak daralan-genişleyen kesite sahip kanalda durum farklıdır. Bu kanal tipinde bölme sayısının artışı ile basınç fark değeri lineere yakın bir şekilde artış göstermektedir. Tüm bölme sayıları için elde edilen basınç farkı düz kanalın basınç farkına göre çok yüksektir. Daralan-genişleyen kesitte bu denli basınç farkının yükselmesinin sebebi, kanal minimum kesit alanının diğer kanal tiplerine oranla daha küçük olmasıdır. Bu kesit daralması kanal girişi ile kanal çıkış arasında gerçekleşen basınç kayıplarının artmasını etkilemektedir.



Şekil 16. Reynolds sayısı 2000 olduğunda farklı kesit geometrileri için, basınç düşüşünün bölme adeti ile değişimi.

Reynolds sayısı sabit 2000 olduğu durumda, farklı bölme sayısına sahip modeller için elde edilen pompalama gücü değerleri Şekil 17'de birlikte verilmiştir. Pompalama gücü için çizilen eğriler genel profil olarak basınç düşüşü için çizilen eğrilere benzerlik göstermektedir. Düz kanaldan elde edilen sonuçların kontrol grubu olarak kullanılması ile yapılan irdelemede, daralan-genişleyen kesite sahip kanal modellerinde pompa gücünün çok büyük oranda artırdığı, genişleyen-daralan kesite sahip modellerde ise pompa güç değerinin düz kanal kesitinden de düşük olduğu görülmüştür. Bölme sayısındaki artış, genişleyen-daralan kesite sahip kanalda pompa gücünde fazla bir değişime sebep olmaz iken, daralan-genişleyen kesit geometrisine sahip kanalda pompa gücünü artırma yönünde eğilim göstermiştir. Daralan-genişleyen kesite sahip kanalda bu denli pompa gücünün fazla olmasının sebebi, bu kanal tipinde kanal girişi ile kanal çıkışı arasında gerçekleşen basınç farkının çok daha yüksek olmasıdır. Gerçekleşen basınç fark değerinin pompa gücünü artıran yönde bir etki yaptığı görülmektedir. Dolayısıyla daralan-genişleyen kanal geometrisinde kesit daralması ısı transfer performansını artırırken, gerekli olan pompa gücünün de artmasına sebebiyet vermektedir.



Şekil 17. Reynolds sayısı 2000 olduğunda farklı kesit geometrileri için, pompa gücünün bölme adeti ile değişimi

6. Sonuçlar

Bu çalışmada yüksek sıcaklıklara ulaşan elektronik elemanların soğutulması için kullanılan bir mini kanallı ısı alıcısının soğutma performansı incelenmiştir. Bu amaçla, ısı alıcısını oluşturan mini kanallardan bir tanesi sayısal olarak modellenmiştir. Bu mini kanal için kanal uzunluğu boyunca kesit alanı değiştirilerek düz kanal, daralan-genişleyen kanal ve genişleyen-daralan kanal olmak üzere üç ana kanal geometrisi oluşturulmuştur. Ayrıca bu ana model geometrilerinde genişleme ve daralma açıları değiştirilerek farklı bölme sayısına sahip alt geometrik modeller oluşturulmuştur. Tüm bu model geometriler kullanılarak, Reynolds sayısının 500-2000 aralığı için analizler yapılmıştır. Bu sayede bir ısı alıcısında kanal kesit geometrisinin, bölme sayısının ve Reynolds sayısının değişiminin soğutma performansı üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, tüm model geometrilerinde akışın Reynolds sayısının artırılması ile zorlanmış konveksiyonun arttığı, dolayısıyla kanal yüzeylerinden akışkana doğru geçen ısı transferinin arttığı gözlemlenmiştir. Bölme sayısının artışı ile hem daralan-genişleyen hem de genişleyen-daralan kanal tiplerinde Nusselt sayısının artış gösterdiği belirlenmiştir. Dolayısıyla kanalın sahip olduğu bölme sayısının artırılması ısı transferini olumlu yönde etkilemiştir. Elde edilen sonuçlar düz kanal sonuçları ile kıyaslandığında, genişleyen-daralan kesite sahip modelde bölme sayısı 3 ve 6 olduğunda düz kanala göre daha düşük, bölme sayısı 9 ve 12 olduğu durumda ise daha yüksek Nusselt sayıları elde edilmiştir. Ancak daralan-genişleyen kesite sahip kanal tipinde tüm bölme sayılarında diğer kanal tiplerine göre daha yüksek Nusselt sayıları gözlemlenmiştir. Daralan-genişleyen kesite sahip modelin sonuçları düz kanal tipi ile kıyaslandığında, Nusselt sayısının ve TPF değerinin sırasıyla yaklaşık %50 ve %100 kadar artış gösterdiği görülmüştür. Dolayısıyla incelenen parametre aralığında daralan-genişleyen kesite sahip mini kanal geometrisinin ısıl performansının incelenen diğer kanal geometrilere oranla daha yüksek olduğu söylenebilir.

Referanslar

Altay, R. (2020). Fluid mixing efficiency enhancement in microchannels having spiral elliptic and curved structures with various baffle geometries, Master Thesis, Sabancı University, İstanbul, Turkey.

Al-Hasani, H. M., & Freegah, B. (2022). Influence of secondary flow angle and pin fin on hydro-thermal evaluation of double outlet serpentine mini-channel heat sink. Results in Engineering, 16, 100670. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100670

Baş, A. (2021). Al_2O_3 – Saf Su ve Zno – Saf Su Nanoakışkanlarının Farklı Çaplardaki Mini Kanallarda Akışının Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak.

Chen, Y., Chen, K., Dong, Y., & Wu, X. (2022). Bidirectional symmetrical parallel mini-channel cold plate for energy efficient cooling of large battery packs. Energy, 242, 122553. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122553

Çengel, Y. A., & Cimbala J. M. (2006). Fluid mechanics fundamentals and applications (1st ed.). New York, NY: McGraw-Hill.

Foong A. J. L., Ramesh N., & Chandratilleke T. T. (2009). Laminar convective heat transfer in a microchannel with internal longitudinal fins. International Journal of Thermal Sciences, 48(10), 1908–1913. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.02.015

Gao, Y., Wang, C., Wu, D., Dai, Z., Chen, Bo, & Zhang X. (2022). A numerical evaluation of the bifacial concentrated pv-steg system cooled by mini-channel heat sink. Renewable Energy, 192, 716-730. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.153

Incropera, P.F., Dewitt, P. D., Bergman, L. T., & Lavine, S. A. (2007). Fundementals of heat and mass transfer (6th ed.) Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Jha, B. K., & Malgwi P. B. (2021). Interplay of conducting and non-conducting walls on hydromagnetic natural convection flow in a vertical micro-channel with Hall current. Propulsion and Power Research, 10 (2), 155-168. https://doi.org/10.1016/j.jppr.2021.04.001

Kılıç, M., & Şentürk, S. (2019). Gelişmekte olan laminer akışta mini kanallı soğutucu bloğun çok yanıtlı Taguchı yöntemi kullanılarak optimizasyonu. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24(3), 433-450. https://doi.org/10.17482/uumfd.632964

Nemati, H., Moghimi, M., A., & Meyer, J.P. (2021) Shape optimisation of wavy mini-channel heat sink. International Communications in Heat and Mass Transfer, 122, 105172. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105172

Panchal, S., Khasow, R., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R., & Fowler, M. (2017). Thermal design and simulation of mini-channel cold plate for water cooled large sized prismatic lithium-ion battery. Applied Thermal Engineering, 122, 80-90. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.010

Qi, Z., Chen, J., & Radermacher, R. (2009). Investigating performance of new mini-channel evaporators. Applied Thermal Engineering, 29(17-18), 3561-3567. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.06.011

Rao, Z., Wang, Q., & Huang C. (2016). Investigation of the thermal performance of phase change material/mini-channel coupled battery thermal management system, Applied Energy, 164, 659-669. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.021

Saadoon, Z. H., Ali, F. H., & Sheikholeslam, M. (2023). Numerical investigation of heat transfer enhancement using (Fe3O4 and Ag-H2O) nanofluids in (converge-diverge) mini-channel heat sinks. Materials Today: Proceedings, 80, 2983–2996. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.091

Saeed, M., & Kim, M.-H. (2018). Heat transfer enhancement using nanofluids (Al_2O_3-H_2O) in mini-channel heatsinks. International Journal of Heat and Mass Transfer, 120, 671-682. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.075

Sarıca, O., Dinçer K., Önal G., & Ata, S. (2017). The experimental determination of l/d ratio using water in mini channels to analysis of fluid temperature performance with nano particulates. Machines. Technologies. Materials., 11 (7), 353-355.

Şipal, H. (2021). Hfe 7000 Soğutucu Akışkanın Mini Kanallardaki Yoğuşma Özelliklerinin Deneysel Analizi. Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi, Karabük.

Ünverdi, M., Küçük, H., & Yılmaz, M. S. (2020). Mini-kanallı gövde borulu ısı değiştirici tasarımı ve ısınan-soğuyan gövde tarafı deneysel performanslarının karşılaştırılması, Tesisat Mühendisliği Dergisi, 180, 7-29.

Wu H., Wu X., Feng L., & Youshanlouei M. M. (2022). Cooling a central processing unit by installing a mini channel and flowing nanofluid, and investigating economic efficiency. Case Studies in Thermal Engineering, 30, 101719. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101719

Yıldırım O. (2018). Mini Kanallarda Isı Transferinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.

Zhou, J., Cao, X., Zhang, N., Yuan, Y., Zhao, X., & Hardy, D. (2020). Micro-channel heat sink: A review. Journal of Thermal Science, 29, 1431–1462. https://doi.org/10.1007/s11630-020-1334-y

MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

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

UMAGD, (2023) 15(3), 42-48.

10.29137/umagd.1317071

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:03 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue

Araştırma Makalesi / Research Article

Çok Fonksiyonlu DDCC+ Tabanlı Akım-Modlu Dört Bölgeli Çarpma Devresi

Multi-Function DDCC+ Based Current-Mode Four-Quadrant Multiplier Circuit

Tayfun Unuk[1]

[1]*Pamukkale University, Engineering Faculty,Department of Electrical and Electronic Engineering, Pamukkale, TURKEY*

***Başvuru/Received**: 19/06/2023* ***Kabul / Accepted**: 20/07/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Öz

Bu makalede translineer devre teorisi kullanılarak pozitif tip Diferansiye Fark Akım Taşıyıcı (*DDCC+*) ve BJT tabanlı çok fonksiyonlu dört bölgeli akım modlu çarpma devresi önerilmiştir. Devreye ait çıkışların teorik analizlerinin ardından SPICE programında benzetimi yapılmıştır. Benzetim sırasında CA 3046 ve 0.18 µm TSMC CMOS teknoloji parametreleri kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler

"DDDC+, Translineer Devre teorisi, Akım modlu, Çarpma devresi"

Abstract

In this paper, positive type Differential Difference Current Conveyour (DDCC+) and BJT-based multi-function four-quadrant current-mode multiplier circuit is proposed using translinear circuit theory. After the theoretical analysis of the outputs of the circuit outputs, they are simulated in the SPICE program. During the simulation, CA 3046 and 0.18 µm TSMC CMOS technology parameters are used.

Key Words

"DDDC+, Translinear Circuit theory, Current-mode, Multiplication circuit"

***Sorumlu Yazar: tunuk@pau.edu.tr**

1. Giriş

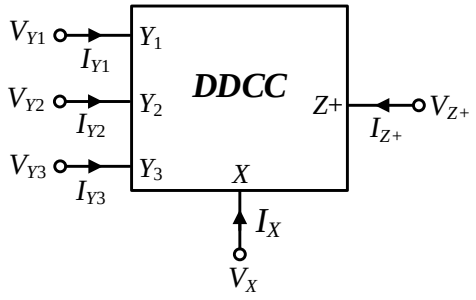
Son yıllarda analog çarpma devreleri; bulanık mantık denetleyicileri, genlik modülatörleri ve yapay sinir ağları gibi pek çok alanda (Tijare & Dakhole, 2010; Panigrahi & Paul, 2013; Keleş & Kuntman, 2011) kullanılmaktadır. Çarpma devrelerini çalışma moduna, giriş sayısı ve çarpma işlemi yapılan bölgeler göre pek çok açıdan sınıflandırmak mümkündür. Çalışma moduna göre çarpma devrelerini genellikle gerilim modlu (Panigrahi & Paul, 2013; Srivastava ve diğerleri, 2014; Tijare & Dakhole, 2010; Kumngern, 2013; Myderrizi ve diğerleri 2011) ve akım modlu (Tangsrirat ve diğerleri, 2011; Lawanwisut ve diğerleri, 2016; dos Santos ve diğerleri, 2021; Kasimis & Psychalinos, 2011; Beyraghi & Khoei, 2015; Keleş & Kuntman, 2011) olarak ikiye ayrılmaktadır. Çalışma modunu belirleyen temel unsur giriş ve çıkış işaretlerinin türünün yanı sıra devrede ağırlıklı olarak işlenen işaretin türü de modların belirlenmesinde önemli etkenlerdendir. Eğer giriş ve çıkış işaretleri akım ise bu tip devreler akım modlu devreler, giriş ve çıkış işaretleri gerilim ise bu tip devreler ise gerilim modlu devreler olarak ifade edilmektedir. Literatürdeki çalışmaları çarpma devrelerinin giriş sayısına göre sınıflandırmak da mümkündür. Literatürde yaygın olarak iki girişli çarpma devreleri (Panigrahi & Paul, 2013; Srivastava ve diğerleri, 2014; Myderrizi ve diğerleri 2011; Kasimis & Psychalinos, 2011; Beyraghi & Khoei, 2015) üzerine çalışılmıştır. Bunun yanı sıra üç girişli (Herath & Wimalarathna, 2018) ve daha fazla giriş imkânı sunan topolojilerde (Saatlo & Ozoguz, 2012; Unuk ve diğ., 2023) mevcuttur. Çarpma devrelerini çarpma işlemi yaptıkları bölgelere göre tek bölgeli, dört bölgeli, sekiz bölgeli vb. olarak sınıflandırmak mümkündür. Bölge ifadesinden kasıt çarpılacak olan işaretlerin negatif ve pozitif değerlerinin birbirleriyle çarpımlarının sonucu oluşan bölgelerdir. Sürekli pozitif değerli olan iki işaretinin çarpılma işlemine tek bölgeli çarpma, farklı frekanslarda hem pozitif hem de negatif değerler alan iki işaretin çarpılma işlemine dört bölgeli çarpma işlemi olarak adlandırılmaktadır. İki işaretin çarpıldığı durumlarda en fazla dört bölgeli çarpma işleminden bahsetmek mümkündür. Eğer işaret sayısı üç olursa bu durumda sekiz bölgeli bir çarpmadan bahsedilebilir. Kısaca n adet işaretin çarpılması sonucunda 2^n bölgeden bahsedilebilir.

Bu makalede translineer devre teorisi kullanılarak, Pozitif tip Diferansiyel Fark Akım Taşıyıcı (*DDCC+*) tabanlı akım modlu çarpma devresi tasarlanmıştır. Bu devrenin benzetimleri SPICE programı kullanılarak yapılmıştır.

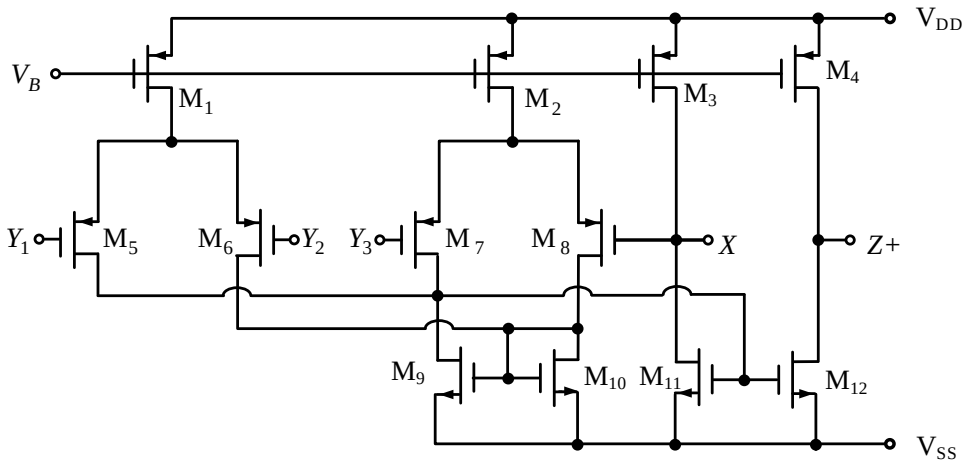
2. Translineer Devre Teorisi ve DDCC+

Translineer devre teorisi ilk olarak 1975 yılında Gilbert (Gilbert,1975) tarafından ortaya atılmıştır. Bu devre teorisi esas olarak p ve n eklemlerinden oluşan diyot, BJT ve MOS transistör gibi yarıiletken elemanların gerilim ve akım ifadelerindeki üstel ilişkiye dayanmaktadır. Bu devre teorisine göre p-n eklemli elemanlardan oluşturulan devrenin kapalı bir çevrim oluşturması ve bu kapalı çevrimdeki saat yönünde kutuplanan eklemlerin saat yönün tersi yönde kutuplanan eklemlerin sayısına eşit olması gerekmektedir. Bu teoriye göre saat yönündeki eklemlerin gerilimlerinin toplamı saat yönünün tersindeki eklemlerin gerilimlerinin toplamı birbirine eşittir.

Devre tasarımında matematiksel kabiliyeti nedeniyle DDCC+ tercih edilmiştir. DDCC+'nın devre sembolü Şekil 1'de gösterilmiştir. DDCC+'nın uç bağıntıları Denklem 1'de verilmiştir. Denklem 1'de α akım kazancını, β, η ve δ gerilim kazancını ifade etmektedir. İdeal durumda bu kazançlar 1'e eşittir. Uç bağıntılarından da anlaşılacağı üzere Y terminallerinden akım akmamaktadır. X ucundaki gerilim, Y_1 ve Y_3 gerilimlerinin toplamından Y_2 geriliminin çıkarılmasıyla elde edilmektedir. X ucunda oluşan akım ise Z+ ucuna kopyalanmaktadır. DDCC+'nın MOS transistör tabanlı iç yapısı (Chiu ve diğ., 1996) Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. *DDCC+*'nın elektriksel sembolü.



Şekil 2. *DDCC*+'nın *CMOS* tabanlı iç yapısı.

$$\begin{bmatrix} I_{Y1} \\ I_{Y2} \\ I_{Y3} \\ I_{Z+} \\ V_X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha \\ \beta & -\eta & \delta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Y1} \\ V_{Y2} \\ V_{Y3} \\ I_X \end{bmatrix} \tag{1}$$

3. Tasarlanan Çok Fonksiyonlu Çarpma Devresi

Önerilen çok fonksiyonlu akım modlu çarpma devresi Şekil 3'te verilmiştir. Devrenin üç çıkışı bulunmaktadır. Bu çıkışlar sırasıyla iki giriş işaretinin çarpılması, ilk giriş işaretinin karesi ve ikinci giriş işaretinin karesi çıkışlarını sağlamaktadır. Devrede üç adet DDCC+ ve on adet harici BJT kullanılmıştır. Q_8 ve Q_{10} transistörleri dışındaki diğer tüm harici transistörler eş transistörlerdir. Q_8 ve Q_{10} transistörlerinin emiter alanları diğer harici transistörlerin emiter alanlarının iki katına eşittir. Translineer denklemi oluşturan BJT'lerin karakteristik denklemi Denklem 2'de veriliştir. Buradan V_{BE} gerilimi Denklem 3'teki gibi elde edilebilmektedir. Şekil 3'teki devrede gösterilen Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 ve $DDCC_1$+'nın oluşturduğu translineer denkleme ait eşitlik Denklem 4'de verilmiştir. Denklem 4'deki baz-emiter gerilimi ifadeler yerine Denklem 3'teki ifade yazılacak olursa Denklem 5 elde edilir. Denklem 5'deki gerekli matematiksel sadeleştirmeler ile Denklem 6'daki eşitlik elde edilir. Denklem 6'deki kollektör akımları yerine Şekil 3'te belirtilen giriş akımları yazılırsa, I_{Z1+} akımı Denklem 7'deki gibi elde edilir. Şekil 3'te gösterilen I_{Z1+} akımının, I_F akımının, Q_3-Q_5 ve Q_1-Q_6 akım aynalarının etkileri ile oluşan ilk çıkış akımı Denklem 8'te verilmiştir.

$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T} \tag{2}$$

$$V_{BE} = V_T \ln\left(\frac{I_C}{I_S}\right) \tag{3}$$

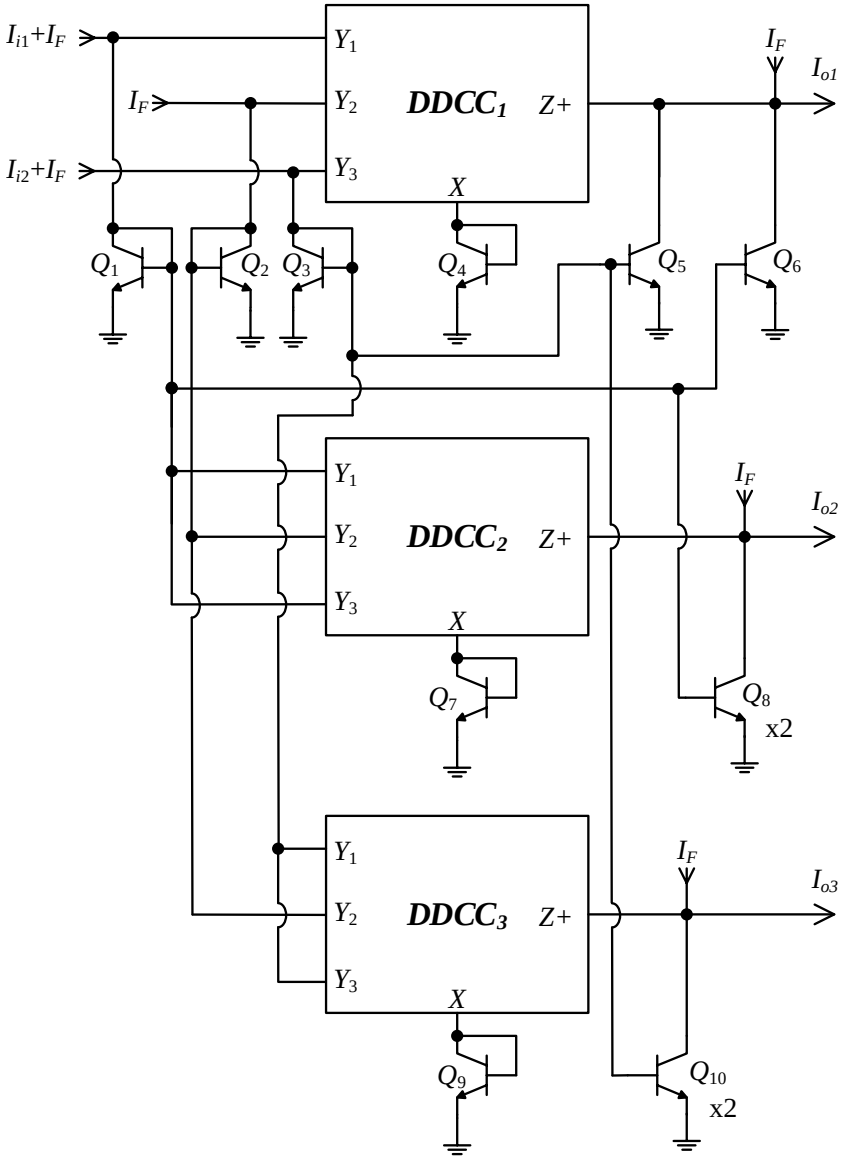
$$V_{BEQ_4} = V_{BEQ_1} + V_{BEQ_3} - V_{BEQ_2} \tag{4}$$

$$V_T \ln\left(\frac{I_{CQ_4}}{I_S}\right) = V_T \ln\left(\frac{I_{CQ_1}}{I_S}\right) + V_T \ln\left(\frac{I_{CQ_3}}{I_S}\right) - V_T \ln\left(\frac{I_{CQ_2}}{I_S}\right) \tag{5}$$

$$I_{Z1+} = I_{CQ_4} = \frac{I_{CQ_1} \times I_{CQ_3}}{I_{CQ_2}} \tag{6}$$

$$I_{Z1+} = I_{CQ_4} = \frac{(I_{i1} + I_F) \times (I_{i2} + I_F)}{I_F} \tag{7}$$

$$I_{O1} = \frac{I_{i1} \times I_{i2}}{I_F} \tag{8}$$



Şekil 3. Çok fonksiyonlu dört bölgeli akım modlu çarpma devresi.

I_{Z2+} akımı, Denklem 6'da elde edilen I_{Z1+} akımı benzer hesaplamalarla Denklem 9'daki gibi elde edilebilir. Denklem 9'daki kollektör akımları yerine Şekil 3'te belirtilen giriş akımları yazılırsa, I_{Z2+} akımı Denklem 10'daki gibi elde edilir. Şekil 3'te gösterilen I_{Z2+} akımının, I_F akımının, Q_6-Q_8 akım aynasının etkisi ile oluşan ikinci çıkış akımı Denklem 11'de verilmiştir.

$$I_{Z2+} = I_{CQ_7} = \frac{I_{CQ_4} \times I_{CQ_5}}{I_{CQ_2}} \tag{9}$$

$$I_{Z2+} = I_{CQ_7} = \frac{(I_{i1} + I_F) \times (I_{i1} + I_F)}{I_F} \tag{10}$$

$$I_{O2} = \frac{I_{i1}^{\ 2}}{I_F} \tag{11}$$

I_{Z3+} akımı, sırasıyla Denklem 6'da ve Denklem 9'da elde edilen I_{Z1+} ve I_{Z2+} akımı benzer hesaplamalarla Denklem 12'deki gibi elde edilebilir. Denklem 12'deki kollektör akımları yerine Şekil 3'te belirtilen giriş akımları yazılırsa, I_{Z3+} akımı Denklem 13'teki gibi elde edilir. Şekil 3'te gösterilen I_{Z3+} akımının, I_F akımının, Q_5-Q_{10} akım aynasının etkisi ile oluşan üçüncü çıkış akımı Denklem 14'te verilmiştir.

$$I_{Z3+} = I_{CQ_9} = \frac{I_{CQ_3} \times I_{CQ_3}}{I_{CQ_2}} \tag{12}$$

$$I_{Z3+} = I_{CQ_9} = \frac{(I_{i2} + I_F) \times (I_{i2} + I_F)}{I_F} \tag{13}$$

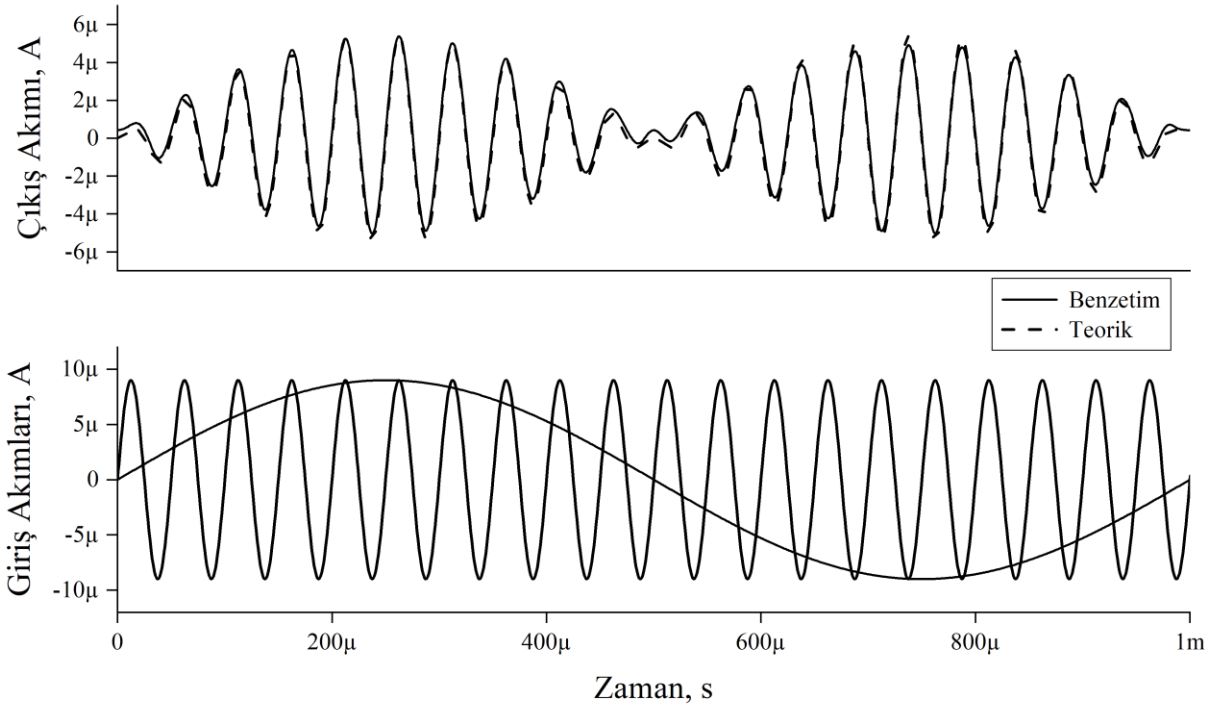
$$I_{O3} = \frac{I_{i2}^{\ 2}}{I_F} \tag{14}$$

4. Benzetim

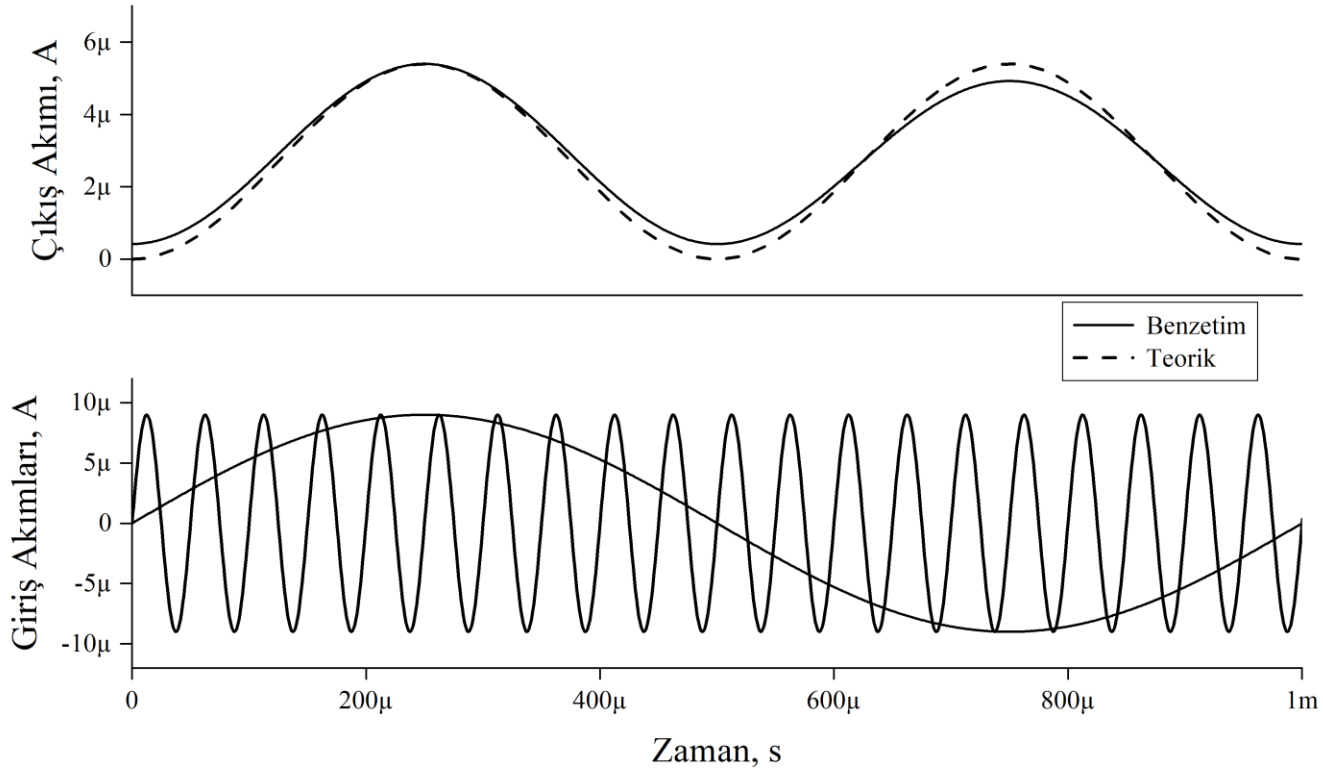
Devrenin benzetimleri SPICE programında yapılmıştır. Tasarlanan devredeki *DDCC*+'nın iç yapısında bulunan MOS transistörler için 0.18 µm TSMC CMOS teknoloji parametreleri (Minaei & Yuce, 2010) kullanılmıştır. Devrede harici olarak bulunana BJT için CA3046 (METU-EEE, 2010) transistör parametreleri kullanılmıştır. DDCC+'ya ait iç yapıdaki besleme gerilimleri V_{DD} = -V_{SS} = 1.25 V ve kutuplama gerilimi V_B= 0.55 V olarak seçilmiştir. Çıkış düğümlerinde, çıkış katlarında bulunan transistörlerin çalışabileceği bir potansiyel fark bulunmalıdır. İç yapıdaki MOS transistörlerin en boy oranları Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 3'te önerilen devrede I_{i1}= 9 µA (1 kHz), I_{i2}= 9 µA (20 kHz) ve I_F = 15 µA olarak seçilmiştir. Elde edilen çıkışlara ait benzetim sonuçları ve teorik sonuçlar sırasıyla Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.

Tablo 1. MOS transistörlerin en boy oranları

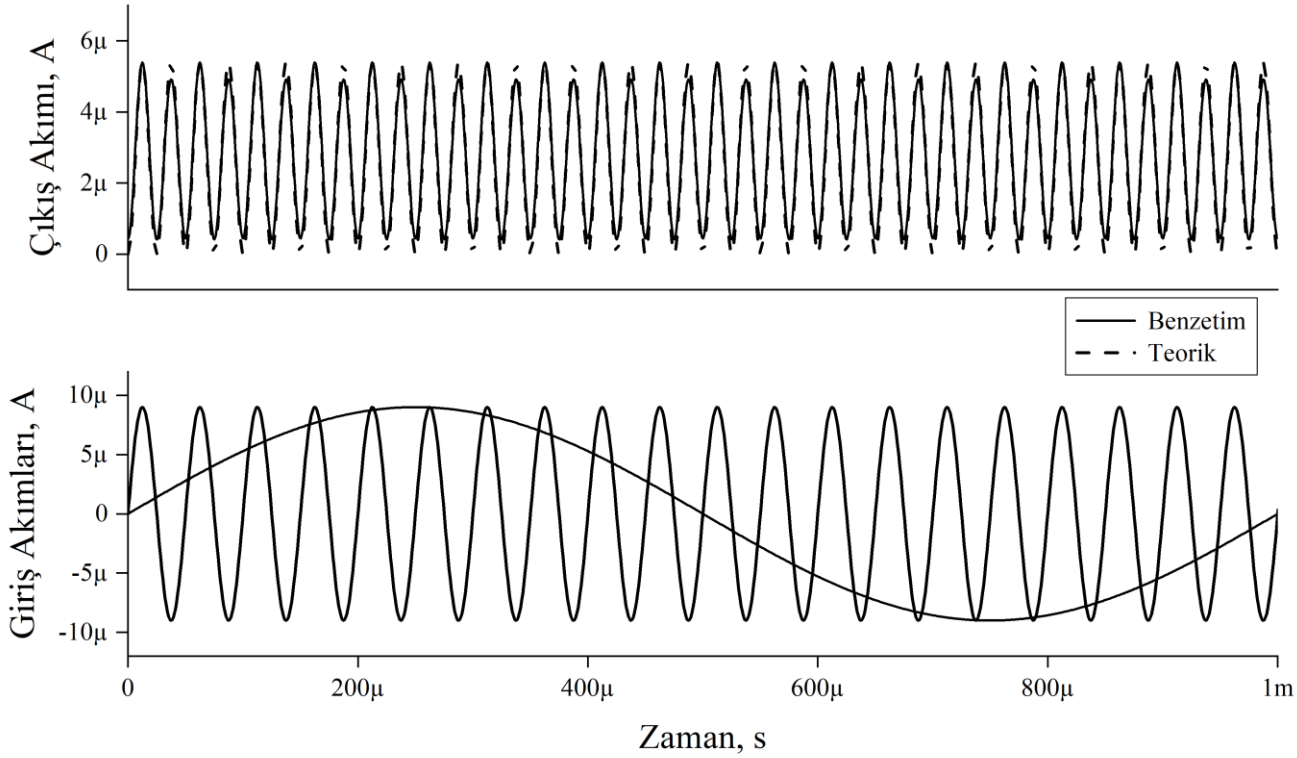
MOS Transistors		*W* (µm)	*L* (µm)
PMOS	M_1-M_8	39	0.5
NMOS	M_9-M_{12}	13	



Şekil 4. Şekil 3'te verilen devrenin birinci çıkışına ait zaman ortamı benzetim ve teorik sonuçları.



Şekil 5. Şekil 3'te verilen devrenin ikinci çıkışına ait zaman ortamı benzetim ve teorik sonuçları.



Şekil 6. Şekil 3'te verilen devrenin üçüncü çıkışına ait zaman ortamı benzetim ve teorik sonuçları.

5. Sonuçlar

Bu makalede çok fonksiyonlu DDCC+ tabanlı dört bölgeli çarpma devresi önerilmiştir. Tasarlana devreye uygulanan iki farklı frekanstaki işaret uygulanması halinde üç adet çıkış elde edilebilmektedir. Bu çıkışlardan ilki iki giriş işaretini çarpımını sağlamaktadır. İkinci ve üçüncü çıkışlar ise uygulanan her bir girişin karelerini sağlamaktadır. Teorik analizlerin ardından tasarlanan devrelerin CA3046 ve 0.18 µm TSMC CMOS teknoloji parametreleri kullanılarak SPICE programında benzetimleri yapılmıştır. Teorik sonuçlar ile benzetim sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Referanslar

Beyraghi, N., & Khoei, A. (2015). CMOS design of a low power and high precision four-quadrant analog multiplier. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, *69*(1), 400-407.

Chiu, W., Liu, S. I., Tsao, H. W., & Chen, J. J. (1996). CMOS differential difference current conveyors and their applications. *IEE Proceedings-Circuits, Devices and Systems*, *143*(2), 91-96.

dos Santos, R. B., Souza, G. A., & Faria, L. A. (2021). A novel four-quadrant/one-quadrant multiplier circuit. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, *138*, 153865.

Gilbert, B. (1975). Translinear circuits: A proposed classification. *Electronics letters*, *1*(11), 14-16.

Herath, H. M. V. R., & Wimalarathna, G. H. I. (2018). An Eight-Octant bipolar junction transistor analog multiplier circuit and its applications. *Ceylon Journal of Science*, *47*(2), 143-151.

Kasimis, C., & Psychalinos, C. (2011). 0.65 V class-AB current-mode four-quadrant multiplier with reduced power dissipation. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, *65*(7), 673-677.

Keleş, S., & Kuntman, H. H. (2011). Four quadrant FGMOS analog multiplier. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, *19*(2), 291-301.

Kumngern, M. (2013, June). A DXCCII-based four-quadrant multiplier. In *2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)* (pp. 738-741). IEEE.

Lawanwisut, S., Satthaphol, P., Payakkakul, K., Pipatthitikorn, P., & Siripruchyanun, M. (2016). A temperature-insensitive current-mode multiplier/divider using only double-output VDTA. Procedia Computer Science, 86, 156-159.

METU-Department of Electrical and Electronics Engineering, (2010). EE 313 Analog Electronics Laboratory. İnternet Sayfası: http://homes.ieu.edu.tr/maskar/EEE331/General/Spice_Tutorial_ver2010.pdf Son Erişim: 19.07.2023

Minaei, S., & Yuce, E. (2010). Novel voltage-mode all-pass filter based on using DVCCs. *Circuits, Systems and Signal Processing*, *29*, 391-402. 0.18 um

Myderrizi, I., Minaei, S., & Yuce, E. (2011, May). CCII+ based fully CMOS four-quadrant multiplier. In *2011 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)* (pp. 000759-000762). Ieee.

Panigrahi, A., & Paul, P. K. (2013). A novel bulk-input low voltage and low power four quadrant analog multiplier in weak inversion. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, *75*, 237-243.

Saatlo, A. N., & Ozoguz, S. (2012, June). CMOS design of a multi-input analog multiplier. In *PRIME 2012; 8th Conference on Ph. D. Research in Microelectronics & Electronics* (pp. 1-4). VDE.

Srivastava, R., Gupta, M., & Singh, U. (2014). Low voltage floating gate MOS transistor based four-quadrant multiplier. *Radioengineering*, *23*(4), 1150-1160.

Tangsrirat, W., Pukkalanun, T., Mongkolwai, P., & Surakampontorn, W. (2011). Simple current-mode analog multiplier, divider, square-rooter and squarer based on CDTAs. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, *65*(3), 198-203.

Tijare, A., & Dakhole, P. (2010). VLSI Design of Four Quadrant Analog Voltage-Mode Multiplier and Its Application. In *Information and Communication Technologies: International Conference, ICT 2010, Kochi, Kerala, India, September 7-9, 2010. Proceedings* (pp. 50-54). Springer Berlin Heidelberg.

Unuk, T., Arslanalp, R., & Tez, S. (2023). Design of Current-Mode versatile Multi-Input analog multiplier topology. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, *160*, 154493.

MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

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

UMAGD, (2023) 15(3), 49-63.

10.29137/umagd.1159663

Cilt/Volume:XX Sayı/Issue:XX Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue

Araştırma Makalesi / Research Article

Diagnosing Covid-19 Disease from Computed Tomography Images with Deep Learning and Machine Learning

Gözde Kahraman[1], **Zafer Civelek** [2]

[1,2]*Çankırı Karatekin University, Engineering Faculty, Çankırı, TURKEY*

***Başvuru/Received**: 09/08/2022* ***Kabul / Accepted**: 21/07/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Abstract

The new virus disease (COVID-19) first came to China towards the end of December 2019 and became a pandemic all over the world. The disease caused a large number of people to be infected and die. Rapid diagnosis of the disease is of great importance in controlling transmission. A computed Tomography device provides successful results in the diagnosis of COVID-19 disease. In this study, two-class (COVID-19 and normal) data sets were created from 7200 lung Computed Tomography images diagnosed between March 2020 and November 2020 in a private hospital with the help of specialist physicians. Verification and testing processes were carried out on Artificial Neural Network (ANN), Support Vector Machine (SVM), K-Nearest Neighbour (KNN) algorithms from Machine Learning algorithms, and ResNet-50, DenseNet-201, InceptionResNetV2, Inceptionv3, VGG-16, Xception architectures from Deep Learning models. As a result of the studies, the DenseNet-201 architecture obtained the highest result from deep learning models with %99,35 training and test %98,75 accuracy rates, respectively. ANN %97,6, KNN %97,4 and SVM %96,9 accuracy rates were obtained from machine learning.

Key Words

"Cnn, Covid-19, Deep learning, Knn, Svm"

***Sorumlu Yazar:** gozde__kahraman@hotmail.com*

1. Introduction

COVID-19 first appeared in the seafood and animal market in Wuhan Province, China, towards the end of December 2019. As a result of research on a group of patients, symptoms such as fever, cough, and shortness of breath were observed, and it was named COVID-19 on January 13, 2020. The disease has turned into a pandemic by spreading from Wuhan to Hubei province and from there to all other provinces of the People's Republic of China and all countries of the world. COVID-19 disease is caused by severe acute respiratory syndrome coronavirus two (SAR-CoV-2) viruses. The main symptoms of COVID-19 disease include shortness of breath, cough and fever. As the disease worsens, pneumonia, severe respiratory failure, kidney failure, and death can occur. Some patients may not show any symptoms. The disease can usually be transmitted by inhaling the infected droplets spread by the person carrying the virus to the environment during coughing or sneezing by another person. Even if a healthy person touches the surfaces contaminated by respiratory particles of this carrier patient and touches their face, nose and eyes with their unclean hands, the disease can be transmitted (Yang et al.,2020; Brunese et al.,2020; Wang et al.,2020; Demirbilek, 2021).

According to the World Health Organization (WHO) 's updated data on 10 july 2023, 767,726,861 confirmed cases were detected and 6,948,764 deaths occurred (URL, 2023). As can be seen from the increasing number of cases and deaths, it is of great importance that people carrying the virus be diagnosed and isolated as soon as possible to reduce transmission. For the diagnosis of COVID-19 disease, WHO recommends and uses the Real-Time PCR (Polymerase Chain Reaction) test, which detects the presence of antigen from respiratory samples. PCR test results can vary according to hospital protocols, usually between a few hours and a day or two (Boeckmans. J & et al,2021). In addition, Numerous studies have been conducted to control the spread rate of the disease. Deep learning models trained on datasets containing computed tomography images can also assist in the diagnosis of the disease (Gupta et all., 2023). Successful results have been achieved in diagnosing COVID-19 using machine learning models such as SVM, KNN, DT, and Naive Bayes (Albataineh et all., 2022). In order to diagnose COVID-19, a two-dimensional (2D) tunable Q-wavelet transform (TQWT) based on a memristive crossbar array (MCA) has been employed for the decomposition of chest X-ray images from two distinct datasets (Jyoti et all., 2023). In another study, computed tomography devices and X-ray imaging methods of the lungs were utilized (Li and Xia, 2019).
In the article, there are 4 main sections after the introduction. In the second part, there is a short literature review on the diagnosis of COVID-19 disease with Artificial Intelligence. In the third section, general information about the methods presented in the article is given. Chapter 4 contains the experimental results of the study. Chapter 5 contains conclusions and recommendations.

2. Related Works

It can be stated that the use of Artificial Intelligence studies for medical diagnoses has many advantages such as saving time, more accurate diagnoses and helping specialist physicians to work efficiently. With the COVID-19 epidemic, many studies have been carried out using artificial intelligence and lung images around the world. In these studies, disease diagnoses were conducted by using Convolutional Neural Networks **(**CNN), Deep Neural Networks (DNN), and Machine learning. The results of these studies show that imaging lungs with Computed Tomography provide high success in diagnosing the disease more quickly.

Govardhan Jain Et Al. has implemented a four-stage deep network model design for rapid diagnosis of COVID-19 disease, using existing resources and advanced deep learning techniques by classifying 1832 X-ray images as healthy, bacterial, and other viral origins. Obtained results of this study show %97,77 classification accuracy and %97,14 accuracies for COVID-19 disease diagnosis (Jain. G & et all, 2020). Shuo Wang and Wang's colleagues created a dataset containing 5372 images from seven different cities for the diagnosis of COVID-19 disease from lung computed tomography images. Performed operations on four external validation sets, yielding %86 AUC from viral pneumonia %87 AUC from other pneumonia. The systems succeeded in dividing patients into high and low risk groups (Wang et all., 2020).

Y.Pathak et al. obtained %96,22 training and %93,1 test accuracy rate by using the CNN architectural model for the diagnosis of COVID-19 infected patients (Pathak et al., 2020). Ghulam Gilanie and Gilanie's colleagues proposed an automated detection system for COVID-19 disease using CNN networks. The average accuracy of the proposed method was %98,68 (Gilanie et al., 2021).

Zhua Tao et al. created a dataset by combining aggregated datasets from previous studies and new images from the healthcare institution and conducted training and testing on different deep CNN networks (Zhou. T & et al, 2021). M.Turkoglu proposed the ELM-based Deep Neural Network (ELM-DNN) method for lung CT images for the diagnosis of disease and performed deep feature extraction from CNN and CT images. The proposed model for the diagnosis of the disease achieved a success rate of %98,28 (Turkoglu, 2021). Lu Huang et al. classified lung Computed Tomography images for the diagnosis of COVID-19 disease as mild, moderate, severe and critical according to the laboratory and clinical picture of the patients. The study was compared with commercial software and follow-up CT images (Huang et al., 2020).

Ophir Gozes et al. created a dataset from a large number of international CT images for the diagnosis of COVID-19 disease. Using 2D and 3D Deep Learning models, they presented a system that modifies and adapts existing AI models and combines them with clinical understanding. They analyzed the performance of the system by detecting the COVID-19 thoracic Computed Tomography features and used 3D skin examination. Ophir Gozes et al. performed a retrospective experiment to create a "Corona score" by evaluating the evolution of the disease over time in each patient. The dataset included a test set of 157 international patients. As a result of their study, classification results for coronavirus and non-coronavirus cases per thoracic Computed Tomography studies achieved an accuracy of %99,6 AUC (%95 CI: 0,989-1,00). The probable study point of COVID-19 cases in China obtained %98,2 sensitivity and %92,2 specificity (Gozes, 2020).

D. Javor et al. developed a simplified Deep Learning-derived machine learning classifier for the diagnosis of COVID-19 disease. They divided the dataset consisting of 6868 CT lung images of 418 open-source patients into training and validation subsets. They obtained %95,6 Area Under The Curve (AUC) overall accuracy in the independent test dataset of 90 patients (Javor et al., 2020). Song Ying et al. created a data set from CT images of 88 patients diagnosed with COVID-19, 101 patients with bacterial pneumonia, and 86 healthy people from hospitals in two cities in China for diagnosis of COVID-19 disease. They developed a Computed Tomography diagnostic system with Deep Learning methods for the diagnosis of the disease. As a result of their studies, they obtained %95 AUC, %96 recall (sensitivity) and %79 precesion (Y, Song et al., 2021).

3. Background

A total of 9 different studies from Deep learning and Machine learning models were carried out with the classification method for the diagnosis of covid-19 disease. It aims to determine the model that gives the highest accuracy among these methods used in diagnosing the disease.

3.1. Convolutional neural network (CNN)

Artificial Neural Networks are models of computational systems developed by taking the learning ability of the human brain as an example. The human brain has a large number of nerve cells (neurons) connected by synapses. Artificial neural networks emerged as a result of the artificial creation of human synapse and neuron connections (Song et al., 2021). Each artificial neuron is connected to another artificial neuron. Each of these links has its value. Link values contain learned information. The network obtained by connecting artificial nerve cells is called an artificial neural network. Artificial neural networks consist of three layers, the input layer, the hidden layer and the output layer. The input data is included in the network in the input layer, where every input data is transferred to the hidden layer. The hidden layer is the layer where the new data coming from the input is processed, the number of hidden layers may vary according to the structure of the network. A new output value is generated for each input value in the output layer. There are studies in many different fields with Artificial Neural Networks (Abiodun et al., 2018; Sivari et al., 2020). Artificial neural networks determine an output value for each input value (Etyemez, 2019; Dongare et al., 2018). Epochs 30 was preferred in the ANN model in the study, and cv 5 was chosen using the Cross-Validation method for validation.

Convolutional Neural Network (CNN) is a class of neural networks that are organized form of multilayer perceptrons. It was first proposed by Hubel and Wisel in 1960 (Hubel. D & H.Wiesel, 1962). CNN's have reduced the complexity of traditional neural networks in various manners. CNN networks are advantageous because they require less preprocessing. It has applications in many different fields such as image recognition, image classification and natural language processing (Orman et al. ,2021; Türk et al., 2020; Küçük, 2021).By extracting the properties of the data given to the architecture, correlations within the data are made and classified. CNN networks consist of three main parts; the Convolutional Layer, Pooling Layer and Fully Connected layer.

The input layer is the part of the CNN networks where the raw pixel values of the new image coming from the input are located. The data from the input is transferred to the Convolution Layer of the CNN. The Convolution layer is the most basic layer where the convolution operation is applied (Liu et al., 2021). The images from the input are detected and mapped by extracting the features of the images. A certain number of filters are used for the image to extract the features of the images. It performs matrix multiplications by moving filters over images. The convolution operation applied to the image reveals a form of activation. The activation process allows the linear variables of some input data to be changed (Qian et al., 2018). In CNN networks, the input layer is the input part of CNN networks where the raw pixel values of the image newly introduced to the network are included. The data from the input is transferred to the Convolution Layer of the CNN.

The Convolution layer is the most basic layer where the convolution operation is applied (Wei et al., 2020). The main purpose of the convolution layer is to detect the images coming from the input by removing their attributes. Each image comes from the input consisting of pixels with certain values. Matrices with dimensions smaller than the input data try to extract definite features by scanning the images. Matrix multiplications are performed by moving filters over the images while the images are indefinite matrices. A certain number of filters are applied to the images to extract the features of the images. Convolution operations in CNN networks update parameter values by performing multiplication operations continuously. Since CNN networks are deep networks,

they can contain very loaded parameters. The convolution process applied to the image reveals a form of activation. The activation process allows changing the linear variables of some input data.

In this study, the sigmoid activation function was used for all architectures. The sigmoid activation function interprets the preceding values and obtains values between 1 and 0. The sigmoid activation function achieves successful results in classification problems. The image is transferred to the pooling layer after the convolution layer. The main purpose of this layer is to reduce the number of parameters in the network. Reducing the parameters allows concentrating on more definite features while ignoring insignificant features. Data in matrix form passing through the convolution and pooling layer in a certain cycle is converted fully connected layer, neurons from the preceding layer are completely interconnected in the flattened part. They are then correlated with the selected density function. The output layer of the network is the part where the result values are labeled. In this study, lung images diagnosed with COVID-19 were labeled '1' and healthy lung images were labeled '0'. Epochs for training 30, batch size 20. Rotation rate in the data augmentation section, rotation range width and height shifts were specified. The basic CNN architectural layers are given in figure 1.

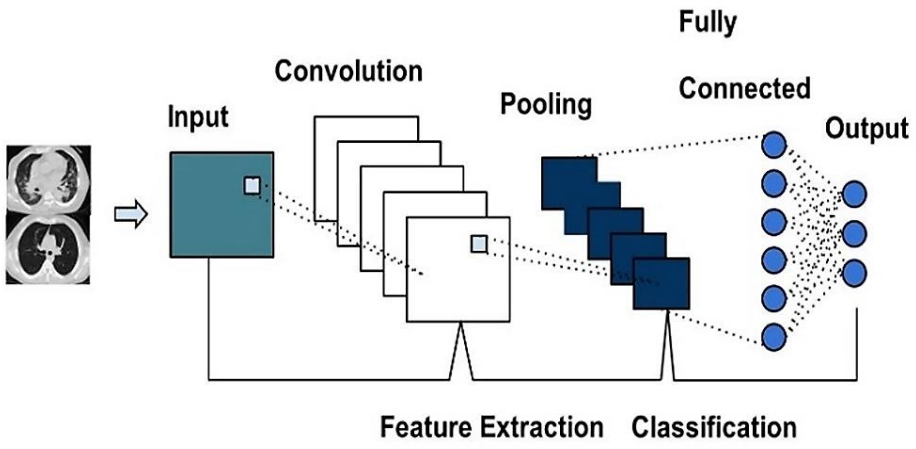


Figure 1. The Basic CNN Architectural Layers

3.2. K nearest neighbours (KNN)

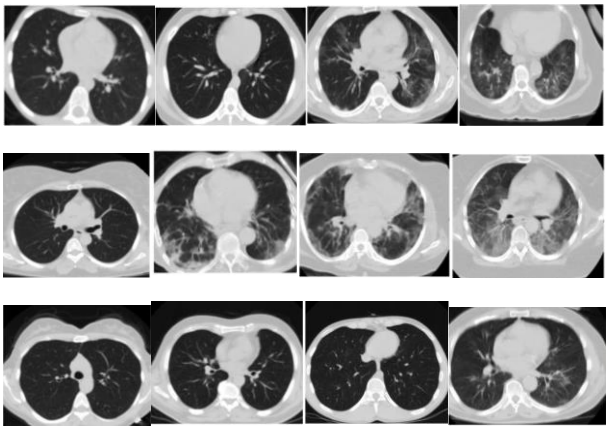
K is the nearest neighbor classification algorithm. It was first proposed by T.M. Civer and P. E. Hart in 1967. It is preferred in solving classification and regression problems (Shaban et al., 2020; Kaya et al., 2018). In the KNN algorithm, a K value is determined first. This K value represents the number of nearest neighbors found according to the given point. This K value represents the number of nearest neighbors found according to the given point. In this case, for the determined K value, the classification is performed according to the distance from the neighbor as much as the nearest K value. The distance of the new data to be included in the data set is calculated one by one according to the existing data. Euclid, Manhattan, and Minkowski distances are used to calculate the distance between them. In this study, K values were 1,3,5,10 and 20, respectively, and the Euclidean function was used for distance calculation.

3.3. Support vector machine (SVM)

Support Vector Machine is a supervised learning algorithm based on statistical learning theory, which is generally used in classification problems. It was first founded in 1963 by Vladimir Vapnik and Alexey Chervonenkis. The main purpose of classification problems is to predict which class the new data will belong to (Dixit et al., 2021). To make the classification, a line is drawn between the two classes. The region between the two lines (1,-1) is called the margin.

3.4. Dataset

In this study, a data set consisting of 7200 images was created together with specialist doctors from the lung Computer Tomography device images of adult patients from the radiology department of a private hospital, which has not been used in



any study before March 2020 and November 2020. The images selected for the datasets were created from definitively diagnosed cases. The total image data in the dataset were used for training, validation and testing. Two different classes were used in the study. The first of these classes consists of images with a definite diagnosis of COVID-19, and the second consists of images of healthy lungs. Test image data was generated by randomly selecting positive and negative images.In Figure 2, images from our own dataset are displayed.

Figure 2. Sample Images from The Dataset

4. Experimental Results

Python language and Keras library were used in classifications for the diagnosis of COVID-19 disease. The results of the models used in the study should be interpreted statistically, and the accuracy and errors of the estimated values should be evaluated crosswise. For this, the results of Precision, recall, F-measure, accuracy and Receiver Operating Characteristics Curve criteria, sensitivity, and specificity were evaluated.

True Positives (TP) = Accurate estimation of the data diagnosed positives as positives.

True Negatives (TN) = Accurate estimation of negatives data.

False Positives (FP) = Inaccurate estimation of the negatives data as positives.

False Negatives (FN) = Inaccurate estimation of the data diagnosed positives as negatives.

Accuracy = The sum of all correctly predicted True Positives (TP) True Negatives (TN) values in the model to the total number of data, to the sum of True Positives (TP), True Negatives (TN), False Positives (FP), False Negatives (FN) values is the rate.

$$Accuracy = (TP + TN)/(TP + FP + FN + TN) \quad \text{(I)}$$

Precision = It is expressed as the ratio of the correct prediction positives diagnosed data (TP) to the sum of incorrectly estimated positives data (FP) and correctly estimated positives data (TP).

$$Precision = (TP)/(TP + FP) \quad \text{(II)}$$

Recall = The ratio of the correctly estimated positive diagnosed data (TP) to the total of the correctly estimated positives data (TP) by incorrectly estimating the negative diagnosed data as positives diagnosed data (FN).

Recall = $(TP)/(TP + FN)$ (III)

F-Score = It is the harmonic mean of Recall and Precision values. Indicates the accuracy of the classification performance.

F-Score =$2 \times (Precesion \times Recall) \times (Precesion + Recall)$ (IV)

Receiver Operating Characteristics Curve (ROC) = Roc is a probability curve. X coordinate of the curve represents False Positives (FP), Y coordinate represents True Positives (TP).

The area under the curve is called the Area Under the Curve (AUC). AUC shows the disaggregated measure and value of the parameters. AUC is the part where the performance of the model is summarized, the size of the area covered improves in direct proportion to the class distinctions of the models used.

Sensitivity = It is obtained by dividing the correctly predicted positive (TP) data by the percentage sums of the correctly predicted positive data (TP) and the positive data that was predicted as negative (FN).

Sensitivity = $(TP)/\ float\ (TP + FN)$ (V)

Specificity = It is obtained by dividing the correctly predicted negative data (TN) by the sum of the correctly predicted negative data (TN) and the negative data that was predicted as positive (FP).

Specificity = $(TN)/\ (TN + FP)$ (VI)

The confusion matrix has been utilized to test the accuracy rates of the models. It compares the real and predicted classes of the data divided into two sets. By using the confusion matrix, classification results have been obtained, and the correct or incorrect values of the predictions have been presented in a table format.

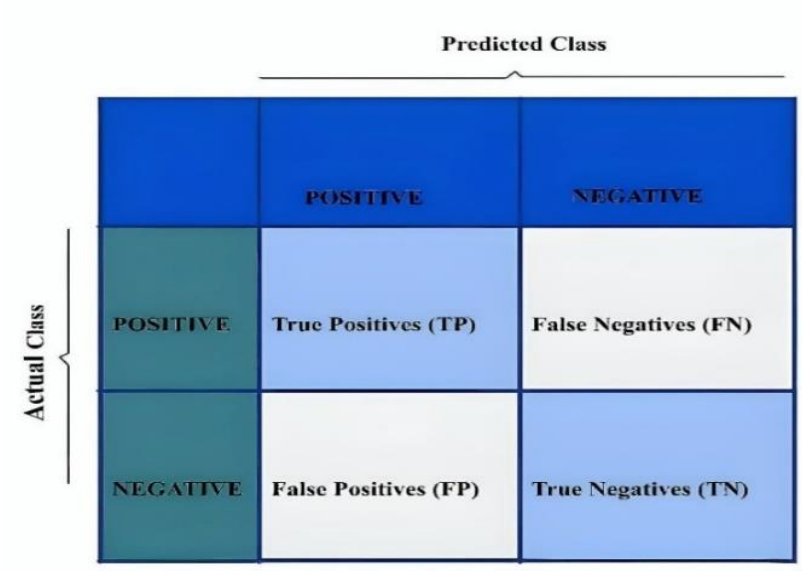


Figure 3. Confusion Matrix Basic Notation

4.1. Results from the CNN models

Training and testing processes were carried out on CNN models. AUC, train accuracy and test accuracy values obtained from 6 different CNN models are given in table 1. Precision, recall and f-score values obtained from 6 different CNN models are given in table 2. Based on table 1 and table 2, when we take the accuracy value as a reference, it could be stated that Densenet architecture is slightly more successful than other models in the test results.

This situation draws attention as a result of the densely connected layer structure of the Densenet architecture and its success in classification. Figure 4 shows the accuracy, sensitivity and specificity values of six different CNN models. Considering these values, it could be claimed that Resnet-50 and inception-v3 models are more successful than other models for our data set. As a result of the hyperparameters mentioned in figure 5, although it gives parallel results in ROC analysis, it confirms that the Densenet architecture is one step ahead with a slight difference.

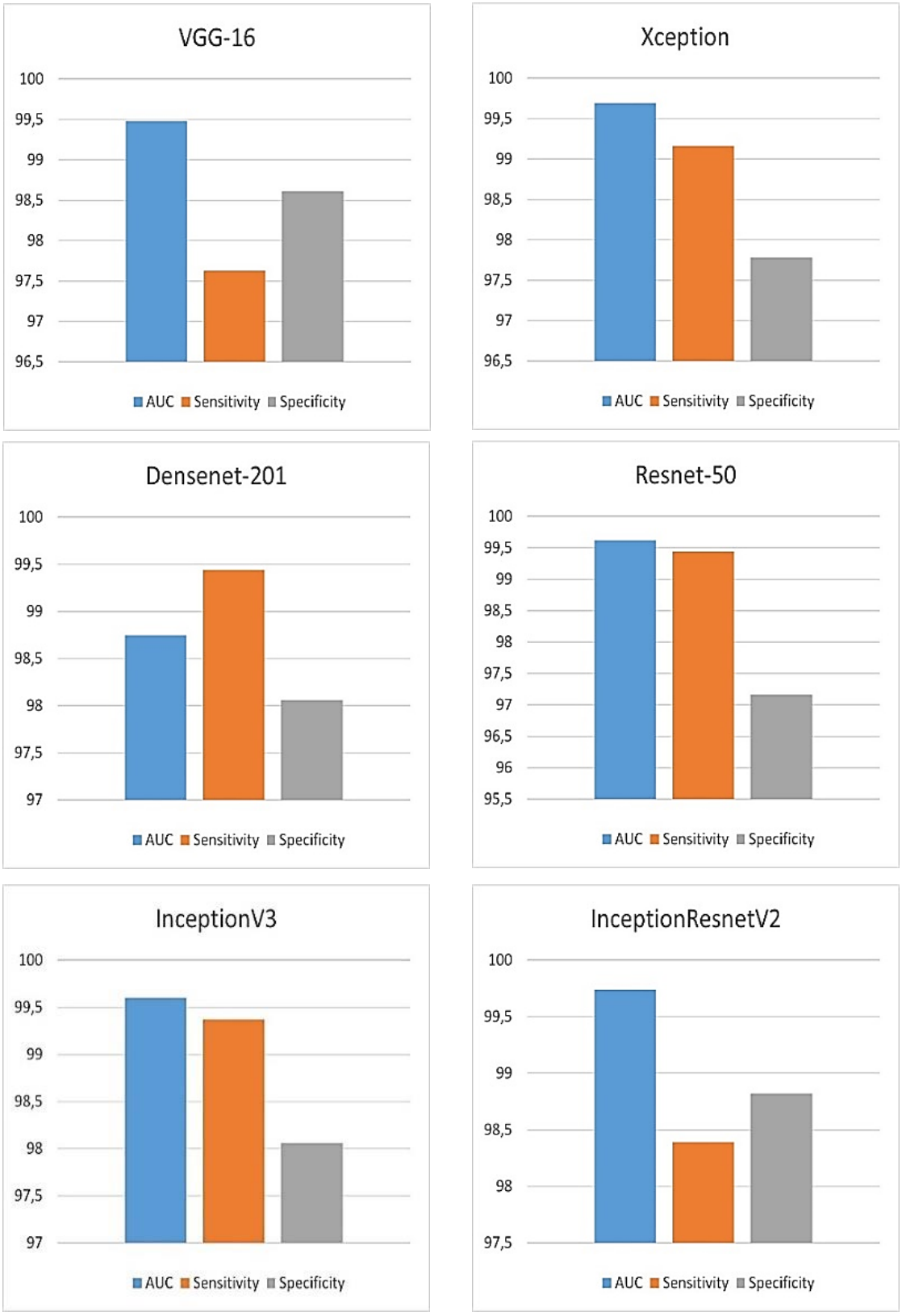


Figure 4. Graphs of AUC, Sensitivity, Specificity Values of All CNN Models

The graphs in Figure 4 display the AUC, sensitivity, and specificity values for each model. The AUC value ranges between 0 and 1. The closer the value is to 1, the better the performance of the selected model. The sensitivity values indicate how accurately the COVID-19 diagnosed data is predicted, while the specificity values indicate how accurately the healthy image diagnosed data is diagnosed.

Table 1 Train Accuracy, Test Accuracy and AUC Values for All CNN Models

Model (%)	Train Accuracy (%)	Test Accuracy (%)	AUC (%)
VGG-16	98,61	98,13	99,48
InceptionResNetv2	99,05	98,61	99,74
ResNet-50	99,44	98,3	99,62
Inception-v3	99,51	98,72	99,6
Xception	99,68	98,47	99,69
DenseNet-201	99,35	98,75	98,75

Table 2 Precision, Recall and F-score Values for All CNN Models

Model	Precision (%)	Recall (%)	F-score (%)
VGG-16	98,59	97,63	98,11
InceptionResNet	98,87	98,39	98,6
ResNet-50	97,21	99,44	98,31
Inception-v3	98,07	99,37	98,72
Xception	98,8	99,16	98,47
DenseNet-201	98,07	99,44	98,75

The precision values in Table 2 represent the ratio of correctly predicted COVID-19 diagnosed data to the total COVID-19 data. On the other hand, recall indicates the ratio of truly predicted COVID-19 data to the total actual COVID-19 data. F-score measures the true performance of the classification model by combining precision and recall values.

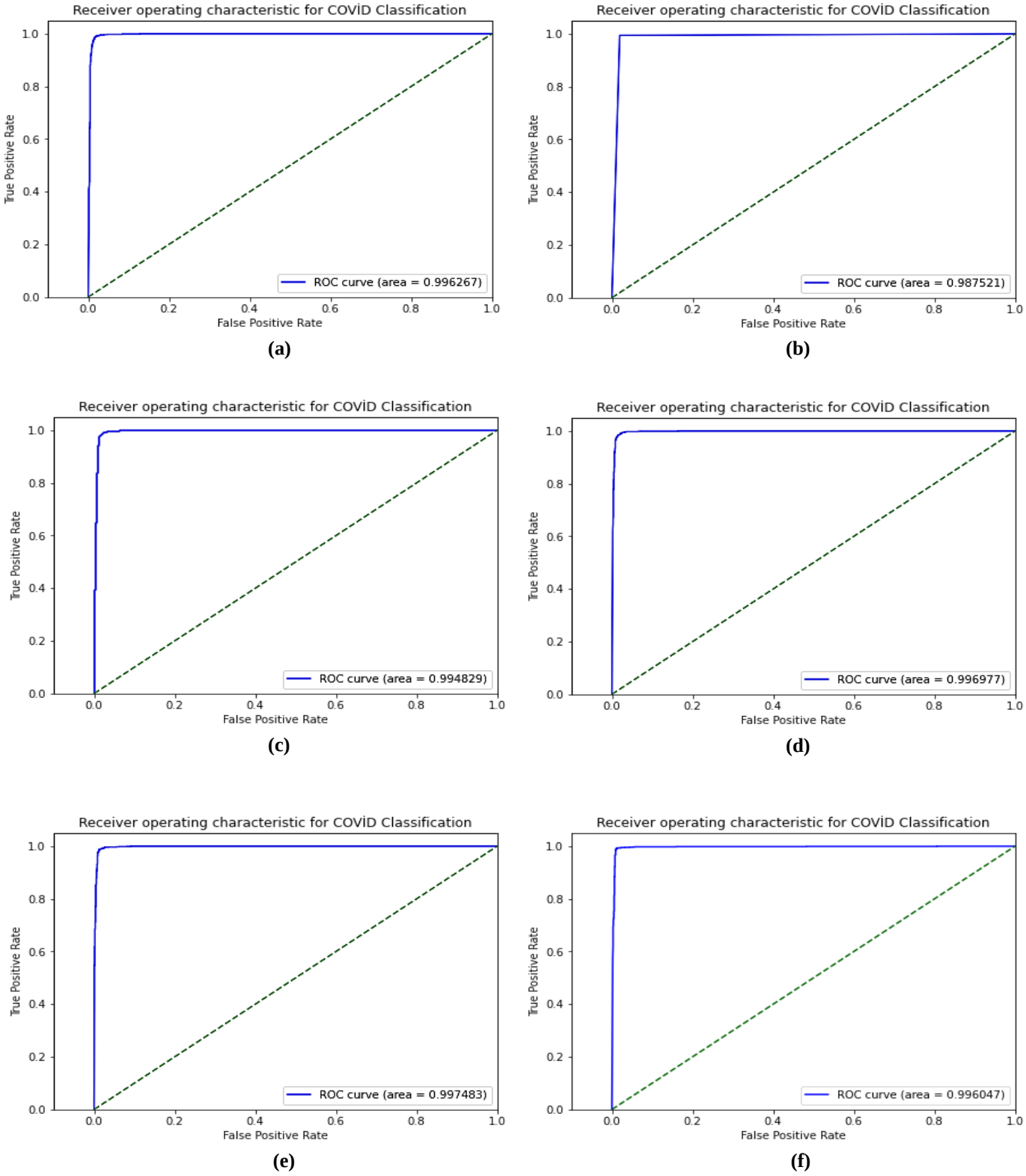


Figure 5. ROC graph of a-) Resnet-50, b-) Densenet-201, c-) VGG16, d-) Xception e-) InceptionResnetv2, f-) Inceptionv3 model

The ROC graph in Figure 5 visualizes the relationship between precision and specificity of the model. The AUC value represents the area under the ROC curve and measures the overall classification performance of the model. A higher AUC value indicates better diagnostic performance of the model.

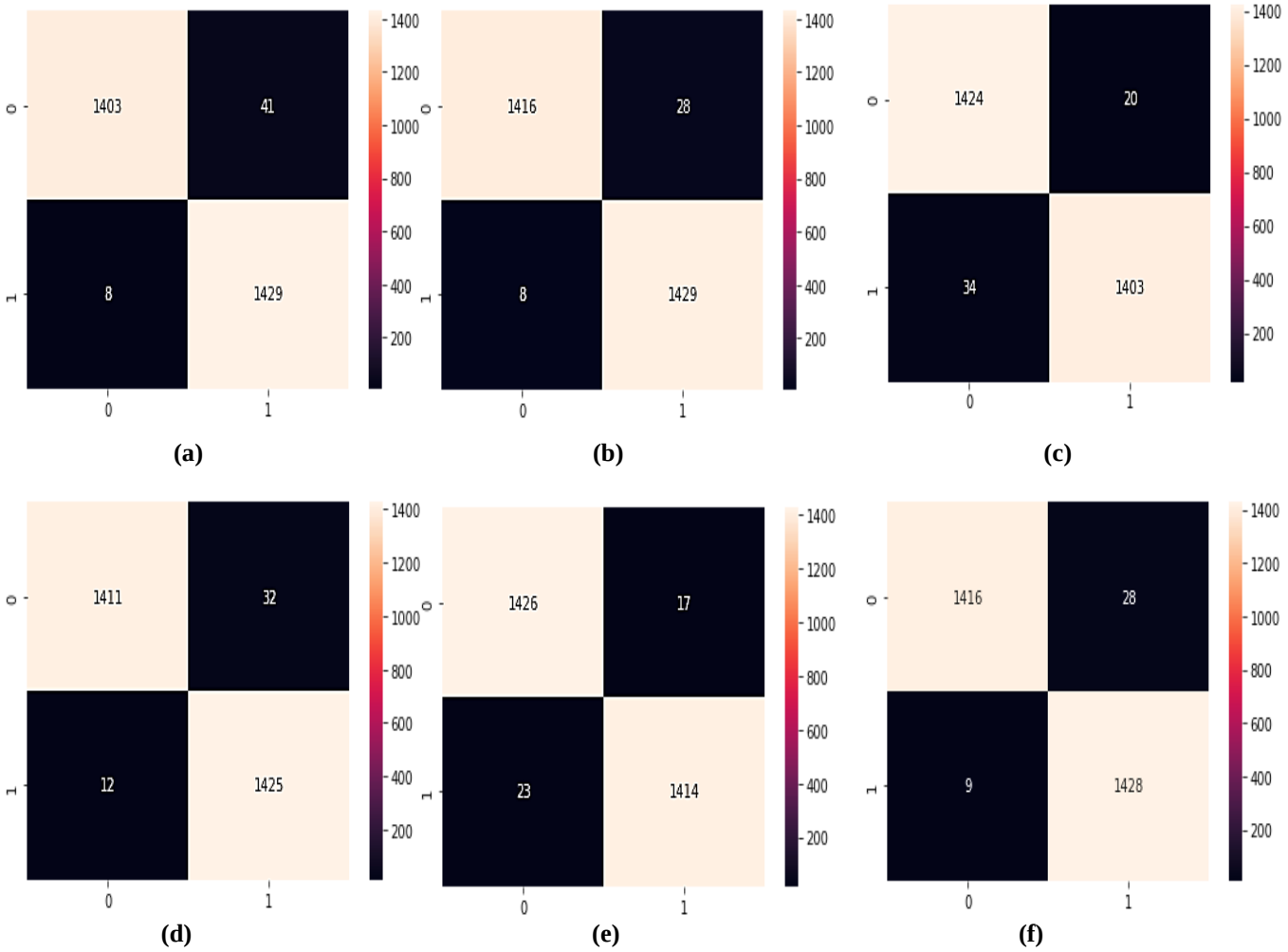


Figure 6. 0 Normal Data 1 Label Represents COVID-19 Data Confusion Matrix of a-) Resnet-50, b-) Densenet-201, c-) VGG16, d-) Xception, e-) InceptionResnetv2, f-) Inceptionv3 Model

If we explain the confusion matrix for the Densenet-201 model in Figure 6, based on the data presented in Figure 3, the true positives (TP) represent the cases where the true positive values are correctly predicted. The model correctly diagnosed 1416 examples as Covid-19 positive. False negatives (FN) represent the cases where true positive values are mistakenly predicted as negative. The model missed the presence of Covid-19 in 28 examples. False positives (FP) represent the cases where true negative values are mistakenly predicted as positive. The model incorrectly diagnosed 8 examples as Covid-19 positive. True negatives (TN) represent the cases where true negative values are correctly predicted. The model correctly classified 1429 examples as non-Covid-19.

4.2. Results from the ANN models

The training was carried out in 30 epoch iterations for the diagnosis of COVID-19 disease with the Multilayer Perceptron model. The Relu function is used in the Inner Layers and the sigmoid function is used in the output layer. As a result of the training, 98.98% accuracy, 97.68% test accuracy and 98.0% AUC were obtained as a result of the test. Precision, Recall and F-score values for the ANN model are given in table 3. In Figure 7, the ROC curve of the ANN model is presented.

Table 3 Precision, Recall and F-Score Values for The ANN Model

Class	Precision (%)	Recall (%)	F-score (%)
Negative	98	97	98
Positive	97	98	97

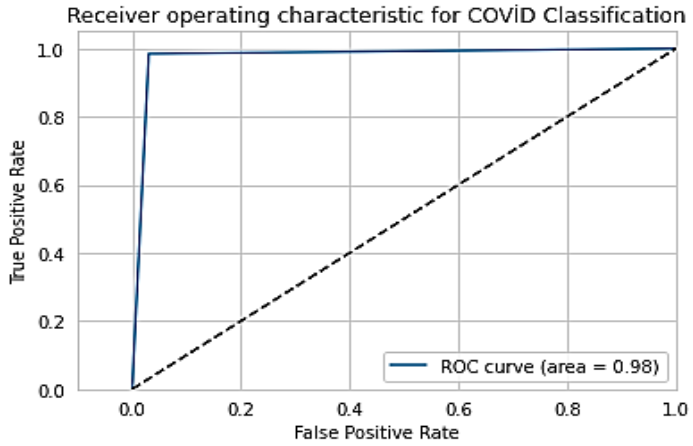


Figure 7. ROC Graph of The ANN Model

4.3. Results from KNN and SVM models

Different values are given for K in the KNN algorithm from Machine learning used for the diagnosis of COVID-19 disease. The accuracy was 97,44% for the K=1 value, %97,0 for the K = 3 value, %96,74 for the K=5 value, %96,56 for the K=10 value, and %96,36 for the K=20 value. As the K value increased, the accuracy decreased. K value and accuracy graph are given in figure 8.

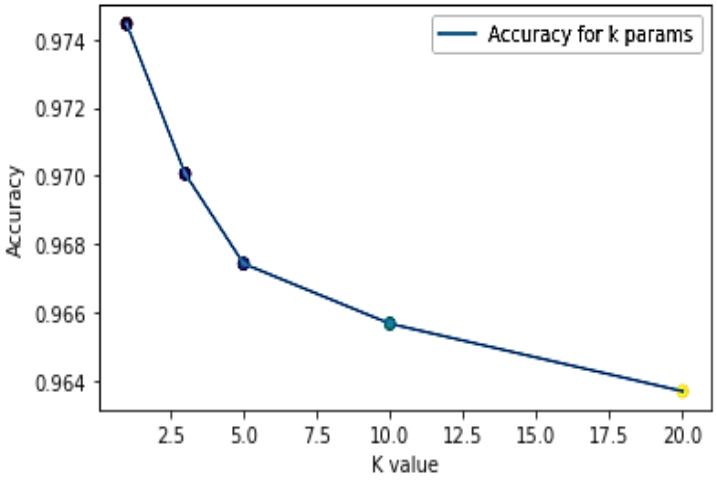


Figure 8. Accuracy Plot for All K values

The test process performed with the SVM model achieved %96,91 accuracies. Table 4 shows the Precision, Recall and F-score values for the SVM model.

Table 4 Precision, Recall and F-Score Values for SVM

Class	Precision (%)	Recall (%)	F-score (%)
Normal	97	98	98
COVID-19	96	95	95

5. Conclusion and Discussion

The rapid diagnosis of COVID-19 is highly important for human health due to the increasing number of cases and deaths rows caused by COVID-19. In this study, CNN architectural models and Machine Learning models KNN, SVM and ANN were used for the diagnosis of COVID-19 disease. It is aimed to detect the algorithm that provides the best results by attempting various algorithms. The highest test accuracy was obtained in the Densenet-201 model of CNN architecture compared to other models according to the results obtained in this study. Table 5 includes studies carried out for the diagnosis of COVID-19 disease. It is observed that the CNN architecture achieved higher success when the obtained results were compared with other algorithms.

Table 5 Some Studies Carried Out for The Diagnosis of COVID-19 Disease

Authors	Data Sources	Techniques	Performance (%)
D. Javor & et al. doi:10.1016/j.ejrad.2020.109402	6868 lung computed tomography images	Resnet-50	Test data set AUC %95,6 rule out (>0,0006) sensitivity 100, specificity 60, rule out (>0,4) AUC % 95,6 sensitivity 84,4 specificity 93,3 radiologist 1 (test dataset) 87,67 sensitivity 82,2 specificity 91,1 radiologist 2 (test dataset) 88, sensitivity 80, specifity 97,8
Aayush Jaiswal & et al. doi:10.1080/07391102.2020.1788642	2492 lung computed tomography images	Densenet-201, VGG-16, Resnet152V2, InceptionResnetV2	VGG-16 test accuracy %95,45, test specifity%95,67,InceptionResnetv2 test accuracy %90.90, test specificity %89,72, Resnet152V2 test accuracy %94,91, test specificity %92,43, Densenet-201 test accuracy %96,25, test specificity 96,21
Shervin Minaee & et al. doi:10.1016/j.media.2020.101794	5000 lung X-ray images	Resnet-18, Resnet-50, Squeezenet, Densenet-121	Resnet-18 AUC %98,9, Resnet-50 AUC %99, Squeezenet AUC %99,2, Densenet-121 AUC %97,6
Y.Pathak & et al. doi:10.1016/j.irbm.2020.05.003	852 lung computed tomography images	Resnet-50 ANN	Resnet-50 validation accuracy 87,35, validation specificity %86,97, validation sensitivity %87,73, ANN validation accuracy % 85,09

Table 5 includes some studies with their results for the diagnosis of COVID-19 disease. D.javor et al. created a dataset consisting of 6668 lung computed

tomography images. With the Resnet-50 model, they obtained %95,6 AUC, sensitivity 100, and specificity 60 for rule out (>0,0006), while they obtained %95.6 AUC, sensitivity 84.4, and specificity 93,3 for rule out (>0,4). In the Resnet-50 model in our study, %99.62 AUC, sensitivity %99.4, and specificity %97,16 results were obtained.

Aayush Jaiswala et al. created a dataset consisting of 2492 lung computed tomography images. They obtained %96,25 test accuracy and %99,21 test specificity from the Densenet-201 model. From the VGG-16 model, they obtained %95,45 test accuracy and %95,67 test specificity. They also obtained %90,90 test accuracy and %89.72 test specificity from the InceptionResnetV2 model and obtained %94,91 test accuracy and %92,43 test specificity from the Resnet152V2 model. These three model results were obtained in our study. Respectively, from the Densenet-201 model; %98,75 test accuracy and 98,06 test specificity, from the VGG-16 model; %98,13 test accuracy and %98,61 test specificity and lastly from the InceptionResnetV2 model; %98.61 test accuracy and %98,82 test specificity was obtained.

According to the results obtained by Shervin Minaee et al. from the Resnet18, Resnet-50, Squeezenet, and Densenet-121 architectures in datasets consisting of 5000 lung X-ray images, the obtained AUC %98,9 from Resnet-18, AUC %99 from Resnet-50, AUC %99,2 from Squeezenet, and AUC %97,6 from Densenet-121. %99,62 AUC was obtained from the common model, Resnet-50, in our study.

Y.Pathak et al. conducted studies on datasets consisting of 852 lung computed tomography images on models common with our study, Resnet-50 and ANN models.

They obtained %87,35 validation accuracy, %86,97 validation specificity, and %87,73 validation sensitivity in the Resnet-50 model while the ANN validation accuracy was %85,09. In our study, the Resnet-50 model had %98,30 test accuracy, %99,44 test specificity, %97,16 validation sensitivity. Moreover, the ANN model in our study had %97,68 test accuracy.

The success of CNN architectures in classification problems is also observed in those obtained results. With the classification method for disease diagnosis, better results can be obtained from the models by trying different methods and different models in CNN models. As the number of data increases and with a more efficient data set, higher test results can be obtained. To obtain higher results in machine learning algorithms, studies can be conducted with different values and different models.

The findings obtained in the study indicate that deep learning holds great potential for contributing to healthcare systems and humanity in the diagnosis of COVID-19 and other diseases. In this study, six different pretrained CNN architectures were employed for the diagnosis of COVID-19. The aim was to determine the network that achieves the highest accuracy by comparing their performance. The success rates of the classification can be observed by examining the confusion matrices presented in Figure 6. High accuracy rates were observed in all CNN models, which can be attributed to factors such as a larger dataset and data augmentation techniques that enable the networks to better learn from the data. The utilization of pretrained models has further improved the performance of the CNN architectures. Adjusting the networks at different layers and components has led to better results.

In addition to assisting healthcare professionals in disease diagnosis, artificial intelligence can perform the diagnostic process promptly upon data acquisition, thereby saving time and potentially protecting individuals from other risks. Generating a unique dataset for disease diagnosis studies can be challenging. By adding images from other lung-related diseases to the created dataset, multi-class classification can be performed, enabling the differentiation and diagnosis of multiple diseases simultaneously. Trained and tested networks can be integrated into a system and transformed into a ready-to-use program for utilization by experts. Disease diagnosis using artificial intelligence can reduce human error and increase the accuracy of diagnoses or validate existing ones, complementing human attention. As with many other fields, disease diagnosis with artificial intelligence is expected to become more actively utilized in the future.

References

Abiodun, O., I., Jantan, A., Omolara, A., E., Dada, K., V., Mohamed, N., A., E., Arshad, H. (2018). State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. Heliyon, 4(11), e00938.

A, Etyemez. Yapay Sinir Ağları Yöntemi ile Optimum Takım Seçimi. (2019). El-Cezeri Fen ve Mühendislik Derg.,no. 2, pp. 323–332, 2019, doi: 10.31202/ecjse.511882.

A, Jaiswal., N, Gianchandani., D, Singh and V, Kumar. (2020).Classification of the COVID-19 infected patients using DenseNet201 based deep transfer learning. J. Biomol. Struct. Dyn, vol. 0, no. 0, pp. 1–8.

A, Zaid., N, Aldrweesh., F, Alzubaidi., A., M (2023). COVID-19 CT-images diagnosis and severity assessment using machine learning algorithm J. Springer Nature 202. doi:10.1007/s10586-023-03972-5

A, Orman., U, Köse and T, Yiğit. (2021).Açıklanabilir Evrişimsel Sinir Ağları ile Beyin Tümörü Tespiti. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Derg., no. 3, pp. 1323–1337, 2021, doi: 10.31202/ecjse.924446.

Boeckmans, J., Cartuyvels., R, Hilkens., P, Bruckers., L, Magerman., K, Waumans., L, Raymaekers., M.(2021). Follow-up testing of borderline SARS-CoV-2 patients by rRT-PCR allows early diagnosis of COVID-19. Diagnostic Microbiology Infectious Disease, Journal Pre-proof,100(2), 115350.

Brunese, L., Mercaldo, F., Reginelli, A., Santone, A. (2020). Explainable Deep Learning for Pulmonary Disease and Coronavirus COVID-19 Detection from X-rays. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 196, 105608.

Dixit, A., Mani., A, Bansal., R. (2021). CoV2-Detect-Net: Design of COVID-19 prediction model based on hybrid DE-PSO with SVM using Chest X-ray images. Information Sciences, 676-692.

D, Kaya., M, Türk., and T, Kaya.(2018).Examining the Effect of Dimension Reduction on EEG Signals by K-Nearest Neighbors Algorithm. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Derg., vol. 5, no. 2, pp. 591–595, doi: 10.31202/ecjse.385192

Dongare, A., D., Kharde, R., R., Kachare, A., D. (2012). Introduction to Artificial Neural Network (ANN) Methods. International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), 2(1), 189–194.

E, Sivari., Z, Civelek and G, Kahraman.(2020). Artificial neural network model estimating the initial dose of propofol used in general anesthesia. El-Cezeri J. Sci. Eng., vol. 7, no. 3, pp. 1482–1495, 2020, doi: 10.31202/ecjse.764719

F,Türk., M, Lüy and B,Gökçen.(2020). International Journal of Engineering Research and Development. Multi Depth V-Net Model Ile 3 Boyutlu Böbrek ve Tümör Segmentasyonu 3D Kidney and Tumor Segmentation with Multi Depth V-Net Model.Vol.12.

Gilanie, G., Bajwa, U. I., Waraich, M. M., Asghar, M., Kousar, R., Kashif, A., Aslam, R. S., Qasim, M. M., Rafique, H. (2021). Coronavirus (COVID-19) Detection from Chest Radiology Images using Convolutional Neural Networks. Biomedical Signal Processing and Control, 66(February), 102490.

Gozes, O., Frid, M., Greenspan, H., Patrick, D. (2020). Rapid AI Development Cycle for the Coronavirus (COVID-19) Pandemic : Initial Results for Automated Detection Patient Monitoring using Deep Learning CT Image Analysis Article Type : Authors : Summary Statement : Key Results : List of abbreviate.

Gupta, K., Bajaj, V. (2023). Deep learning models-based CT-scan image classification for automated screening of COVID-19. Biomedical Signal Processing and Control, 80(February), 104268.

Huang. L, Han. R, Ai. T, Yu. P, Kang. H, Tao. Q, Xia. L.(2020). Serial Quantitative Chest CT Assessment of COVID-19 :A Deep Learning Apporach. Radiology: Cardiothoracic İmaging,(2) ,200075.

Hubel, D., H., Wiesel, T. (1962). AND FUNCTIONAL ARCHITECTURE IN THE CAT'S VISUAL CORTEX From the Neurophysiolojy Laboratory , Department of Pharmacology central nervous system is the great diversity of its cell types and inter- receptive fields of a more complex type (Part I) and to. Most, 106–154.

Jain, G., Mittal, D., Thakur., D, Mittal., M., K.(2020). A deep learning approach to detect Covid-19 coronavirus with X-Ray images. Science Direct,40(4), 1391–1405.

Javor, D., Kaplan, H., Kaplan., A, Puchner., S, B., Krestan., C, Baltzer., P.(2020). Deep learning analysis provides accurate COVID-19 diagnosis on chest computed tomography. European Journal of Radiology, 133, 109402.

Jyoti, K., Sushma, S., Yadav., S, Kumar., A, B., Pachori., B, R., Mukherjee., S (2023). Deep learning analysis provides accurate COVID-19 diagnosis on chest computed tomography. Computers in Biology and Medicine, 152, 106331.

Liu, T., Fang, S., Zhao, Y., Wang, P., Zhang., J. (2015). Implementation of Training Convolutional Neural Networks. Arxiv,1506, 01195.

Li,Y., Xia, L.Coronavirus disease.(2019). (COVID-19): Role of chest CT in diagnosis and management. American Journal of Roentgenology,214(6), 1280–1286.

M, Demirbilek.(2021). Tam ve Kısmi Kapanma Stratejilerinin COVID-19 Salgını Üzerinden Karşılaştırılması. No. 2, pp. 1024–1034, 2021.

Ö, Küçük., E, YAVŞAN and N, BARIŞCI.(2021). International Journal of Engineering Research and Development. An Autonomous-based, System Development, and Lane Recognition.Vol.13.

Qian, S., Liu., H, Liu., C, Wu., S, Wong., H, S.(2018). Adaptive activation functions in convolutional neural networks. Neurocomputing, 272, 204–212.

Shaban, W., M, Rabie., A, H., Saleh., A., I and Abo-Elsoud, M., A.(2020). A new COVID-19 Patients Detection Strategy (CPDS) based on hybrid feature selection and enhanced KNN classifier. Knowledge-Based Systems, 205, 106270.

S, Minaee., R, Kafieh., M, Sonka., S, Yazdani, and G, Jamalipour Soufi.(2020).Deep-COVID: Predicting COVID-19 from chest X-ray images using deep transfer learning.Med. Image Anal, vol. 65.

Turkoglu, M.(2021). COVID-19 Detection System Using Chest CT Images and Multiple Kernels-Extreme Learning Machine Based on Deep Neural Network.IRBM, pp. 1–8.

Wang, L., Lin., Z, Q., Wong., A.(2020). COVID-Net: a tailored deep convolutional neural network design for detection of COVID-19 cases from chest X-ray images. Scientific Reports, 10(1), 1–12.

Wang, S., Zha, Y., Li, W., Wu, Q., Li, X., Niu, M., Wang, M., Qiu., X, Li., H., Yu. H, Gong., W, Bai., Y, Li., L, Zhu., Y, Wang., L, Tian., J.(2020). A fully automatic deep learning system for COVID-19 diagnostic and prognostic analysis. European Respiratory Journal,56(2), 2000775.

Wei, L., Cai., J, Nguyen., V, Chu., J, Wen., K.(2020).P-SFA: Probability based Sigmoid Function Approximation for Low-complexity Hardware Implementation. Microprocessors and Microsystems,76, 103105.

Yang, X., Yu, Y., Xu, J., Shu, H., Xia., J, Liu., H, Wu., Y, Zhang., L, Yu., Z, Fang., M, Yu., T, Wang., Y, Pan., S, Zou., X, Yuan., S, Shang., Y.(2020). Clinical course and outcomes of critically ill patients with SARS-CoV-2 pneumonia in Wuhan, China: a single-centered, retrospective, observational study. The Lancet Respiratory Medicine, 8(5), 475–481.

Y, Pathak., P, K., Shukla., A, Tiwari., S, Stalinnand S, Singh.(2020). Deep Transfer Learning Based Classification Model for COVID-19 Disease," Irbm, vol. 1, pp. 1–6.

Y, Song et al.(2021). Deep learning Enables Accurate Diagnosis of Novel Coronavirus (COVID-19) with CT images. IEEE/ACM Trans. Comput. Biol. Bioinforma.,vol. 14, no. 8, 2021.

Zhou, T., Lu., H, Yang,. Z, Qiu., S, Huo., B, Dong., Y.(2021). The ensemble deep learning model for novel COVID-19 on CT images. Applied Soft Computing, 98, 106885.

URL. (2023). Novel coronavirus –2019. World health organization.https://covid19.who.int/accessed 10.07.2023.

MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

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

UMAGD, (2023) 15(3), 64-73.

10.29137/umagd. 1321830

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:03 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue

Araştırma Makalesi / Research Article

The Effect of SiC and MgO Ceramic Reinforcements on the Mechanical Behavior and Electrical Properties of the Composite Structure in Al7075/SiC/MgO Hybrid Composites

Mustafa Yasin Erten [1], Rüstem Yılmazel [2], Ahmet Filazi [3] Muharrem Pul [4]

[1]*Electrical and Electronics Eng. Department, Faculty of Engineering, Kırıkkale University, Türkiye*
[2]*Control and Automation Department, Kırıkkale Vocational School, Kırıkkale University, Türkiye*
[3]*Department of Construction, Kırıkkale Vocational School, Kırıkkale University, Türkiye*
[4]*Department of Electricity and Energy, Kırıkkale Vocational School, Kırıkkale University, Türkiye*

***Başvuru/Received**: 02/07/2023* ***Kabul / Accepted**: 21/07/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Abstract

In this study, certain technical properties of new generation aluminum-based composites, obtained by combining the Al7075 alloy were investigated. For this purpose, SiC and MgO ceramics were reinforced into the Al7075 matrix material using powder metallurgy technique and composite structures were produced in three different reinforcement ratios. Measurements to determine electrical resistance and conductivity and bending and compression strength tests were performed on the obtained composite structures. The density and porosity amounts of the composite structures were also determined, and their microstructures were examined. With the increase of SiC/MgO amount in the aluminum composite structure, the electrical resistance increased, and the electrical conductivity decreased With the effect of SiC and MgO reinforcement materials, the amount of pores increased, therefore the density decreased.The hardness values increased due to the effect of SiC and MgO ceramics in the structure. The bending and compression strength values initially increased and then started to decrease with the increase of reinforcement ratios. It has been determined that the formation of porosity in the composite structure negatively affects the mechanical behavior. The second important factor was evaluated to be the amount and shape of ceramic-based reinforcement particles in the structure. Due to the effect of SiC, which has very high electrical resistance, and MgO, which has dielectric properties, the electrical conductivity values of the composite structures decreased. The decrease in electrical conductivity were directly proportional to the amount of ceramic-based reinforcement particles in the composite structure.

Key Words

"Al7075 Composite, SiC, MgO, Mechanical strength, Electrical behavior"

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

1. Introduction

Composite materials play an important and influential role in many engineering industry applications due to the physical properties (Almadhoni and Khan, 2015). In recent years, particle-reinforced metal matrix composites (MMCs) have been gaining popularity for advanced applications. Generally, a soft metal with high ductility and toughness is reinforced with a hard ceramic material with high strength and modulus in the production of a MMCs. Aluminum-based metal matrix composites for structural applications have significant potential thanks to properties like their high hardness, modulus, specific strength, corrosion and wear resistance (Nuruzzaman et al., 2016; Ma et al., 2017). In these days, aluminum alloys are the most widely used metallic engineering materials after steel. Properties such as low density, high corrosion resistance, high electrical conductivity and high specific strength are the reasons for the interest in aluminum alloys (Gökçe et al., 2017). When aluminum is chosen as the low density matrix, it has high strength. SiC and Al_2O_3 are commonly used particulate reinforcements for Aluminum Matrix Composites (AMC). In addition, some of the main reinforcements used to improve the mechanical properties of AMCs are ceramics such as TiC, B_4C, BN, TiB_2 (Nazık et al., 2017; Nuruzzaman et al., 2016).

There are developments of two main directions in metal matrix composite material production technology. These are powder metallurgy and casting methods of liquid metal alloys and ceramic preforms (Włodarczyk-Fligier et al., 2008). The addition of the reinforcement in a relatively high volume fraction, the production of composites with matrix alloy and reinforcement materials that do not mix with liquid casting are among the advantages of the powder metallurgy method (Rana et al 2012). When the literature is examined, it is seen that there are studies on composites produced by adding different reinforcement ceramics to different aluminum alloys. In these studies, different properties of composites were investigated (Kamrani et al., 2015; Butola et al., 2017; Shankar and Raghwendra, 2017; Bodukuri 2012). When the literature is examined, it is seen that there are limited number of studies on MgO reinforced composites in aluminum matrix and ceramic particle reinforced composite studies. In addition, any study in which SiC and MgO were reinforced together into the Al7075 matrix could not be found in the literature.

Unlike the literature, composite structures with Al7075 matrix were produced by reinforcing MgO and SiC ceramic particles together in this study. In the study, in which powder metallurgy was applied as the production method, measurements and tests were carried out to determine the mechanical properties and electrical behaviors on the composite structures with different reinforcement ratios. The obtained results were evaluated together with microstructure images.

2. Experimental Study

The properties of the matrix material Al7075 and the reinforcement element SiC and MgO ceramics used in the production of composite materials are shown in Table 1. The matrix-reinforcement ratios determined for production are given in Table 2.

Table 1. Technical properties of matrix and reinforcement materials used in the production of composites

Al 7075 chemical content		**Al 7075 physical properties**	
Zn%	5,1-6,1	Intensity	2,81 g/cm^3
Fe%	0,50	Melting point	635 °C
Si%	0,40	Hardness	58 HB
Cu%	1,21-2,0	Particle Shape	Cornered
Mn%	0,30	Thermal Conductivity	130 W/mK
Mg%	2,1-2,9	Electrical Resistivity	10^{-8} Ω·m
SiC chemical content		**SiC physical properties**	
Si%	61-66	Intensity	3,21 g/cm^3
Al2O3%	0,7-1,2	Melting point	2730 °C
Fe2O3%	0,6-1,1	Hardness	2480 knoop
C%	22-26	Particle Shape	Sharp Corners
		Thermal Conductivity	90 W/mK
		Electrical Resistivity	10^7 Ω·m
MgO chemical content		**MgO physical properties**	
% MgO	98	Intensity	3,58 g/cm^3
% FeO	0,6	Melting point	2852 °C
% SiO2	1,0	Hardness	690 Knoop
% CaO	0,4	Particle Shape	Cornered
		Thermal Conductivity	42 W/mK
		Electrical Resistivity	Dielectric

Table 2. Matrix reinforcement ratios of composite samples (wt.)

Sample	Al 7075 %	SiC %	MgO %
1	90	5	5
2	85	7.5	7.5
3	80	10	10

Powder metallurgy technique was used in the production of composite materials. The materials in the determined weight ratios were mixed with a drum mixer for 2 hours. After that, It was compressed in a hydraulic press with 500 MPa pressure. Finally, the production process was completed by sintering at 580 °C for 90 minutes and rectangular prism composite specimens with the dimensions of 50*13*10 mm were obtained. Fracture strength values were found by using Equation 1, according to the bending forces obtained from the bending tests performed according to the 10*13 mm sample section.

$$\sigma = F/A \quad (1)$$

Here; F is the fracture force (N), A is the area forced to fracture mm^2, σ is the fracturestrength (N/mm^2). The second phase of the experimental study has been started by making density measurements on the composite samples whose production process was completed. Then, the porosity ratios were determined. Hardness values were determined by Brinell method. Finally, three point flexural and compression strength tests were performed and mechanical tests were completed. In the second part of the measurements, electrical resistance measurements were made on the composite structures and electrical conductivity values were determined according to the obtained data. All results were evaluated together with microstructure images taken with a digital microscope.

3. Results And Discussion

3.1. Microstructure and porosity

After the Al7075+MgO+SiC powder mixture and powder metallurgy application, the digital microscope images of the composite structure are shown in Figure 1.

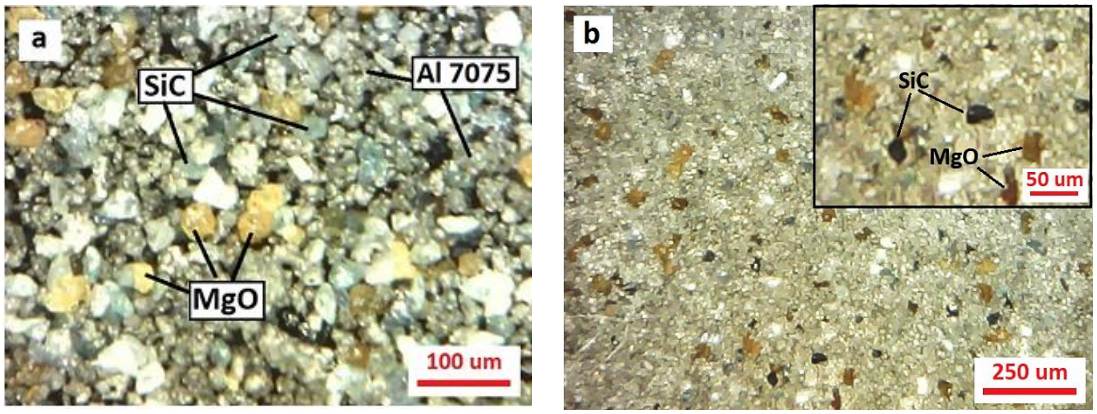


Figure 1. (**a**) Digital microscope images of the composite powder mixture; (**b**) Digital microscope images of the composite structure

When the digital microscope images in Figure 1 are examined, it can be said that SiC and MgO reinforcement particles in the Al7075 matrix structure are clearly visible. It is seen that a relatively homogeneous distribution of reinforcement is achieved and the powder metallurgy production process is carried out successfully. It is understood that the matrix material Al7075 forms a sufficient level of bond with the sintering process. However, it can be said that MgO and SiC particles, which are in the aluminum matrix and have very low thermal conductivity, affect the sintering process (Balaji et al., 2015). In addition, the porous structure, which is frequently encountered in such particle-reinforced composites, is also considered to be effective. In a study, it was reported that fine SiC particles agglomerated and a porous structure formed in the areas adjacent to these particles (Szewczyk-Nykiel, 2017). It is understood that the pore ratios increase in direct proportion with the increase in the ratio of SiC and MgO in the composite structure. It is seen that the proportional increase in the porosity values is also a result that supports the homogeneous distribution of SiC and MgO particles in the composite structure. Results close to the porosity ratios in Figure 2 were obtained in a similar study in the literature (Pul et al., 2023).

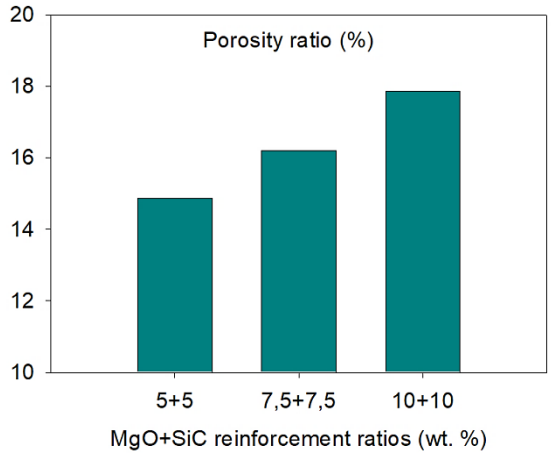


Figure 2. Porosity amounts of Al7075/MgO+SiC composites

3.2. Hardness

The hardness values of Al7075 based MgO and SiC reinforced composite structures determined by Brinell method are given in Figure 3.

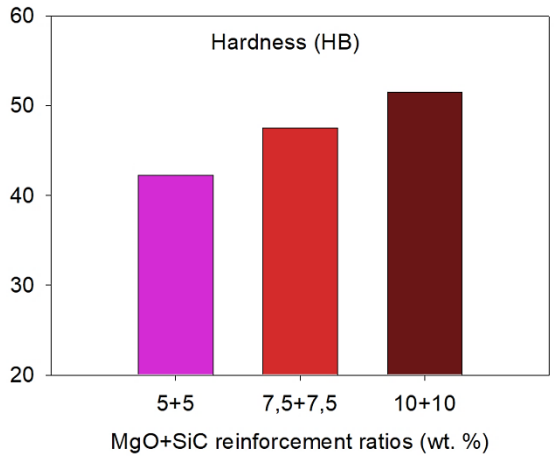


Figure 3. Hardness values of Al7075/MgO+SiC composites

When the hardness values in Figure 3 are examined, it is seen that the hardness values increase depending on the increase in the MgO+SiC reinforcement ratio in Al7075. With the effect of SiC and MgO particles in the very hard phase in the composite structure, an increase in hardness occurred throughout the structure. Similar results were found in different studies in the literature (Pul, 2019; Joshua et al., 2017). However, there was no increase in hardness at the rate of the increase in the reinforcement ratio in the composite structure. Although there was a 100% increase between the lowest reinforcement rate and the highest reinforcement, the increase in hardness value was approximately 15%.

3.3. Flexural and compressive strength

The graphs created according to the data obtained from the three-point flexural and compression strength tests of Al7075 based MgO and SiC reinforced composite structures are given in Figure 4. When the graphs in Figure 4 are examined, it is seen that there is a relationship between the flexural and compressive strength values of composite structures. In both mechanical tests, the highest strength value was obtained from 7% MgO+7% SiC reinforced aluminum composite. While the second highest value in flexural strength was obtained from 5% MgO+5% SiC reinforced Al7075 composite sample, 10% MgO+10% SiC reinforced Al7075 composite took the second place in compressive strength. It is thought that the most effective factor on these strength values is the structural feature of the composite. It is known that the properties of the reinforcement and the process parameters play an important role on the microstructure and mechanical properties in such particle-reinforced metallic composites (Caoa et al., 2016). One of the most important issues affecting the fracture in flexural tests performed with the three-point principle is the geometry of the reinforcement particles in the matrix and whether the wetting between the matrix reinforcement is at a sufficient level. In addition, it is known that the fracture strength of MgO and SiC reinforcement particles in the form of sharp corners in the aluminum matrix decreases due to the notch effect in flexural tests. A similar study in the literature is emphasized that the selection of factors such as

the interface reactions in such composites, the volume ratio of SiC, the shape of the reinforcement material and its distribution in the matrix should be considered in the production processes (Suryanarayanan et al., 2013).

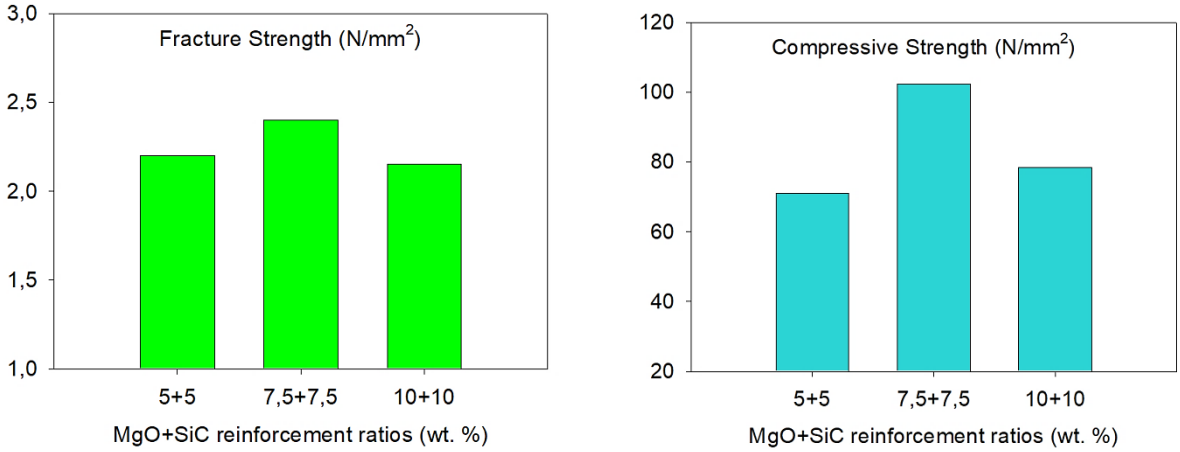


Figure 4. Flexural and compressive strengths of Al7075/MgO+SiC composites

other studies in the literature was determined that as the reinforcement ratio increased, the tensile strength, hardness and density of the AMC material increased, but the impact toughness decreased. Factors affecting the impact behavior of SiC-reinforced AMCs are reported to be particle aggregation, particle cracking, and weak matrix-reinforced bond (Iqbal and Nuruzzaman, 2016; Hashim et al., 2001). When the shape of the reinforcement particles in the powder mixture is examined in Figure 1, it is seen that they are in a rather irregular structure and in the form of sharp corners. In this case, it can be easily said that one of the factors affecting the fracture is present. The digital microscope images taken from the fractured surfaces of the composite samples after the flexural test is shown in Figure 5.

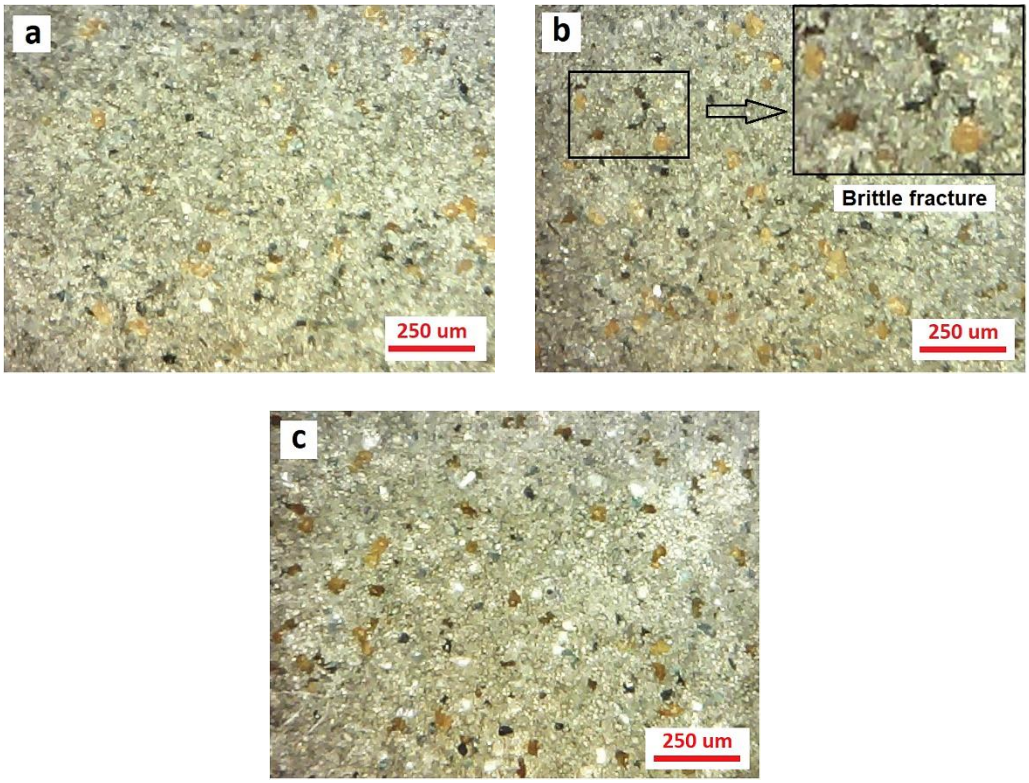


Figure 5. (a) Fractured surface images of 5% MgO+5% SiC reinforced composites; (b) Fractured surface images of %7,5 MgO+%7,5 SiC reinforced composites; c) Fractured surface images of %10 MgO+%10 SiC reinforced composites;

When the surface images in Figure 5 are examined, it is understood that the brittle fracture mechanism is effective (Figure 5b). It can also be said that there are areas with spaces in the composite structures. However, it cannot be said that there is a direct relationship between the pore ratios in the composite structure and the flexural strength values. If this were the case, the highest flexural strength value should have been obtained from the 5% MgO+5% SiC reinforced sample. In this case, it can be said that homogeneity of

composite structures is more effective on flexural strength. The accumulation of reinforcement particles at a higher rate than the other sections increased the notch effect more in the composite structure in the section that is forced to flexural. This situation reduced the strength of the composite structure. When the compressive strength values in Figure 4 are examined, it is seen that the highest strength value is obtained from the composite structure reinforced with 7.5% MgO+7.5% SiC as in the bending strength. Tensile tests are generally used to determine the mechanical strength of such composite structures. Differently from the literature, compressive strength tests were carried out in this article. The digital microscope images taken from two different regions of the deformed surfaces of the composites after the compression tests are given in Figure 6.

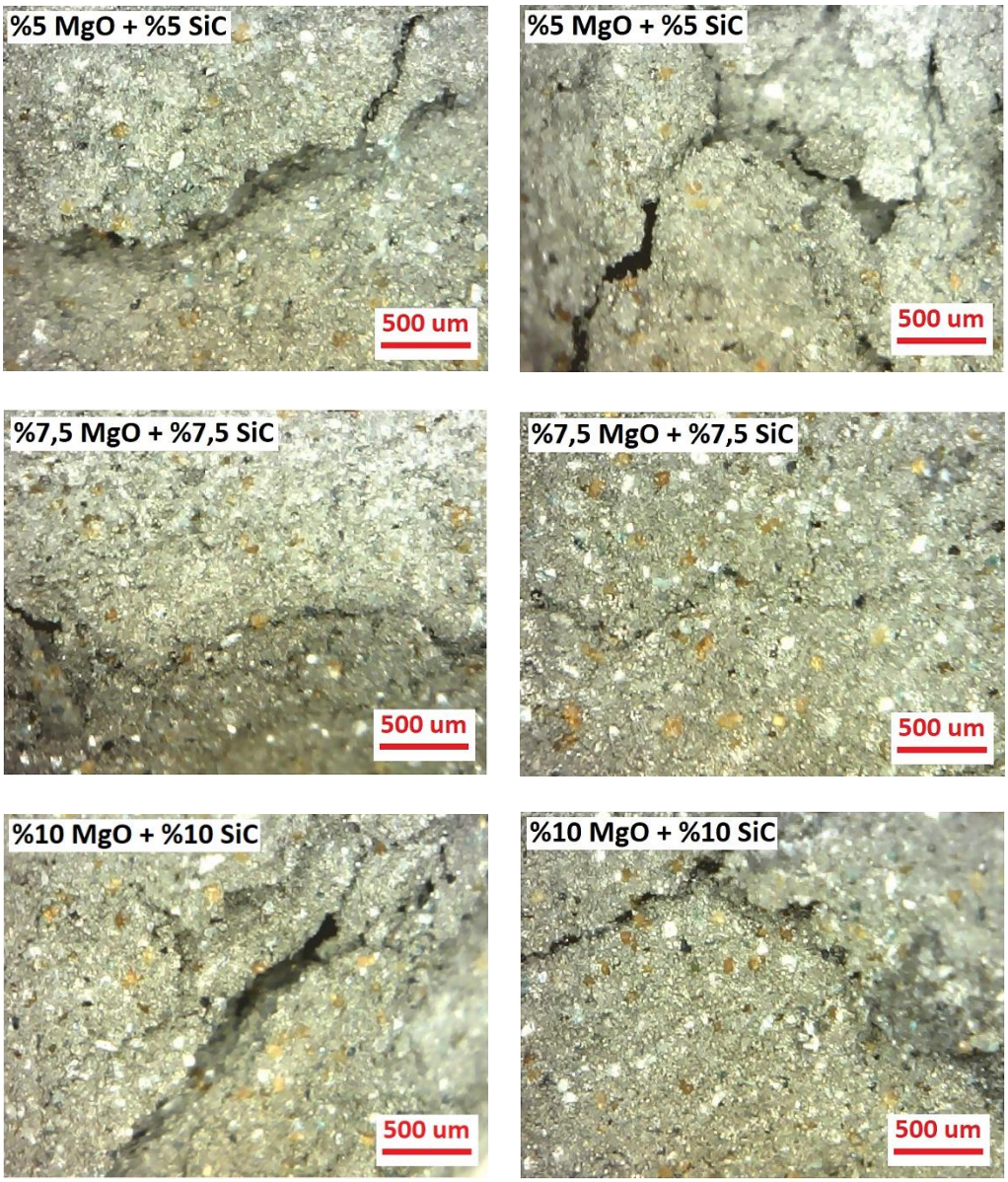


Figure 6. Microstructures of Al7075/MgO+SiC composites after compression test

When the microstructure images in Figure 6 are examined, the deformations in the composite structure are clearly seen as a result of the compression tests. It is understood that the cracks and crevices on the 5% MgO+5% SiC reinforced sample, which exhibits the lowest compressive strength, are wider and deeper than the other samples. It can be seen that the cracks and crevices formed in the 7.5% MgO+7.5% SiC reinforced sample, which has the highest compressive strength value, are narrower and less deep. As can be seen from the microstructure images taken on the composite samples after the compression test, the 7.5% MgO+7.5% SiC reinforced composite structure, which exhibits the highest compression stress value, has undergone the least deformation. In this case, it is considered that the composite structure images given in Figure 6 and the compressive strength values in the graph in Figure 4 support each other.

It can be said that ceramic particles in a certain amount in the aluminum matrix increase the compressive strength. There is a close relationship between the elasticity properties of materials and their deformation behavior. The elastic constants of SiC and MgO particles in the composite structure are much higher than the matrix material aluminum. In this case, it became difficult for Al7075 to

undergo plastic deformation during the experiments. At the same time, a higher hardening occurred and the compressive strength of the composite structure increased (Abdizadeh et al., 2014; Saif et al., 2020). As the amount of MgO and SiC in the aluminum matrix increases, the distance between the particles decreases. Thus, higher stresses were needed to move the dislocations. This situation has created the effect of increasing the strength of the material (Saif et al., 2020). This effect is shown by Equation 2.

$$\tau = GB/L \quad (3)$$

Here; (τ) is the shear stress for a single crystal, (G) is the shear modulus, (B) is the Burger vector for the crystal, (L) is the distance between the reinforcement particles. According to Equation 1, the distance between the reinforcement particles must be reduced and the stress must be increased for the dislocations to slip. However, it is understood that as the reinforcement ratio increases, other factors that decrease the mechanical strength are effective in this article. Because, in the compression tests, it is seen from the graphs in Figure 5 that both the compressive and flexural strengths decrease when the reinforcement ratio of 7.5% MgO + 7.5% SiC is exceeded. The most important reason for this decrease in mechanical strength is the difficulty of particle distribution with the increasing amount of reinforcement and the formation of agglomerations. As a result of agglomeration, the bonding of the composite is adversely affected and the mechanical strength decreases. Similar results are reported in the study (Abdizadeh et al., 2014). Another study in the literature has reported that a compressive strength of 82 MPa was obtained from the undoped aluminum sample and 138 MPa from the aluminum composite with 30% SiC (Şenel et al., 2017). In this study, a compression strength value of 101.3 MPa was found with a total reinforcement content of 15%, 7.5% MgO and 7.5% SiC. The results of this study with the literature results support each other.

3.4. Electrical characteristics

The values obtained from the electrical measurements of Al7075 based MgO and SiC reinforced composite structures are given in Table 3, and the graphs created according to these values are given in Figure 7.

Table 3. Electrical measurement values of hybrid composites

Composite samples	Conductivity	Resistivity	% Change
Al7075/MgO+SiC (5+5)	$13.0025*10^{6}$	$7.6908*10^{-8}$	-
Al7075/MgO+SiC (7,5+7,5)	$10.7434*10^{6}$	$9.3080*10^{-8}$	17,37
Al7075/MgO+SiC (10+10)	$7.2432*10^{6}$	$13.8060*10^{-8}$	32,58

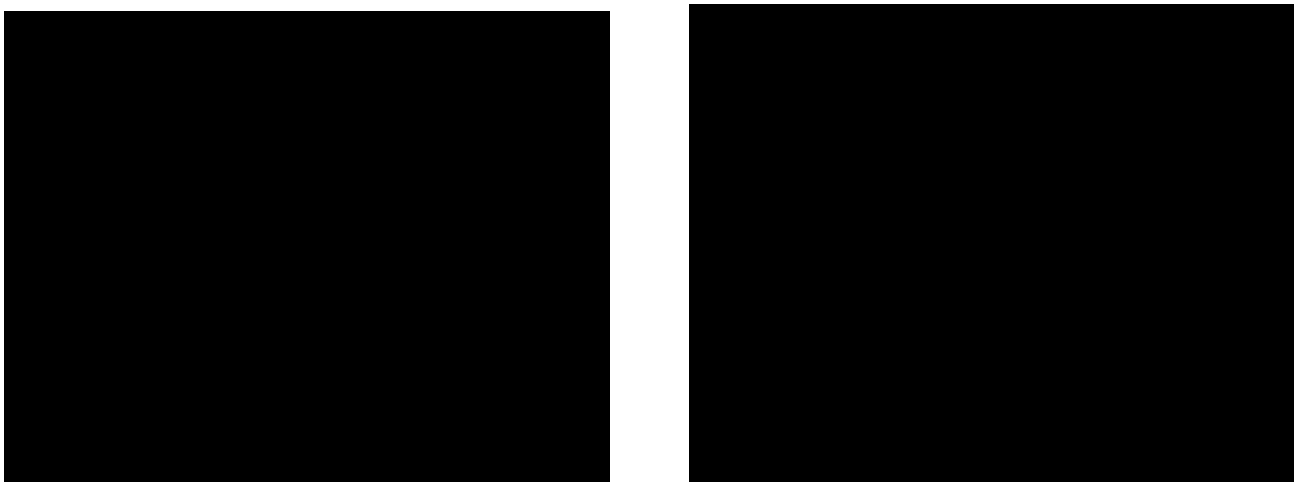


Figure 7. Electrical resistivity and conductivity values of Al7075/MgO+SiC composites

When the graphs in Figure 7 are examined, it is clearly seen that the electrical conductivity decreases with the increase in the SiC/MgO reinforcement ratio in the composite structure. It was observed that the electrical conductivity in the 7.5% reinforced SiC/MgO composite material was 17,37% lower than the electrical conductivity in the 5% reinforced SiC/MgO added composite. It was observed that the electrical conductivity in 10% reinforced SiC/MgO composite material was 32,58% lower than the electrical conductivity in 7.5% reinforced SiC/MgO composite material. When these results are compared with the results in similar articles, it is seen that they are quite consistent (Mohammed et al., 2021; Aydın, 2021). The fact that the electrical conductivity of the SiC/MgO reinforcement is lower than the conductivity of the Al matrix reveals these results. Therefore, as the SiC/MgO ratio added to the Al matrix increased, the conductivity of the composites decreased (Zawrah et al., 2019; Taha and Zawrah, 2017; Malliaris and Turner, 1971). The interaction of the electron with the nucleus in Al metal is very low. This gives electrons the ability to move freely. The free movement of electrons has led to an increase in the electrical conductivity of Al metal. However, with the addition of SiC/MgO

particles to Al metal, the interaction between electron and nucleus increased. Thus, a stable bond structure was formed between them. There has been a noticeable decrease in electrical conductivity, as the mobility of electrons is reduced with this bond structure.

MgO/SiC reinforcement creates non-conductive particles inside the Al7075/SiC/MgO composite structure. It has been observed that the electrical conductivity varies depending on the volume state of the MgO/SiC doped particles, the percentage of the additive and the structure of the geometric shape of my material. Therefore, electrical conductivity is expected to increase as the volume and percentage of metal matrix increase in a composite. In other words, a decrease in electrical conductivity is expected as the volume fraction of the non-conductive additive increases. MgO/SiC is a semiconductor compound. In addition, as the MgO/SiC contents increase, the gaps between the Al alloy and MgO/SiC particles increase. This creates electron movement barriers that provide electrical conductivity. Therefore, it is very normal for its electrical conductivity to decrease when combined with a conductive structure such as aluminum (Srivastave and Ojha, 2005; Islak et al., 2014).

4. Conclusion

The general results obtained from the experimental study titled The Effect of SiC and MgO Ceramic Reinforcements on the Mechanical Behavior and Electrical Properties of the Composite Structure in Al7075/SiC/MgO Hybrid Composites are summarized below:

- Al7075/SiC/MgO composite structures were successfully produced by powder metallurgy method at determined matrix-reinforcement ratios.
- In the microstructural examinations of the composites, it was determined that there was a relatively homogeneous distribution, but porous regions were formed with SiC and MgO reinforcement agglomerations in some regions.
- Depending on the increase in the SiC/MgO reinforcement ratio in the composite structure, it was understood that both the hardness values increased and also the porosity amounts increased in the same way.
- The highest flexural and compressive strength values in composite structures were obtained from 7.5% MgO + 7.5% SiC reinforced sample. When the amount of reinforcement increased to 10% MgO + 10% SiC, both flexural and compression strength values decreased.
- It has been evaluated that the most effective factors on the mechanical strength values are the porosity in the composite structure, the reinforcement ratios and the geometric shape of the reinforcement particles. In particular, the porosity in the structure and the sharp-edged form of the reinforcement particles had a negative effect on the flexural and compression strength values.
- Due to the semiconductor SiC and dielectric MgO particles in the composite materials, the electrical resistance of the composite structures increased while the conductivity properties decreased. This situation changed depending on the amount of SiC and MgO reinforcement in the composite.
- It is known that the conductivity of a substance is directly related to the free movement of electrons. In this study, it has been evaluated that the most important reason for the decrease in the electrical conductivity of the composite structure is the decrease in free circulation of electrons of MgO and SiC due to their proximity to the nucleus.

References

Aneta Szewczyk-Nykiel. (2017). Microstructure and properties of sintered metal matrix composites reinforced with sic particles, Technical Transactions, 6/2017, 179-190 DOI: 10.4467/2353737XCT.17.098.6574

Anil Kumar Bodukuri, K. Eswaraiah, Katla Rajendar,V. Sampath. (Fabrication of Al-SiC-B4C metal matrixcomposite by powder metallurgy techniqueand evaluating mechanical properties, Perspectives in Science, (2016) 8, 428-431 http://dx.doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.096

Asif Iqbal AKM, Dewan Muhammad Nuruzzaman. (2016). Effect of the Reinforcement on the Mechanical Properties of Aluminium Matrix Composite: A Review, International Journal of Applied Engineering Research, Vol 11, No 21 (2016) pp. 10408-10413

Aydın M., An Experimental Study of the Effects of Ceramic Composition on the Electrical and Thermal Properties of Al/SiC Composites, European Journal of Science and Technology No. 25, pp. 721-726, 2021, DOI: 10.31590/ejosat.943506)

Azim Gökçe, Fehim Fındık, Ali Osman Kurt (2017). Alüminyum ve Alaşımlarının Toz Metalurjisi İşlemleri, Mühendis ve Makine cilt 58, sayı 686, s. 21-47.

Balaji P., R. Arun, D. JegathPriyan, I. Madhan Ram, E. Manikandan. (2015). Comparative Study of Al 6061 Alloy with Al 6061 – Magnesium Oxide (MgO) Composite, International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol 6, Iss 4, 2015 408-412

Chi Caoa, Xuezheng Zhanga, Tijun Chena, Yushi Chena. (2016). Effects of Processing Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Powder- Thixoforged SiCp/6061 Al Composite, Materials Research. 2016 0466 1-13 DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0466

Cihad Nazık, Necmettin Tarakçıoğlu, Serdar Özkaya, Fatih Erdemır, and Aykut Çanakçı. (2016). Determination of Effect of B4C Content on Density and Tensile Strength of AA7075/ B4C Composite Produced via Powder Technology, International Journal of Materials Mechanics and Manufacturing, Vol. 4, No. 4, 2016 251-254 DOI: 10.18178/ijmmm.2016.4.4.266

Dewan Muhammad Nuruzzaman, Farah Fazira Binti Kamaruzaman, and Nasrah Binti Mohd Azmi. (2016). Effect of Sintering Temperature on the Properties of Aluminium-Aluminium Oxide Composite Materials, International Journal of Engineering Materials and Manufacture, (2016) 1(2) 59-64

Hashim, J., Looney, L., Hashmi, M.S.J. (2001). The Enhancement of Wettability of SiC particles in Cast Aluminium Matrix Composites, Journal of Materials Processing Technology, 119, 329-335.

Hossein Abdizadeh, Reza Ebrahimifard, Mohammad Amin Baghchesara. (2014). Investigation of microstructure and mechanical properties of nano MgO reinforced Al composites manufactured by stir casting and powder metallurgy methods: A comparative study, Composites: Part B, 56 (2014) 217–221 http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.023

Islak, S.; Kır, D.; Buytoz, S. (2014). Effect of sintering temperature on electrical and microstructure properties of hot pressed Cu-TiC composites. Sci Sintering, 2014, 46, 15-21, https://dx.doi.org/10.2298/sos1401015i.

John Joshua K., S.J. Vijay, D. Philip Selvaraj, P.Ramkumar. (2017). Influence of MgO particles on Microstructural and Mechanical Behaviour of AA7068 Metal Matrix Composites, Materials Science and Engineering, 247 (2017) 012011 doi:10.1088/1757-899X/247/1/012011

Kamrani S., R.Riedel and S.M. Seyed Reihan. (2015). Microstructural Evolution of Al Composite Powders Reinforced by Nano and Micrometric SiC Particles During Mechanical Milling, Int J Metall Mater Eng., 2015, 1: 105 http://dx.doi.org/10.15344/2455-2372/2015/105

Khalid Almadhoni and Sabah Khan. (2015). Evaluation of the Effective Thermal Properties of Aluminum Metal Matrix Composites Reinforced by Ceramic Particles, International Journal of Current Engineering and Technology, Vol.5, No.4 (Aug 2015) 2884-2897

Ma, K., Lavernia, E. J., & Schoenung, J. M. (2017). Particulate reinforced aluminum alloy matrix composites-a review on the effect of microconstituents. Rev. Adv. Mater. Sci, (2017), 48(2), 91-104.

Malliaris, A.; Turner, T. (1971). Influence of particle size on the electrical resistivity of compacted mixtures of polymeric and metallic powders. Appl. Phys. 1971, 42, 614–618

Mohammed A. T. , Rasha A. Y. , Medhat A. I. (2021). Evolution of the Physical, Mechanical and Electrical Properties of SiC-Reinforced Al 6061 Composites Prepared by Stir Cast Method, Biointerface Research in Applied Chemistry, Vol 11, Iss 2, 2021, 8946-8956. https://doi.org/10.33263/BRIAC112.89468956

Nuruzzaman D M, Kamaruzaman F F B. (2016). Processing and mechanical properties of aluminium-silicon carbide metal matrix composites, Materials Science and Engineering. 114 (2016) 012123 doi:10.1088/1757-899X/114/1/012123

Prem Sahu Shankar and Banchhor Raghwendra. (2017). Effect of different reinforcement on mechanical properties of aluminium metal matrix composites, Research Journal of Engineering Sciences, Vol. 6(7), 39-45, (2017)

Pul M. (2019). Effect of sintering on mechanical property of SiC/B4C reinforced aluminum, Mater. Res. Express, 6 (2019) 016541 https://doi.org/10.1088/2053-1591/aacee1

Pul M., Ü. Erdem, M. B. Turkoz, and G. Yildirim. (2023) The effect of sintering parameters and MgO ratio on structural properties in Al7075/MgO composites: a review, Journal of Materials Science, 6, 58:664–684 2023 https://doi.org/10.1007/s10853-022-08003-z

Rana R. S., Rajesh Purohit and S.Das. (2012). Review of recent Studies in Al matrix composites, International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 3, Iss. 6, 2012 1-16

Ravi Butola, Ranganath M.Singari, Ashwani Bandhu, R S Walia. (2017). Characteristics and Properties of Different Reinforcements in Hybrid Aluminium Composites: A Review, International Journal of Advanced Production and Industrial Engineering, IJAPIE-SI-MM 511 (2017) 71–80

Saif S. Irhayyim, Hashim Sh. Hammood and Anmar D. Mahdi. (2020). Mechanical and wear properties of hybrid aluminum matrix composite reinforced with graphite and nano MgO particles prepared by powder metallurgy technique, AIMS Materials Science, 7(1): 103–115. DOI: 10.3934/matersci.2020.1.103

Srivastave, V.C.; Ojha, S.N. (2005). Microstructure and electrical conductivity of Al–SiCp composites produced by spray forming process. Bull Mater Sci. 2005, 28, 125-130, https://doi.org/10.1007/BF02704231.
Suryanarayanan K, R. Praveen, S. Raghuraman. (2013). Silicon Carbide Reinforced Aluminium Metal Matrix Composites for Aerospace Applications: A Literature Review, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 2, Iss 11, 2013 6336-6344.

Şenel M. C., M. Gürbüz, E. Koç. (2017). Fabrication and Characterization of SiC and Si3N4 Reinforced Aluminum Matrix Composites, Universal Journal of Materials Science, 5(4): 95-101, 2017 DOI: 10.13189/ujms.2017.050403

Taha, M.A.; Zawrah, M. F. (2017). Effect of nano ZrO2 on strengthening and electrical properties of Cu-matrix nanocomposits prepared by mechanical alloying. Ceram. Int. 2017, 43, 12698–12704, https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.06.153.

Włodarczyk-Fligier A., Dobrzański L.A., M. Kremzer, M. Adamiak. (2008) Manufacturing of aluminium matrix composite materials reinforced by Al2O3 particles, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 27 Iss. 1 2008 99-102.

Zawrah, M. F.; Mostafa, H.; Taha, M. A. (2019). Effect of SiC content on microstructure, mechanical and electrical properties of sintered Al-20Si-xSiC nanocomposites fabricated by mechanical alloying. Mater. Res. Express, 2019, 6, 12501, https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab534e.

MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

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

UMAGD, (2023) 15(3), 74-81.

10.29137/umagd.1318985

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:03 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue

Araştırma Makalesi / Research Article

Design and Synthesis of A Novel N-Substituted Aminoalcohol Derivative with Hexachlorocyclotriphosphazene

Ömer Sonkaya[*1]

[1]*Aksaray University, Technical Sciences Vocational School, 68100, Aksaray, Turkey*

***Başvuru/Received**: 23/06/2023* ***Kabul / Accepted**: 04/08/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Abstract

Hexachlorocyclotriphosphazene, $N_3P_3Cl_6$, are cyclical and give substitution reactions with amines, alcohols, etc., nucleophiles. Nucleophilic substitution reactions of cyclotriphosphazene with bifunctional nucleophiles such as diols, diamines and aminoalcohols have been a subject of intense study over decades. Due to the stable P=N bond in phosphazenes, phosphazene derivatives can have properties such as resistance to heat, radiation, combustion, reducing and oxidizing substances. Cyclophosphazene derivatives usually have biological compatibility and degrade into non-toxic small molecules, thus are advantageous to biological activities and DNA interactions. For this reason, the properties of cyclic phosphazene compounds, anticarcinogenic, antibacterial and DNA interactions are currently studied topics. Also, Raman spectroscopy is widely used to obtain chemical information about the interaction of intramolecular bonds of newly synthesized compounds and drugs, the effects of these compounds on the cell, and understanding their mechanisms. In this study, the changes in molecular interactions of cyclophosphazene derivatives were investigated by Raman spectroscopy.

The condensation reactions of N/O donor type bifunctional N-substituted aminoalcohols with hexachlorocyclotriphosphazene were investigated and the spiro-cyclic tetrachlorocyclotriphosphazene derivatives were prepared. Elemental analyses, ESI-MS, FT-Raman, FTIR and NMR spectroscopy techniques were employed to characterize all of the compounds.

Key Words

"Cyclophosphazenes, Spiro-phosphazenes, N-substituted aminoalcohols."

***Sorumlu Yazar:** omersonkaya@aksaray.edu.tr*

1. Introduction

Cyclophosphazenes containing a ($N=PX_2$) repeated unit are known as inorganic heterocyclic rings. The first two heterocyclic compounds of this composition, $N_3P_3Cl_6$ and $N_4P_4Cl_8$, were isolated by reaction of PCl_5 with NH_4Cl (Gladstone & Holmes, 1864; Rose, 1834). Interest in the chemistry of these compounds has continued for many years, as there are a variety of applications. Cyclophosphazene derivatives generally have beneficial effects on biological processes and DNA interactions (Asmafiliz et al., 2009; Işıklan et al., 2010) because they decompose into non-toxic small molecules. In terms of ionic liquids (Omotowa et al., 2004),, liquid crystals (Jiménez et al., 2011), flame retardants (Shin et al., 2010), and especially spirocyclic triphosphazene derivatives, that can form inclusion bonds with both organic and inorganic molecules (Allcock et al., 1981; Reynes et al., 2011), cyclophosphazene derivatives are also of great interest.

Nucleophilic substitution reactions of cyclotriphosphazene with bifunctional nucleophiles such as diols, diamines and aminoalcohols have been the subject of intense investigation for decades (Okumuş et al., 2017; Tümer et al., 2015). It has been observed that $N_3P_3Cl_6$ and bifunctional reagents give spiro-, ansa-, bino- and open-chain (vibrational) products in the reactions. There is limited research on the reactions between $N_3P_3Cl_6$ and N-substituted amino alcohols (Begeç, 2022; Beşli et al., 2007; Chandrasekhar et al., 1984; Coles et al., 2004; Eçik et al., 2012; Işıklan, Sayın, et al., 2016; Işıklan et al., 2013a, 2013b; Işıklan, Yıldırım, et al., 2016). Microwave-assisted synthesis is a new concept in the synthetic chemistry. Several organic reactions have been successfully carried out using this technique. In contrast to conventional methot, microwave-assisted synthesis has been shown to drastically reduce reaction times and increase overall yields. Our previous work was the first to report a study comparing conventional and microwave irradiation methods for nucleophilic substitution reactions of cyclotriphosphazene derivatives (Işıklan et al., 2010). In this work, it was demonstrated that the microwave irradiation method for the synthesis of fully substituted cyclotriphosphazenes is a more powerful technique for improving the yields and shortening reaction times than conventional methods.

Raman spectroscopy is one of the most important techniques for determining the structures of compounds in a wide range of samples, from crystals to biological tissues, from aqueous solutions to protein structures. Infrared spectroscopy (IR) and Raman spectroscopy are similar analytical techniques. Raman, on the other hand, monitors the vibrational change of bonds in a group while IR monitors the atoms of a functional group in both stretching and vibrational modes. For a given specific chemical or functional group, the IR peak frequency and Raman frequency shift are identical. The Raman expression depends on the polarizability of a group. This is the speed at which a group moves in an electric field. The most important determinant of this variable is the ease with which electrons move in the bond creating a temporary dipole. The polarizability is also high when there is a high electron concentration in a bond and a dense group or molecule. Therefore, Raman is generally more sensitive to the molecular framework of a stain rather than a specific functional group as at IR. Raman spectroscopy allows us to obtain information about inorganic and organic compounds. Raman is also very useful in identifying functional groups and fingerprints of organic molecules. Raman vibrations are very important for the determination of functional groups, because the vibrations occur in molecules as a whole rather than, not in isolated molecules.

In the present work, we report new spiro-tetrachlorocyclotriphosphazene derivatives (1-4) (Figure 1) synthesized by the reaction of hexachlorocyclotriphosphazene with N-substituted amino alcohols in THF at 25^{o}C. The new spiro-tetrachlorocyclotriphosphazene derivatives were fully characterized by FT-Raman, GC-MS, FTIR and NMR spectroscopy techniques.

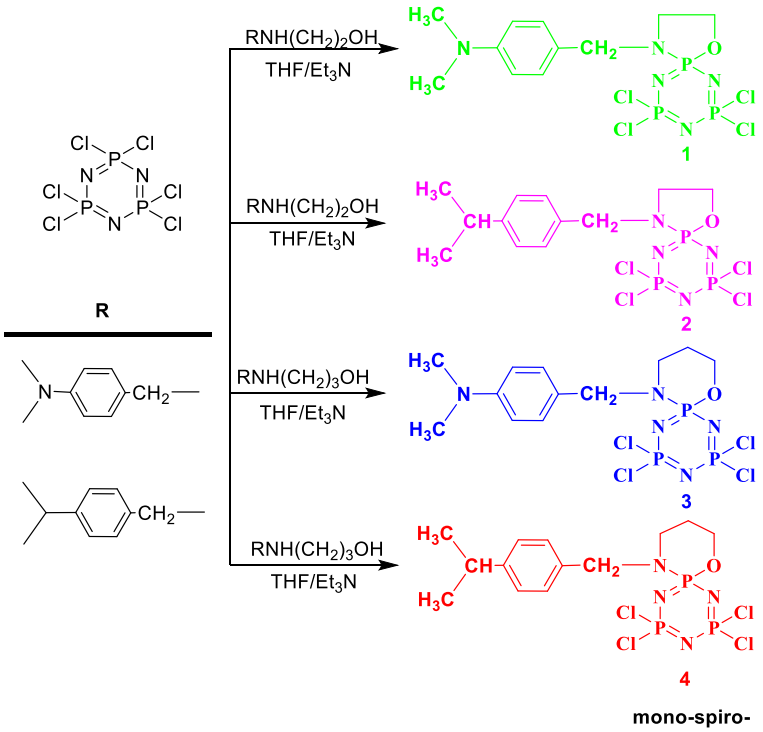


Figure 1. Reactions of Nucleophiles with the $N_3P_3Cl_6$.

2. Method

2.1. Materials

$N_3P_3Cl_6$ (Aldrich), was purified with n-hexane. Ethanolamine, 4-dimethylaminobenzaldehyde and 4-isopropylbenzaldehyde (Sigma-Aldrich) were used commercially. Standard techniques were used to dry and purify the reaction solvents (Perrin et al., 1966). All reactions were chromatographed with silica gel and TLC in different solvents. TLC was used in different solvents to follow all of the reactions. NMR spectra were recorded using a Bruker DPX FT-NMR (500 MHz) spectrometer and IR spectra were recorded using a VERTEX70V FTIR spectrometer equipped with a diamond ATR device. Elemental analyses were performed using the Elementar Microcube instrument. The BRUKER Senterra spectrometer at 732 nm was used to record the RAMAN spectra.

2.2. Preparation of the compounds.

N-substituted amino alcohols were prepared by adapting the method specified in the literature. (Dagan & Lowden, 2003).

2.3. Synthesis of compound 1

Hexachlorocyclotriphosphazene (2.00 g) in THF (125 mL) was dissolved in a 250 mL bottom flask. Then, N-benzyl-4-dimethylylaminoethanol (1.104 g) and triethylamine (5.00 mL) added to medium using a dropping funnel. It was allowed to react for 24 hours at 25oC and in an inert atmosphere. The reaction medium was terminated in a controlled manner by TLC. The precipitated part in the reaction medium was filtered. Solvent of the filtrate was removed with the help of rotary evaporator. The remainder was purified by medium pressure liquid chromatography. The product was then crystallized with n-hexane. The yield, based on hexachlorocyclotriphosphazene,, was 1.28 g (47 %). R_f = 0.75 (Toluene:THF 5:1) and mp: 130.2 °C. MS ESCI+: m/z: calcd 468,93; found 469.86 (M+H+). Anal. Calcd. for $C_{11}H_{16}N_5P_3OCl_4$; C, 28.17; H, 3.44; N, 14.93. Found; C, 28.03; H, 3.474; N, 14.64. FTIR (cm^{-1}): ν 2971(C-H arom.), 2904(C-H aliph.), 1228; 1165 (P=N),1021 (C-O), 920; 965 (P-O), 566; 505(P-Cl). ^{1}H NMR (400 MHz, $CDCl_3$, ppm): δ 2.37 (s, 6H, NCH_3), 3.28 (m, 2H, NCH_2), 4.08 (d, 2H, $^3J_{PH}$ = 9.5 Hz, $ArCH_2$), 4.36 (m, 2H, OCH_2), 7.26 (d, 2H, Ar-H), 7.20 (d, 2H, Ar-H). ^{13}C NMR: 21.28, 26.04 45.59, 51.05, 129.77,130.06, 133.95, 138.36.

2.4. Synthesis of compound 2

Hexachlorocyclotriphosphazene (2.00 g) in THF (125 mL) was dissolved in a 250 mL bottom flask. Then, N-benzyl-4-isopropylaminoethanol (1.098 g) and triethylamine (5.00 mL) added to medium using a dropping funnel. It was allowed to react for 24 hours at 25oC and in an inert atmosphere. The reaction medium was terminated in a controlled manner by TLC. The precipitated part in the reaction medium was filtered. Solvent of the filtrate was removed with the help of rotary evaporator. The remainder was purified by medium pressure liquid chromatography. The product was then crystallized with n-hexane. The yield, based on hexachlorocyclotriphosphazene, The product was then crystallized with n-hexane. The yield, in terms of hexachlorocyclotriphosphazene, was 1.21 g (45 %). R_f = 0.70 (Toluene:THF 5:1) and mp: 124 °C. MS ESCI+: m/z: calcd 467,93; found 468.86 (M+H+). Anal. Calcd. for $C_{12}H_{17}N_4P_3OCl_4$; C, 30.80; H, 3.66; N, 11.97. Found; C, 30.49; H, 3.47; N, 11.34. FTIR (cm^{-1}): ν 2958 (C-H arom.), 2930(C-H aliph.), 1221; 1172 (P=N),1023 (C-O), 926; 970 (P-O), 570; 514(P-Cl). ^{1}H NMR (400 MHz, $CDCl_3$, ppm): δ 1.27 (s, 6H, $CHCH_3$), 2.92 (m, 1H, $CHCH_3$), 3.27 (m, 2H, NCH_2), 4.07 (d, 2H, $^3J_{PH}$ = 9.5 Hz, $ArCH_2$), 4.37 (m, 2H, OCH_2), 7.24 (d, 2H, Ar-H), 7.33 (d, 2H, Ar-H). ^{13}C NMR: δ 23.99, 33.83 45.92,47.76, 65.57, 126.80,128.23, 133.43, 148.69.

2.5. Synthesis of compound 3

Hexachlorocyclotriphosphazene (2.00 g) in THF (125 mL) was dissolved in a 250 mL bottom flask. Then, N-benzyl-4-dimetyhlaminopropane (1.196 g) and triethylamine (5.00 mL) added to medium using a dropping funnel. It was allowed to react for 24 hours at 25oC and in an inert atmosphere. The reaction medium was terminated in a controlled manner by TLC. The precipitated part in the reaction medium was filtered. Solvent of the filtrate was removed with the help of rotary evaporator. The remainder was purified by medium pressure liquid chromatography. The product was then crystallized with n-hexane. The yield, based on hexachlorocyclotriphosphazene,, was 1.21 g (45 %). R_f = 0.68 (Toluene:THF 5:1) and mp: 132 °C. MS ESCI$^+$: m/z: calcd 482.94; found 484.12 (M+H$^+$). Anal. Calcd. for $C_{12}H_{18}N_5P_3OCl_4$; C, 29.84; H, 3.76; N, 14.50. Found; C, 29.63; H, 3.74; N, 14.64. FTIR (KBr, cm^{-1}): ν 2958(C-H arom.), 2900(C-H aliph.), 1237; 1176 (P=N),1021 (C-O), 927; 947 (P-O), 583; 516 (P-Cl). ^{1}H NMR (400 MHz, $CDCl_3$, ppm): δ 2.26 (s, 2H, $ArCH_2$), 3.33 (s, 6H, NCH_3), 3.39 (m, 2H), 4.25 (d, 2H, NCH_2), 4.74 (m, 2H), 7.20 (d, 2H, Ar-H), 7.63 (d, 2H, Ar-H).

2.5. Synthesis of compound 4

Hexachlorocyclotriphosphazene (2.00 g) in THF (125 mL) was dissolved in a 250 mL bottom flask. Then, N-benzyl-4-isopropylaminopropane (1.190 g) and triethylamine (5.00 mL) added to medium using a dropping funnel. It was allowed to react for 24 hours at 25oC and in an inert atmosphere. The reaction medium was terminated in a controlled manner by TLC. The precipitated part in the reaction medium was filtered. Solvent of the filtrate was removed with the help of rotary evaporator. The remainder was purified by medium pressure liquid chromatography. The product was then crystallized with n-hexane. The yield, based on hexachlorocyclotriphosphazene, was 1.21 g (45 %). Rf = 0.65 (Toluene:THF 5:1) and mp: 128 °C. MS ESCI$^+$: m/z: calcd 481,95; found 483.12 (M+H$^+$). Anal. Calcd. for $C_{13}H_{19}N_4P_3OCl_4$; C, 32.39; H, 3.97; N, 11.62. Found; C, 32.03; H, 3.96; N, 11.56. FTIR (KBr, cm^{-1}): ν 2959(C-H arom.), 2900(C-H aliph.), 1223; 1165 (P=N),1041 (C-O), 927; 946 (P-O), 580; 515(P-Cl). ^{1}H NMR (400 MHz, $CDCl_3$, ppm): δ 1.14 (s, 6H), 1.81 (m, 2H), 2.80 (m, 1H), 2.95 (m, 2H), 3.84 (d, 2H), 4.28 (m, 2H), 7.09 (d, 2H, Ar-H), 7.18 (d, 2H, Ar-H).

3. Results and Discussion

The monospirocyclic cyclotriphosphazene derivatives (**1-4**) were synthesized by conventional methods at room temperature, by reacting N-substituted aminoalcohols and $N_3P_3Cl_6$ in THF. All studies, including NMR, FTIR, FT-RAMAN, and MS data, are in agreement with the proposed calculations for the structures of the compounds.

3.1. FTIR, FT-RAMAN and NMR spectroscopy

In the FTIR spectra of all phosphazenes, stretching bands between 1228 and 1165 cm^{-1} were visible, which were caused by the vP=N bonds in the phosphazene ring. For the partially substituted phosphazenes (**1-4**) asymmetric and symmetric stretching P-Cl absorption peaks occured at 566-505 cm^{-1} and 570-514 cm^{-1}, respectively. While the aliphatic C-H protons exhibited stretching absorption peaks in the range of 2930 cm^{-1}, the Ar-H protons were seen in the range of 2958 cm^{-1}. In addition P-O absorption bands were observed between 970 and 926 cm^{-1}. The FT-IR spectra are shown in Figure 2.

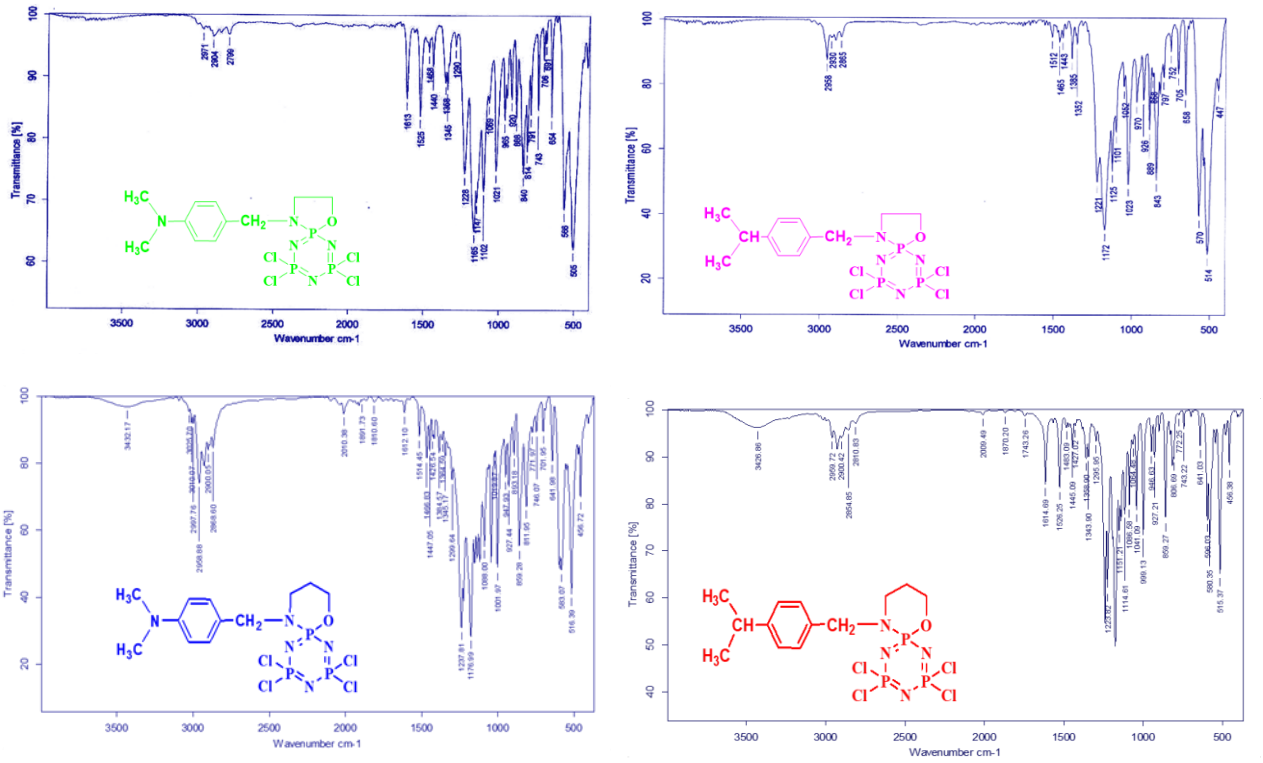


Figure 2. FT-IR spectra of compounds (**1-4**).

In the FT-RAMAN spectra of all phosphazenes, stretching bands between 1215 and 1191 cm^{-1} were caused by the vP=N bonds in the phosphazene ring. For the partially substituted phosphazenes (**1-4**) asymmetric and symmetric stretching P-Cl absorption peaks occurred at 346 cm^{-1} and 688 cm^{-1} respectively. While the aliphatic C-H protons exhibited stretching absorption peaks at a range of 2870-2962 cm^{-1}, the Ar-H protons were seen at a range of 2999-3063 cm^{-1}. In addition, the P-O-C absorption bands were observed between 1613 and 1615 cm^{-1}. The FT-RAMAN spectra are shown in Figure 3.

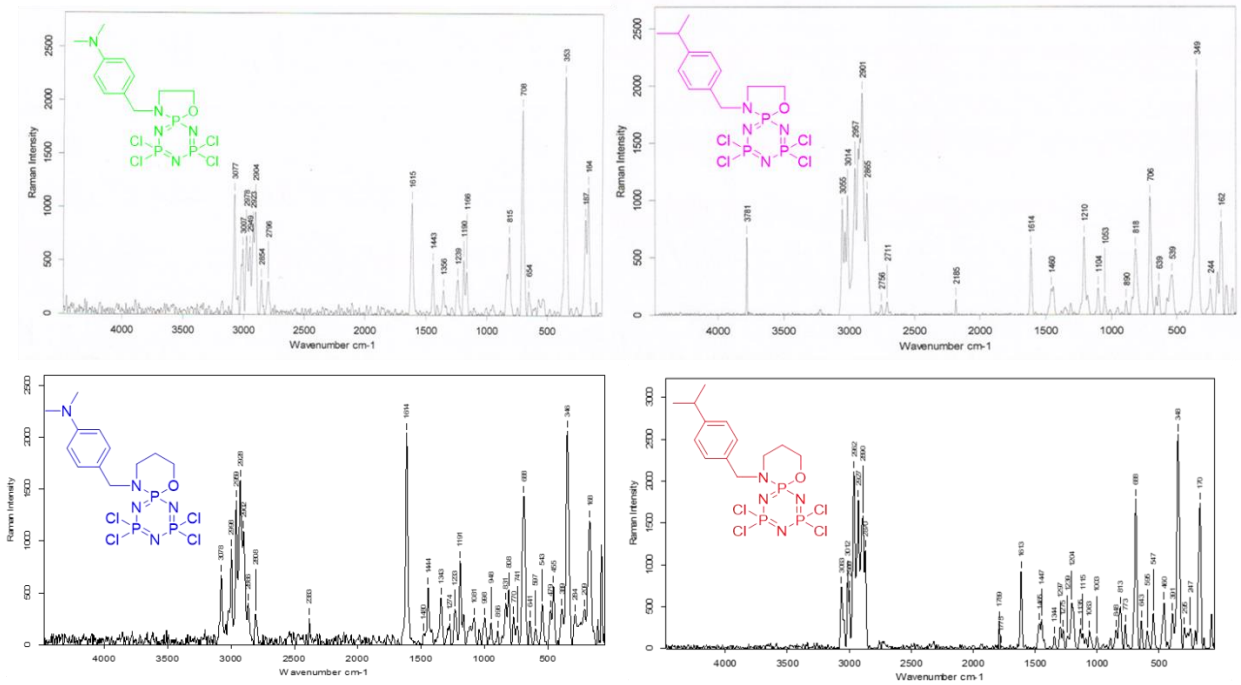


Figure 3. FT-RAMAN spectra of compounds (**1-4**).

Table **1** contains ^{31}P NMR data of phosphazenes. The data show that all phosphazenes have a spiro structure. Compounds **1–4** exhibit typical five-line resonance patterns due to the triplet P atom (spiro) and two additional P atoms of the doublet. In Figure **4** the spin system is referred to as AX_2.

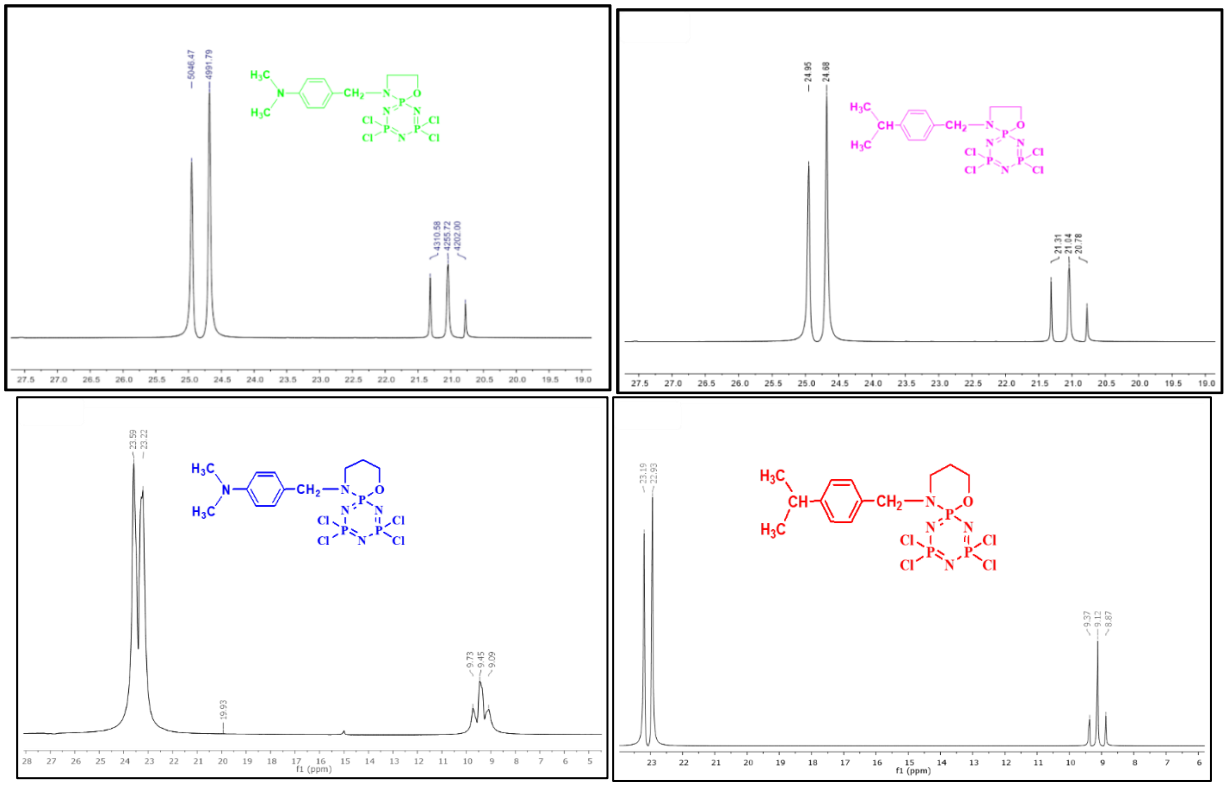


Figure 4. ^{31}P NMR spectra of compound **1-4.** Signals showing AX_2 spin system.

Table 1. ^{31}P NMR parameters

^{31}P NMR chemical shifts (ppm)					
Comp.	Spin System	>PA	$>PX_2$	X	$^{2}J_{PNP}$ coupling constants(Hz)
1	AX_2	21.27	25.10	Cl	52.4
2	AX_2	21.04	24.95	Cl	55.7
3	AX_2	9.45	23.59	Cl	55.7
4	AX_2	9.12	22.95	Cl	55.7

Information from NMR spectra of phosphazene derivatives was used to determine NMR signals based on chemical shifts, multiplications and binding constants. Protons of Ar-CH_2 protons in benzyl groups were observed in pairs at positions **1-4,** respectively. The structures of the compounds were found to be compatible with the NMR spectra.

Conclusion

The results reported here, in conjunction with previous studies of similar systems, indicate that the reactions of N-substituted aminoalcohols with $N_3P_3Cl_6$ lead to spirocyclotriphosphazenes (**1-4**). Elemental analysis, ESI-MS, FT-Raman, FTIR, and NMR spectroscopic techniques have been used to describe all of these new spirocyclophosphazene derivatives **(1-4).**

Raman spectroscopy is widely used to obtain chemical information about the interaction of intramolecular bonds of newly synthesized compounds and drugs, the effects of these compounds on the cell, and understanding their mechanisms. In this study, the changes in molecular interactions of cyclophosphazene derivatives were investigated by Raman spectroscopy. In addition, the anticarcinogenic, antibacterial and DNA interactions of these compounds are other topics that can be studied. Thus, these properties of compounds the produced can be studied.

Acknowledgement

The author acknowledges the "Aksaray University" and "Kırıkkale University" for supports.

Conflicts of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

Allcock, H. R., Austin, P., & Rakowsky, T. (1981). Diazo coupling reactions with poly (organophosphazenes). *Macromolecules*, *14*(6), 1622-1625.

Asmafiliz, N., Kılıc, Z., Öztürk, A., Hökelek, T., Koc, L. Y., Açık, L., Kısa, O. z. l., Albay, A., Üstündağ, Z., & Solak, A. O. (2009). Phosphorus− Nitrogen Compounds. 18. Syntheses, stereogenic properties, structural and electrochemical investigations, biological activities, and DNA interactions of new spirocyclic Mono-and bisferrocenylphosphazene derivatives. *Inorganic chemistry*, *48*(21), 10102-10116.

Begeç, S. (2022). Synthesis and structural characterization of N, N-spiro cyclotriphosphazene derivatives with one stereogenic center. *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*, 1-6.

Beşli, S., Coles, S. J., Davies, D. B., Hursthouse, M. B., Kılıç, A., & Shaw, R. A. (2007). A spiro to ansa rearrangement in cyclotriphosphazene derivatives. *Dalton Transactions*(26), 2792-2801.

Chandrasekhar, V., Krishnamurthy, S. S., Manohar, H., Murthy, A. V., Shaw, R. A., & Woods, M. (1984). Studies of phosphazenes. Part 17. Reaction of hexachlorocyclotriphosphazatriene with N-methylethanolamine: X-ray crystal structure of a dispirocyclotriphosphazatriene, N 3 P 3 (NMeCH 2 CH 2 O) 2 Cl 2. *Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions*(4), 621-625.

Coles, S. J., Davies, D. B., Eaton, R. J., Hursthouse, M. B., Kılıç, A., Shaw, R. A., Şahin, Ş., Uslu, A., & Yeşilot, S. (2004). Stereogenic properties of 1, 3-disubstituted derivatives of cyclotriphosphazene: cis (meso) and trans (racemic) isomers. *Inorganic Chemistry Communications*, *7*(5), 657-661.

Dagan, I. D., & Lowden, C. T. (2003). Solution-phase parallel synthesis of substituted 1, 2-ethyl and 1, 3-propyl diamines. *Tetrahedron letters*, *44*(41), 7575-7577.

Eçik, E. T., Beşli, S., Çiftçi, G. Y., Davies, D. B., Kılıç, A., & Yuksel, F. (2012). Stereo-selectivity in a cyclotriphosphazene derivative bearing an exocyclic P–O moiety. *Dalton Transactions*, *41*(22), 6715-6725.

Gladstone, J. H., & Holmes, J. (1864). XXVII.—On chlorophosphuret of nitrogen, and its products of decomposition. *Journal of the Chemical Society*, *17*, 225-237.

Işıklan, M., Asmafiliz, N., Ozalp, E. E., Ilter, E. E., Kılıç, Z., Çoşut, B. n., Yesilot, S., Kılıç, A., Öztürk, A., & Hokelek, T. (2010). Phosphorus− nitrogen compounds. 21. syntheses, structural investigations, biological activities, and DNA interactions of new N/O spirocyclic phosphazene derivatives. The NMR behaviors of chiral phosphazenes with stereogenic centers upon the addition of chiral solvating agents. *Inorganic chemistry*, *49*(15), 7057-7071.

Işıklan, M., Sayın, L., Sonkaya, Ö., Hökelek, T., Türk, M., & Oğuztüzün, S. (2016). Synthesis, structural characterization, and cytotoxic activity of new spirocyclic octachlorocyclotetraphosphazenes. *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*, *191*(9), 1216-1222.

Işıklan, M., Sonkaya, Ö., Çoşut, B., Yeşilot, S., & Hökelek, T. (2010). Microwave-assisted and conventional synthesis and stereogenic properties of monospirocyclotriphosphazene derivatives. *Polyhedron*, *29*(6), 1612-1618.

Işıklan, M., Sonkaya, Ö., & Hökelek, T. (2013a). 2-(4-Methylpyridin-2-yl)-4′, 4′, 6′, 6′-tetrakis (pyrrolidin-1-yl)-1H, 2H-spiro [naphtho [1, 2-e][1, 3, 2] oxazaphosphinine-3, 2′-[1, 3, 5, 2, 4, 6] triazatriphosphinine]. *Acta Crystallographica Section E: Structure Reports Online*, *69*(6), o994-o995.

Işıklan, M., Sonkaya, Ö., & Hökelek, T. (2013b). 4′, 4′, 6′, 6′-Tetrachloro-2-(6-methylpyridin-2-yl)-1H, 2H-spiro [naphtho [1, 2-e][1, 3, 2] oxazaphosphinine-3, 2′-[1, 3, 5, 2, 4, 6] triazatriphosphinine]. *Acta Crystallographica Section E: Structure Reports Online*, *69*(6), o861-o862.

Işıklan, M., Yıldırım, E. K., Atiş, M., Sonkaya, Ö., & Çoşut, B. (2016). Structural and computational characterization of 4′, 4′, 6′, 6′-tetrachloro-3-(2-methoxyethyl)-3H, 4H-spiro-1, 3, 2-benzoxaza phosphinine-2, 2′-[1, 3, 5, 2, 4, 6] triazatriphosphinine. *Journal of Molecular Structure*, *1117*, 276-282.

Jiménez, J., Laguna, A., Molter, A., Serrano, J. L., Barberá, J., & Oriol, L. (2011). Supermolecular Liquid Crystals with a Six-Armed Cyclotriphosphazene Core: From Columnar to Cubic Phases. *Chemistry–A European Journal*, *17*(3), 1029-1039.

Mehta, V. P., & Van der Eycken, E. V. (2011). Microwave-assisted C–C bond forming cross-coupling reactions: An overview. *Chemical Society Reviews*, *40*(10), 4925-4936.

Okumuş, A., Elmas, G., Kilic, Z., Ramazanoğlu, N., Acik, L., Türk, M., & Akca, G. (2017). The reactions of N $ _ {3} $ P $ _ {3} $ Cl $ _ {6} $ with monodentate and bidentate ligands: the syntheses and structural characterizations, in vitro antimicrobial activities, and DNA interactions of 4-fluorobenzyl (N/O) spirocyclotriphosphazenes. *Turkish Journal of Chemistry*, *41*(4), 525-547.

Omotowa, B. A., Phillips, B. S., Zabinski, J. S., & Shreeve, J. n. M. (2004). Phosphazene-based ionic liquids: synthesis, temperature-dependent viscosity, and effect as additives in water lubrication of silicon nitride ceramics. *Inorganic chemistry*, *43*(17), 5466-5471.

Perrin, D. D., Armarego, W. L., & Perrin, D. R. (1966). Purification of laboratory chemicals.

Reynes, M., Dautel, O. J., Virieux, D., Flot, D., & Moreau, J. J. (2011). Synthesis and crystal structure of tris (2, 3-triphenylenedioxy) cyclotriphosphazene: a new clathration system. *CrystEngComm*, *13*(20), 6050-6056.

Rose, H. (1834). Ueber eine Verbindung des Phosphors mit dem Stickstoff. *Annalen der Pharmacie*, *11*(2), 129-139.

Shin, Y. J., Ham, Y. R., Kim, S. H., Lee, D. H., Kim, S. B., Park, C. S., Yoo, Y. M., Kim, J. G., Kwon, S. H., & Shin, J. S. (2010). Application of cyclophosphazene derivatives as flame retardants for ABS. *Journal of industrial and Engineering Chemistry*, *16*(3), 364-367.

Tümer, Y., Koç, L. Y., Asmafiliz, N., Kılıç, Z., Hökelek, T., Soltanzade, H., Açık, L., Yola, M. L., & Solak, A. O. (2015). Phosphorus–nitrogen compounds: part 30. syntheses and structural investigations, antimicrobial and cytotoxic activities and DNA interactions of vanillinato-substituted NN or NO spirocyclic monoferrocenyl cyclotriphosphazenes. *JBIC Journal of Biological Inorganic Chemistry*, *20*, 165-178.

MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

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

UMAGD, (2023) 15(3), 82-91.

10.29137/umagd.1252097

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:3 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue

Araştırma Makalesi / Research Article

Investigation of Electrical Conductivity in Cement Mortars with Waste Iron Chips

Rüstem Yılmazel[1*], Ahmet Filazi[2], Muharrem Pul[3]

[1,2,3]*Kırıkkale University, Vocational School, Kırıkkale, Turkiye*

***Başvuru/Received**: 17/02/2023* ***Kabul / Accepted**: 15/08/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Abstract

In this study, the electrical conductivity of cement mortars formed by additive waste iron chip was investigated. Mixtures with fixed water/cement (0.5) ratios and different ratios of iron chip were prepared. Cement mortars were prepared by adding 0%, 1%, 2%, 4%, 8% and 16% by weight of cement in the mixtures and waste iron chip in the range of 0.5 mm to 4 mm in size. Firstly, the flow test was applied to the cement mortars cured in normal water for 7 and 28 days and their flexure and compressive strengths were determined. Then, the electrical conductivity test was applied to the cement mortar samples. As a result, it was observed that the flow diameter values increased as the average length increased from 0.5 mm to 2 mm in 1% and 2% additive of waste iron chip. It was determined that 1% waste iron chip was higher at 4.54% compressive strength compared to the reference sample. As the amount of added waste iron chip increased, the electrical resistivity value in the samples decreased and the electrical conductivity value increased along with it. At the same time, it was determined that the added iron chip size also increased the electrical conductivity.

Key Words

"Waste iron chip, Workability, Mechanical properties, Electrical conductivity"

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

1. Introduction

In recent years, composite materials with cement-binding properties such as self-sensing, heating, conditioning and electromagnetic shielding have been researched and developed (W. Li ve diğerleri, 2022). Wastes and especially heavy metal wastes constitute an important environmental problem and researchers are looking for solutions to environmental problems (Esquinas vd., 2018; Kalpana and Tayu, 2020). In particular, the reuse of these environmental wastes as materials in the construction industry was investigated and the strength and durability properties on the produced composite materials were examined (De la Colina Martínez ve diğerleri, 2019).

Some researchers used metal wastes such as iron and aluminum by replacing them with concrete aggregate (Wang et al., 2018; Fisonga, Wang, & Mutambo, 2019; Li et al., 2019), while some researchers used them as recycled fibers (Domski ve diğerleri, 2017). Especially when the recent studies were examined, it was observed that fiber reinforced composite materials improved the fragility of the material and increased the load carrying capacity (Liu et al., 2020). In addition, they improve and develop their engineering properties (Liu et al., 2020). It also advances sustainable developments in building materials, using waste to industry (Huseien et al., 2021; Yang et al., 2021). Alzaed, 2014 examined the effect of iron chips on the compressive and tensile strength of concrete. It was stated that iron chips improve both compressive and tensile strength (Alzaed, 2014)

Qasrawi et al. reinforced 0%, 15%, 30%, 50% and 100% steel slag in the sample they prepared instead of sand. For sand additive rates (up to 30%), concrete's 28-day tensile strength improved by 1.4–2.4 times and compressive strength by 1.1–1.3 times (Qasrawi, Shalabi, and Asi 2009). Binici et al. investigated the strength and durability properties of mortars and concretes with additive different percentages of iron powder instead of sand in mortar and concrete. They showed that the compressive strength of concrete is 50% higher in 20% iron powder additive (Binici, Sevinç, and Geçkil 2015).

Özyurt and Sancak investigated whether the recycling of iron chips, an industrial waste that will no longer be used and thrown into the nature, can be achieved in concrete cantilever beams. For this purpose, it was investigated how the behavior of the cantilever beam would change by adding 20% of the iron shavings material to the cantilever beams. It was observed that the ductility coefficients increased by 1.53% and the maximum loads they carried decreased by 9.30%, if the above-balance reinforced Cantilever beams, with over-balance reinforcement whose stirrups have a hook angle of 90 degrees, with 20% iron chips added. It has been observed that if the cantilever beams, with over-balance reinforcement, whose hoops have a hook angle of 135 degrees, with 20% iron chips, the ductility coefficients increase by 0.30%, and the maximum loads they carry decrease by 11.95% (Özyurt and Sancak 2020).

Dong et al. investigated the mechanical and electrical properties of concrete containing iron particles and nanographite by-products. They found that the composite nano-graphite content with an iron particle of 1% by weight led to an almost 20% reduction in compressive strength compared to plain concrete, which was larger than nano-graphite. However, they showed that the mechanical behavior of nano-graphite concrete containing iron particles was better than that of nano-graphite concrete at 3 wt% and 5 wt%. They stated that while it caused a 70.3% reduction in electrical resistance at 1% by weight, only 11.3% was observed for nano graphite at the same concentration (Dong et al. 2021).

Li et al. investigated the conductive and mechanical properties of graphite, steel slag (SS) and slag three-phase conductive filler on conductive cementitious composites. Studies have shown that electrical conductivity increases with the addition of graphite. However, it was observed that there was a decrease in the strength part. This study revealed that both the electrical conductivity will increase and the decreased strength can be improved with steel slag and slag (J. Li *et al.*, 2022).

The purpose of this study is to increase the electrical conductivity of materials obtained by reinforcing cement mortars with waste iron chips and thereby improve their electrical properties. The reason for increasing electrical conductivity is to make such materials valuable for various applications and contribute to advanced technology. Cement mortars with high electrical conductivity enable the construction of durable structures for smart buildings, electrical heating systems, electromagnetic shields, and sensitive sensor networks. This study aims to highlight the potential benefits of sustainable use of waste iron chips and contribute to the development of more efficient and environmentally friendly solutions in the industry and technology field.

2. Material And Method

2.1. Materials

In this study; CEM I 42.5 R Portland cement (PC) corresponding to ASTM Type I cement in accordance with TS EN 197-1 was used. The physical and chemical properties of the cement used are given in Table 1.

Table 1. Physical and chemical properties of CEM I 42.5 R Cement

Chemical Properties (%)		Physical Properties	
SiO_2	21.14		
Al_2O_3	5.58	Specific gravit (g/cm^3)	3.10
Fe_2O_3	3.18		
CaO	61.96	Blaine's thinness (cm^2/g)	3351
MgO	2.65		

Table 1.(cont) Physical and chemical properties of CEM I 42.5 R Cement

Chemical Properties (%)		Physical Properties	
Na_2O	0.22	Loss of ignition (%)	2.36
K_2O	0.62		
SO_3	3.10		
S+A+F	29,90		

The standard sand used in the study is the CEN reference sand specified in the TS EN 196-1 produced at the Limak Trakya Cement factory. The mixing ratios of the mortars prepared for the experiments are given in Table 2.

Table 2. Mixing ratios of the samples prepared for the experiment

Sample Name	Iron Chips Rate (%)	Waste Iron Chip Size (mm)	Standard Sand (g)	Water (g)	Cement (g)
S0	-	-	1350	225	450
S1-1	1	0,5-1,0	1350	225	450
S1-2	1	1,0-2,0	1350	225	450
S2-1	2	0,5-1,0	1350	225	450
S2-2	2	1,0-2,0	1350	225	450
S4-1	4	0,5-1,0	1350	225	450
S4-2	4	1,0-2,0	1350	225	450
S8-1	8	0,5-1,0	1350	225	450
S8-2	8	1,0-2,0	1350	225	450
S16-1	16	0,5-1,0	1350	225	450
S16-2	16	1,0-2,0	1350	225	450

Iron chip mixed into cement mortars were subjected to dimensional classification by passing through screen openings of different sizes. The chip are wastes from various iron materials processed in machining benches. Waste iron chip additive into cement mortar are shown in Figure 1. The representation of the prepared test samples is given in Figure 2.

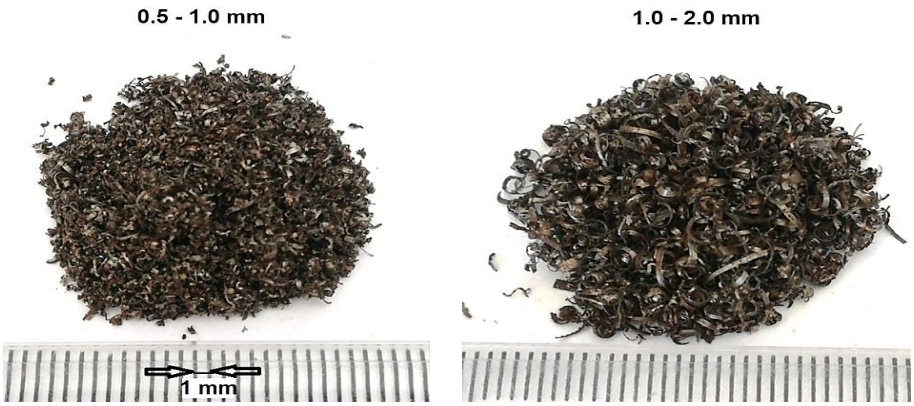


Figure 1. Waste iron chip.

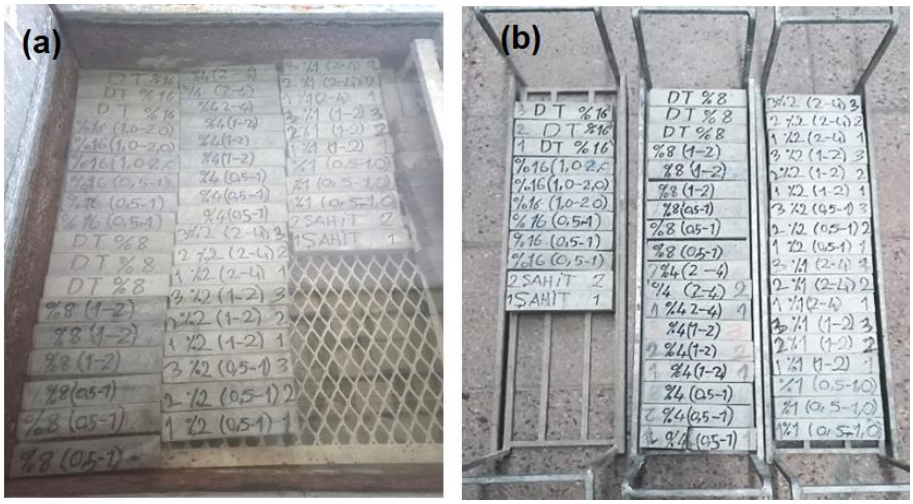


Figure 2. View of the test samples.

2.2. Flow test

In this part, workability measurements of mortar mixtures were made by mini slump test. During the experiment, the mortar mixtures prepared in accordance with TS EN 196-1 were filled into the truncated cone on the flow table. The filling process was carried out in 2 layers, and tamping was applied 25 times on each layer. After the truncated conical mold was lifted slowly, 25 strokes were made in 15 seconds in accordance with TS EN 1015-3 by rotating the agitating device. Finally, the flow diameter in both directions of the flow mortar on the table was measured and the average of these values was calculated. Samples from the images taken during the flow test are given in Figure 3. The images of the mortars with an average chip size of 1-2 mm from the mortars with 0%, 1%, 2%, 4%, 8% and 16% iron chips were selected.

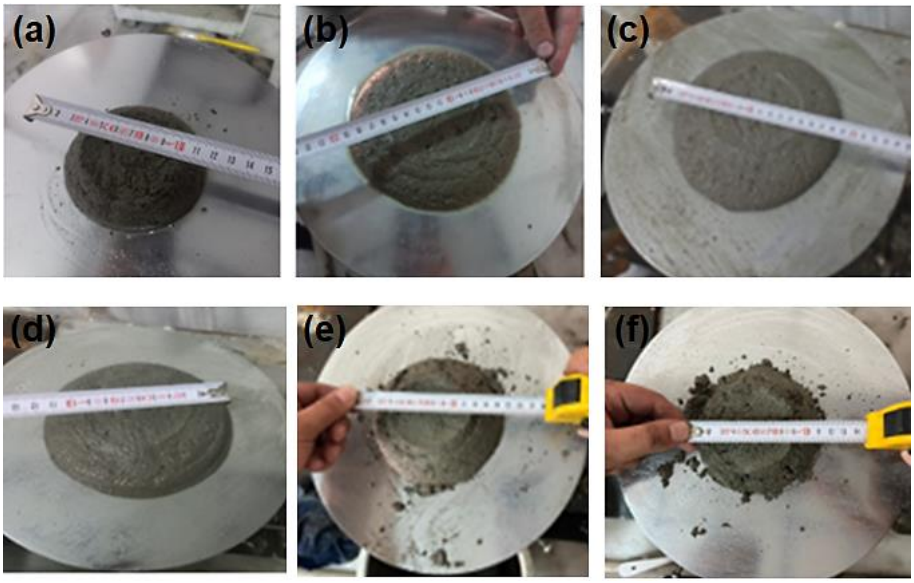


Figure 3. (a) Standard cement mortar; **(b)** 1% Iron chips reinforced; **(c)** 2% Iron chips reinforced; **(d)** 4% Iron chips reinforced; **(e)** 8% Iron chips reinforced; **(f)** 16% iron chips reinforced.

2.3. Determination of flexural and compressive strength

Flexural and compressive strengths of cement mortars reinforced with waste iron chips have been prepared in accordance with TS EN 196-1. 40×40×160 cm3 cement mortars, which were kept in normal (Figure 2a) water for 7 and 28 days for flexural strength, were removed from the curing pool (Figure 2b) and subjected to flexural test with a flexural press at (50±10) N/s loading speed. Compressive strengths were obtained from six 40×40 samples, which were formed as a result of flexural strength. Compressive strength was made with a device with a suitable capacity for the test and adjusted to a loading speed of (2400±200) N/s in accordance with TS 196-1(Standard, 2006).

2.4. Electrical conductivity test

A power supply was used to give the voltage to the material, and a digital multimeter was used to measure the current flowing through the material in the electrical conductivity test. Voltage is applied to any two points of the samples by placing the positive and negative poles of the power supply. In order to measure the current passing through the material more precisely, the power supply has been adjusted to 30V. This voltage value was set to 30V for all samples. The current flowing through each sample was measured with a digital multimeter. Since the sample is not completely homogeneous, the calculation was made by taking at least 5 different measurements for each sample. If there were excessive deviations in the measurements, they were subtracted and the average of the remaining measurement values was taken. The results obtained from the measurement values were evaluated according to Ohm's law and the resistance value of the sample was found. Since the voltage is constant, the resistance and resistivity values of the sample were calculated from the current values obtained from each averaged measurement. In the last stage, electrical conductivity was determined according to the electrical resistivity.

3. Experimental results

3.1. Flow test results

Flow results of mortar samples reinforced with iron chips at 0% (Reference), 1%, 2%, 4%, 8%, 16% by weight of cement and in sizes 0 0.5, 0.5-1 and 1-2 mm are shown in Figure 4.

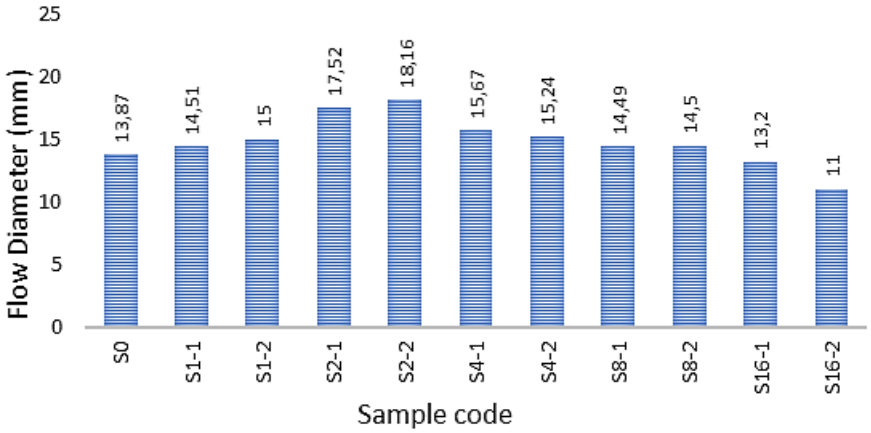


Figure 4. Flow diameters of waste iron chip mortars.

The flow diameter values increase as the average length increases from 0.5 mm to 2 mm in 1% and 2% reinforced of the waste iron chip used in Figure 4. After the 2% additive rate, the flow diameter values decrease. According to a study, they stated that as a partial replacement of fine aggregate, the addition of iron chip in different proportions to the mixtures causes a decrease in the slump and compression factor and reduces the consistency in all mixtures. They stated that while the slump decreased in the range (10–16%), the compression factor decreased in the range (4–16%) (Mohammed Breesem *et al.*, 2022). In a study of iron residues, it was stated that the slump value of the concrete decreased with the increase in the amount of iron ore residue in the concrete. They explained that the reason for this is that more cement mortar is needed to maintain the slump in the concrete and the iron residues have an angular and rough texture, which reduces the workability of the concrete (Shettima *et al.*, 2016). The reason for the reduction can be expressed in the roughness of the surfaces of the waste iron chip, resulting in an increase in surface area which increases the moisture demand. This roughness causes increased friction between the iron waste particles. As a result, it has been shown in the study that waste iron chip affects the workability of new mixes.

3.2. Compressive and flexural test results

The results obtained from the 7- and 28-day compressive and flexural strength tests of waste iron chip-reinforced cement mortars are shown in Figure 5 and Figure 6.

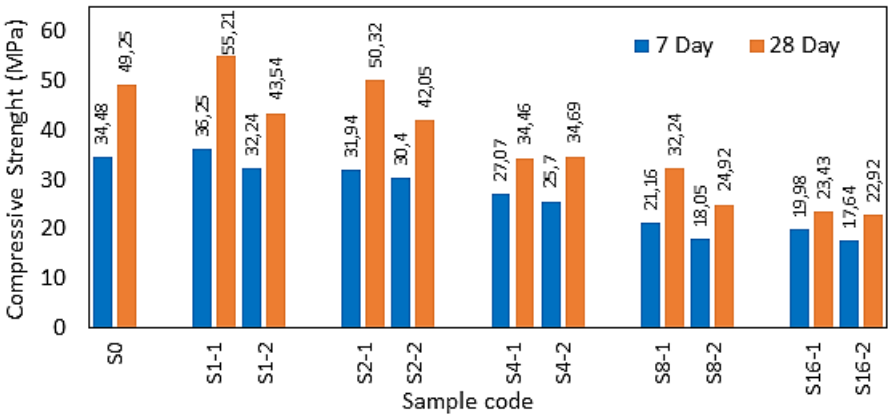


Figure 5. Results of compressive strength test.

The compressive strength of waste iron chip, 0.5-1 mm in size and 1% of the weight of cement reinforced, was compared with the reference sample in Figure 5 . There was an increase of 2.72% in the 7-day compressive strength and 3.48% in the 28-day compressive strength. As the waste iron chip reinforced ratio and the size increased, the compressive strength decreased.

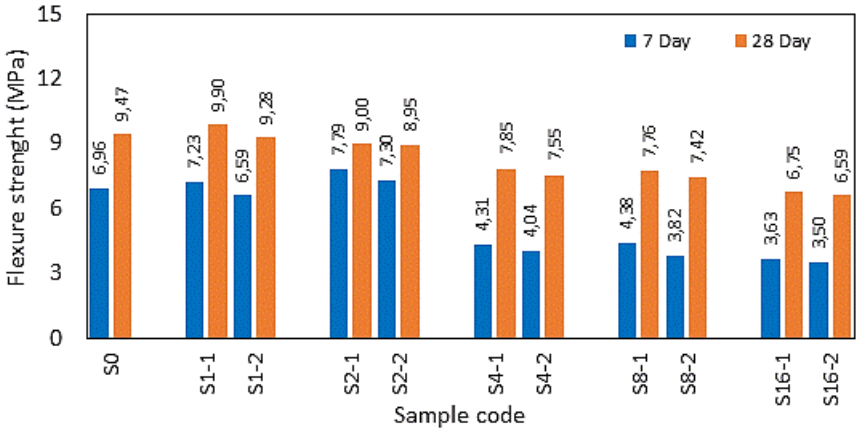


Figure 6. Results of flexural strength test.

The flexural strength of waste iron chips, 0.5-1 mm in size and reinforced by 1% of the cement weight, is compared with the reference sample in Figure 6. There was an increase of 3.95% in the 7-day flexural strength and 4.54% in the 28-day flexural strength. After 1% addition, the flexural strength decreased because the waste iron chips reinforced ratio and the size increased.
As a result, when the flexural and compressive strength values were examined, the iron chips reinforced and the increase in the amount of size had a negative effect on the strength of the material. The reason is that the iron chips reinforced mortar added to the samples reduces the consistency. In addition, it caused a negative effect as it caused gaps in the cement mortar. Li et al. conducted experiments by adding iron ore deposits to cement. They stated that the decrease in 28-day compressive strength was approximately 9.79%. They explained that there is a decrease in strength because iron ore deposits are not activated by cement and less hydration products are produced (Xiao-, Li and Fan, 2013).

3.3. Electrical conductivity test results

Electrical conductivity and resistivity values of waste iron chips reinforced cement mortars by changing different additive ratios and sizes are given in Table 3. The graphs created according to the values in the Table 4 are given in Figure 7.

Table 3. Resistivity and conductivity values according to additive ratios

Sample No	Waste iron chips ratio (%)	Waste iron chips size (mm)	Resistance (mΩ)	Resistivity (KΩm)	Conductivity (µS/m)
S1-1	1	0,5 - 1	16,393	163,93	6,1
S1-2	1	1,0 - 2	8,1632	81,6	12,255
S2-1	2	0,5 - 1	13,186	131,86	7,58
S2-2	2	1,0 - 2	6,29	62,9	15,898
S4-1	4	0,5 - 1	4,36	43,6	22,93
S4-2	4	1,0 - 2	3,614	36,14	27,67
S8-1	8	0,5 - 1	2,95	29,5	33,898
S8-2	8	1,0 - 2	2,557	25,57	39,108
S16-1	16	0,5 - 1	0,306	3,06	326,79
S16-2	16	0,5 - 1	2,557	4,89	204,49

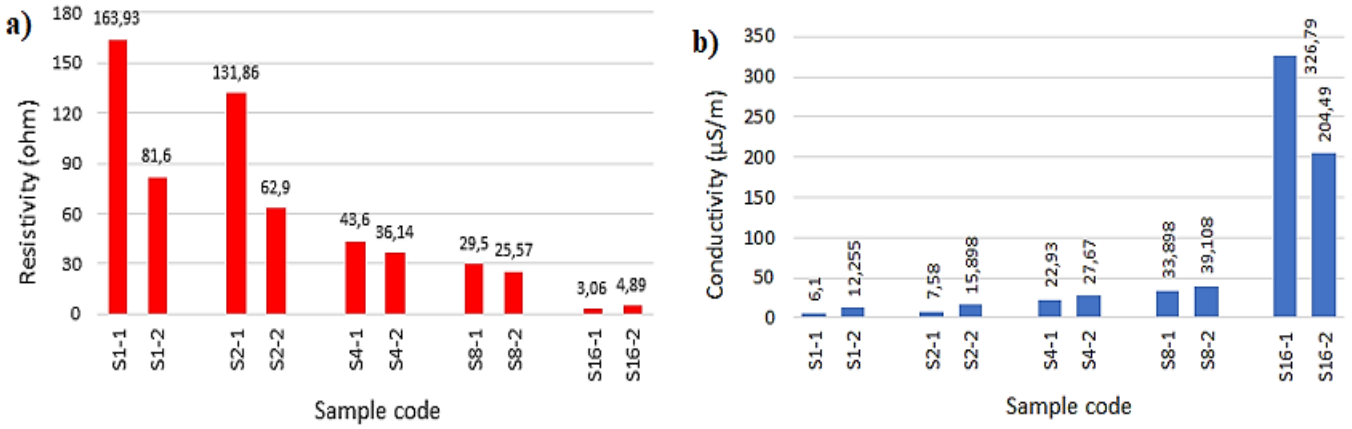


Figure 7. a) The effect of waste iron chipps reinforced in different sizes on electrical resistivity; b) The effect of waste iron chips reinforced in different sizes on electrical conductivity.

The effect of cement mortars formed by adding different waste iron chips sizes on electrical conductivity is shown in Figure 7-b. It was observed that as the size of the waste iron chips increased, its electrical conductivity also increased. When 1% of waste iron chips is added; the electrical conductivity of the waste iron chips added by passing through a 1-2 mm screen increased by 100.9% compared to the electrical conductivity of the waste iron chips added by passing through a 0.5-1 mm screen. When 2 % of waste iron chips is added; the electrical conductivity of the waste iron chipps added by passing through a 1-2 mm screen increased by 109.7% compared to the electrical conductivity of the waste iron chips added by passing through a 0.5-1 mm screen. When 4% of waste iron chips is added; the electrical conductivity of the waste iron chips added by passing through a 1-2 mm screen increased by 20.67% compared to the electrical conductivity of the waste iron chippings added by passing through a 0.5-1 mm screen. When 8% of waste iron chips is added; The electrical conductivity of the waste iron chips added by passing through a 1-2 mm screen increased 15.37% compared to the electrical conductivity of the waste iron chips added by passing through a 0.5-1 mm screen. When 16% of waste iron chips is added; the electrical conductivity of the waste iron chips added by passing through a 1-2 mm screen decreased by 37.4% compared to the electrical conductivity of the waste iron chips added by passing through a 0.5-1 mm screen. According to the results; as the size of the waste iron chips added in small additive ratios increases, the electrical conductivity also increases greatly. But; when the additive ratio increased, it was observed that there was not much gap in the material for conductivity. In this case, there was no significant increase in the level of electrical conductivity. Figure 8 shows how the electrical conductivity changes with the addition of waste iron chips to the cement at different rates.

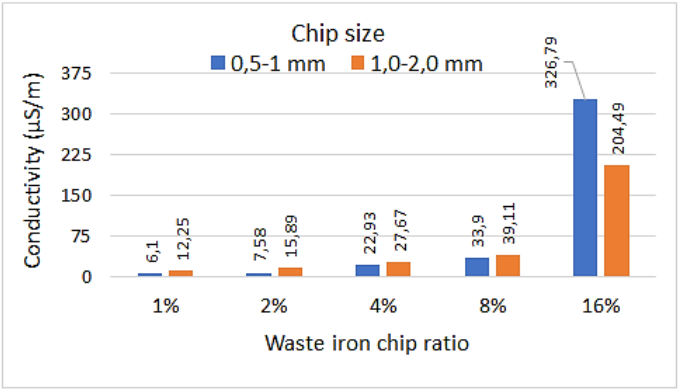


Figure 8. The effect of waste iron chips reinforced at different additive ratios on the electrical conductivity.

In the measurements with reference to 0.5-1 mm waste iron chips; The electrical conductivity of the waste iron chips added at the rate of 8% increased by 455.7% compared to the electrical conductivity of the waste iron chips added at the rate of 1%. However, when the additive rate was 16%, it was observed that the electrical conductivity increased by 861.7% compared to 8%. In measurements with reference to waste iron chips of 1-2 mm; the electrical conductivity of the waste iron chips added at 8% additive rate increased by 219.11% compared to the electrical conductivity of the 1% waste iron chips added. However, when the additive rate was 16%, it was observed that the electrical conductivity increased by 422.88% compared to 8%. This shows that the electrical conductivity increases as the proportion of waste iron chips is added to the cement too much. With the increase in the amount of waste iron chips added, the gaps between the cement started to close. Thus, since the current flows through the material more easily, the electrical conductivity value has also increased. As the size of the added iron chips increases, the gaps in the material are more easily closed. As these gaps are closed, a path is formed in the material that will facilitate the electric current. Since the added iron filings are conductive, the increase in size facilitates the movement of electrons passing on the material. As both the additive ratio and the size increase, a conductive path is formed in the material. Electron flow is also facilitated on this conductive path.

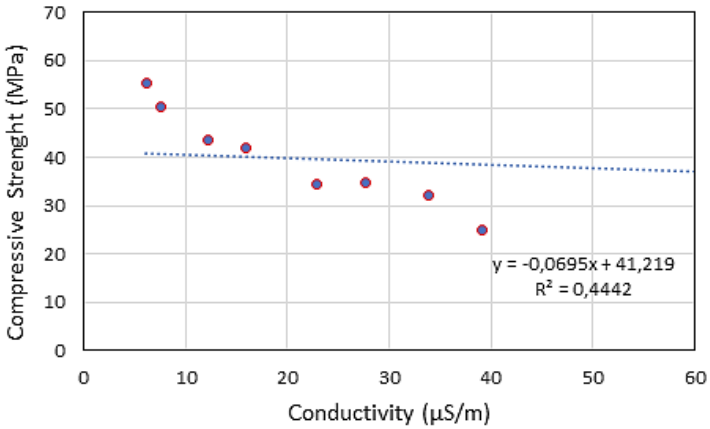


Figure 9. Correlation graph between compressive strength and electrical conductivity

Equations 1 is used to express the correlation between compressive strength and electrical conductivity. In Equation 1, y is the compressive strength and x is the conductivity. This equation is a linear regression model that connects the compressive strength to the electrical conductivity value.

$$y = -0{,}0695x + 41{,}219 \quad (1)$$

R^2 refers to the coefficient of determination value. R^2 is a statistical measure that expresses the fit of the model and shows the percentage of the change in the dependent variable being explained by the independent variables. The R^2 value takes a value between 0 and 1. R^2 value is calculated as 0.4442. The R^2 value indicates that 44.42% of the variation in model dependent variables can be explained by independent variables. Therefore, it can be said that the relationship between Conductivity (x) and Compressive Strength (y) is quite low and weak.

4. Conclusion

The results for cement mortars with waste iron chips can be summarized as follows.Due to the decrease in consistency, the workability was adversely affected with the addition of waste iron by weight of cement and the increase in the size ratio. It has been observed that 0.5-1 mm waste iron chips have a positive effect on flexural and compressive strength at 1% replacement rate. However, as the iron waste chips reinforced rate increased, flexural and compressive were adversely affected. The reason is that the material has reduced its compactness. It is seen that the results are close to the reference sample at 4%. He revealed that this sample could be used for special purposes.

It was concluded that the electrical conductivity value increased as the amount of waste iron chips added to the cement mortars increased. It was observed that the increase in the size of the waste iron chips positively affected the electrical conductivity. The reason is that it sticks in the gaps in the cement mortars. Thus, the electrical conductivity value has increased as the current flows through it more easily.

As a result, adopting cement mortars with high electrical conductivity and incorporating waste iron filings into cement mixtures not only embraces an environmentally friendly and sustainable approach but also contributes to the development of innovative solutions in the industrial and technology sectors. This enhances the durability and energy efficiency of structures while optimizing waste management processes and promoting more efficient use of natural resources. This innovative approach paves the way for more interconnected and sustainable structures, thus playing a crucial role in creating an environmentally conscious future. Additionally, it will inspire similar eco-friendly and innovative solutions in other industries. In conclusion, embracing these high-tech and eco-friendly cement mixtures represents a significant step towards a more connected, energy-efficient, and sustainable future. It fosters a revolution in the way we construct and interact with structures, and simultaneously supports sustainable waste management practices. By collaborating and investing in such environmentally friendly materials and technologies, we can contribute to building a safer, more sustainable, and eco-friendly world for generations to come.

References

Alzaed, A.N. (2014) 'Effect of Iron Filings in Concrete Compression and Tensile Strength', *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology*, 3(4), pp. 121–125.

Anike, E.E. *et al.* (2020) 'Effect of mix design methods on the mechanical properties of steel fibre-reinforced concrete prepared with

recycled aggregates from precast waste', *Structures*, 27, pp. 664–672. Available at: https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2020.05.038.

Bostanci, S.C., Limbachiya, M. and Kew, H. (2018) 'Use of recycled aggregates for low carbon and cost effective concrete construction', *Journal of Cleaner Production*, 189, pp. 176–196. Available at: https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.04.090.

Domski, J. *et al.* (2017) 'Comparison of the mechanical characteristics of engineered and waste steel fiber used as reinforcement for concrete', *Journal of Cleaner Production*, 158, pp. 18–28. Available at: https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.04.165.

Esquinas, A.R. *et al.* (2018) 'Mechanical and durability behaviour of self-compacting concretes for application in the manufacture of hazardous waste containers', *Construction and Building Materials*, 168, pp. 442–458. Available at: https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.02.138.

Fisonga, M., Wang, F. and Mutambo, V. (2019) 'Sustainable utilization of copper tailings and tyre-derived aggregates in highway concrete traffic barriers', *Construction and Building Materials*, 216, pp. 29–39. Available at: https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.05.008.

Huseien, G.F. *et al.* (2021) 'Development of a sustainable concrete incorporated with effective microorganism and fly Ash: Characteristics and modeling studies', *Construction and Building Materials*, 285, p. 122899. Available at: https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122899.

Kalpana, M. and Tayu, A. (2020) 'Experimental investigation on lightweight concrete added with industrial waste (steel waste)', *Materials Today: Proceedings*, 22, pp. 887–889. Available at: https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.11.096.

De la Colina Martínez, A.L. *et al.* (2019) 'Recycled polycarbonate from electronic waste and its use in concrete: Effect of irradiation', *Construction and Building Materials*, 201, pp. 778–785. Available at: https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.12.147.

Li, H.N. *et al.* (2019) 'Experimental research on dynamic mechanical properties of metal tailings porous concrete', *Construction and Building Materials*, 213, pp. 20–31. Available at: https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.04.049.

Li, J. *et al.* (2022) 'Mechanical and conductive performance of electrically conductive cementitious composite using graphite, steel slag, and GGBS', *Structural Concrete*, 23(1), pp. 533–547. Available at: https://doi.org/10.1002/suco.202000617.

Li, W. *et al.* (2022) 'Advances in multifunctional cementitious composites with conductive carbon nanomaterials for smart infrastructure', *Cement and Concrete Composites*, 128, p. 104454. Available at: https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2022.104454.

Liu, X. *et al.* (2020) 'Comparison of the structural behavior of reinforced concrete tunnel segments with steel fiber and synthetic fiber addition', *Tunnelling and Underground Space Technology*, 103, p. 103506. Available at: https://doi.org/10.1016/J.TUST.2020.103506.

Mohammed Breesem, K. *et al.* (2022) 'Properties of concrete using waste iron', *Materials Today: Proceedings* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.11.084.

Shettima, A.U. *et al.* (2016) 'Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete', *Construction and Building Materials*, 120, pp. 72–79. Available at: https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.05.095.

EN, T. 196-1 Methods of Testing Cement–Part 1: Determination of Strength Turkish Standard Institution, Ankara (2016)

EN, T. 197-1 Cement-Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements Turkish Standard Institution, Ankara (2012

Wang, X. *et al.* (2018) 'Development of a novel cleaner construction product: Ultra-high performance concrete incorporating lead-zinc tailings', *Journal of Cleaner Production*, 196, pp. 172–182. Available at: https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.06.058.

Xiao-, Z., Li, Q. and Fan, H. (2013) 'C40 Effect of Iron Tailings Powder on Properties of C40 Concrete', 32(2013), p. 2563.

Yang, S. *et al.* (2021) 'Preparation and properties of ready-to-use low-density foamed concrete derived from industrial solid wastes', *Construction and Building Materials*, 287, p. 122946. Available at: https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122946.

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development
UMAGD, (2023) 15(3), s92-s97.
10.29137/umagd.1320446
Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:3 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue
Araştırma Makalesi / Research Article

Vakumlanmış Silindirik Güneş Kollektör Tüplerinde Geometrik Uyumluluğun Sayısal Analizi

A Numerical Analysis For Geometrical Compatibility Of Cylindrical Evacuated Tubes

Ömer Resuloğlu[1]

[1]*Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 27/06/2023* ***Kabul / Accepted**: 21/08/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Öz

Bu çalışmada , silindirik geometriye sahip ve vakumlanmış güneş kollektör sistemlerinin optik verimleri ZEMAX optik tasarım programı aracılığıyla sayısal olarak incelenmiştir. Kollektör sistemlerinin verimlerine etki eden faktörlerden ; dış cam, toplayıcı tüp, yansıtıcı yüzeyin birbirlerine göre konumları değişken olarak alınmış olup , kollektör sisteminin olası bir takip sistemiyle ve takip sistemi olmaksızın en iyi çalışma şartları belirlenmiştir. Yutucu yüzey merkezinin dış cam borunun alt yüzeyine en yakın olduğu konumunda toplanan ortalama ışınımın maksimum olduğu belirlenmiş, dış cam boru üst yüzeyi ile yutucu yüzey merkezinin en yakın olduğu konumuna göre % 2. 15 daha fazla ışınım toplandığı saptanmıştır. Optimum geliş açısının yutucu yüzeyin her konumu için 48 – 51 ° aralığında olduğu görülmüştür.Yansıtıcılı modellerde yansıtıcı ile dış cam mesafesinin azalmasıyla toplanan ışınımın yaklaşık % 5 arttığı görüşlmüş ve tüm yansıtıcı konumlarında optimum geliş açısının 15 – 18 ° aralığında olduğu görülmüştür.
Bu çalışmada , silindirik geometriye sahip ve vakumlanmış güneş kollektör sistemlerinin optik verimleri ZEMAX optik tasarım programı aracılığıyla sayısal olarak incelenmiştir. Kollektör sistemlerinin verimlerine etki eden faktörlerden ; dış cam, toplayıcı tüp, yansıtıcı yüzeyin birbirlerine göre konumları değişken olarak alınmış olup , kollektör sisteminin olası bir takip sistemiyle ve takip sistemi olmaksızın en iyi çalışma şartları belirlenmiştir. Yutucu yüzey merkezinin dış cam borunun alt yüzeyine en yakın olduğu konumunda toplanan ortalama ışınımın maksimum olduğu belirlenmiş, dış cam boru üst yüzeyi ile yutucu yüzey merkezinin en yakın olduğu konumuna göre % 2. 15 daha fazla ışınım toplandığı saptanmıştır. Optimum geliş açısının yutucu yüzeyin her konumu için 48 – 51 ° aralığında olduğu görülmüştür.Yansıtıcılı modellerde yansıtıcı ile dış cam mesafesinin azalmasıyla toplanan ışınımın yaklaşık % 5 arttığı görüşlmüş ve tüm yansıtıcı konumlarında optimum geliş açısının 15 – 18 ° aralığında olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler
"Güneş enerji sistemleri , optik verim, boşaltılmış tüp, geometrik uyum, sayısal analiz"

Abstract

In this study , the optical efficiency of evacuated solar collector systems has been numerically investigated through ZEMAX optical design program . The factors that affected the optical efficiency of the collector system; the position of reflective surface, the position of absorber plate is taken as a variables, the collector system are defined the optimal operating conditions for a possible tracking system and without a tracking system. It was determined that the average radiation collected at the position where the center of the absorber surface is closest to the rear dimensions of the outer glass tube – 15.5 mm, was determined to be maximum, 2.15% larger than the 15.5 indicator of the outer glass absorber width. The optimum angle of incidence is in the range of 48 – 51 ° for each position of the absorber surface.

Key Words
''Solar energy,optical efficiency,evacuated tubes,geometrical compatibility,numerical analysis''

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

1. Giriş

Yeryüzündeki en yaygın yenilenebilir enerji kaynağı güneş enerjisidir, güneşten saçılan ışınımın dünyamıza ulaşan kısmı 1367 W/m^2 değerindedir. Gelen güneş ışınımının bir kısmı gün ışığı ve fotosentez şeklinde kullanılırken diğer kısımları kara ve suda depolanarak rüzgar oluşumuna ve buharlaşma sayesinde hidroelektrik potansiyel oluşturmaktadır.Gelen ışınımın üçte biri uzaya geri yansıtılır. Bu nedenle, güneş enerjisini toplamak ve onu verimli bir şekilde elektrik enerjisi dönüşümü, ısıtma ve soğutma amaçlı tüketmek için sistem tasarımları enerji sistemlerinde önemli bir yer tutmaktadır. Zararlı kirleticiler üretmediğinden dolayı güneş enerji sistemleri çevre dostudur.Ve geleneksel enerji kaynaklarının azalması ile enerji talebinin nüfus ve modernleşmeyle beraber artıyor olması güneş enerjisi çalışmalarınının önemini arttırmaktadır. Güneş enerji sistemleri temelde elektrik ve ısı üretimine göre ayrılmakta olup; ısıl güneş enerji sistemleri görece düşük teknoloji ve yerel üretim imkanları dolayısıyla daha yaygın kullanımdadır.Güneşten gelen ışınımın yutucu bir yüzeyde emilerek akışkana aktarıldığı bu sistemlerde verim artırmak için çevreye ısı kaybını minimize eden boşaltılmış tüplü güneş enerji sistemleri yüksek verimli bir çözüm olmakla beraber;bu sistem elemanlarının her an enyüksek optik uyumlulukta olması sistemin verimliliği açısından elzemdir.Bu konuda literatürde rastlanan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

L.Ayompe ve ark. (2011),kullanım suyu ısıtma sistemi için bir düzlemsel güneş enerji sistemi ile bir ısı borulu boşaltılmış tüplü güneş enerji sisteminin performansını karşılaştırmak için bir saha çalışması yürütmüştür. Benzer çevre koşullarında kollektör verimleri düzlemsel güneş enerji sistemi ve ısı borulu boşaltılmış tüplü güneş enerji sistemi için sırasıyla %46,1 ve %60,7 ve sistem verimleri %37,9 ve %50,3 olarak bulunmuştur.

R. Tang ve ark. (2011) camdan üretilmiş boşaltılmış tüplü güneş enerji sisteminin su akışkanı için farklı eğim açılarının sistem performasına etkisini incelediği çaşımasında biri 22° ve diğeri ufuktan 46° eğimli iki farklı eğim açısına sahip, birbirinin aynısı olan iki set cam tüp içi tahliyeli borulu güneş enerjili su ısıtıcı yapılmıştır. Alınan ölçümlerde gün ortasına kadar 46° eğimli sistem sonrasında ise 22° eğimli sistem çıkış sıcaklıklarının daha yüksek olduğunu göstermiştir.

I.Budihardjo ve ark. [2009] camdan üretilmiş boşaltılmış tüplü güneş enerjili su ısıtıcıdaki suyun uzun vadeli performansını hem deneysel hem de sayısal olarak incelediler. Boşaltılmış borulardan geçen doğal sirkülasyon debisini, tank ısı kayıp katsayısını ve güneş enerjili su ısıtıcısının kollektör verimini araştırdılar. Cam tüplerle doğrudan temas halinde sıvı bulunan toplayıcıda 21 adet boşaltılmış tüp kullandılar. Kollektörden gelen faydalı enerjiyi belirlemek için kararlı durum koşullarında giriş ve çıkış sıcaklıkları sabit ışınım altında bir güneş izleme sitemine entegre edildi. Lineer regresyon kullanılarak optik verim 0.58 olarak bulundu. Ayrıca tüp en boy oranı, reflektör eğriliği, kollektör eğimi, kollektörün çalışma sıcaklığı ve radyasyon yoğunluğunu içeren kollektör tasarımının doğal sirkülasyon hızı üzerinde etkileri olduğunu bildirmişlerdir. Her bir bileşen göz önüne alındığında, sonuçlar, boşaltılmış kollektörlü ön ısıtıcı sisteminin Sidney'de yıllık %45 tasarruf sağlayabildiğini ortaya koydu.

R. Tang ve ark, (2009) vakum cam borulu boşaltılmış tüpler için en iyi yönelme açısı tespiti için yaptıkları çalışmada; boşaltılmış tüp içerisinde toplanan ışınım değerinin, kolektör türü, tüpler arası mesafe, yansıtıcı kullanımı ve ışık demetinin geliş açısına bağlı olduğunu belirlemişlerdir. T-tip (yönlendirilmiş) kolektörlerin H-tip (yönlendirilmemiş yatay boru demetli) kolektörlere göre daha etkin olduklarını bulmuşlardır. T- tip kolektörler için optimum yönelme açısının enlem derecesinden 10° küçük olması gerektiğini saptamışlardır.

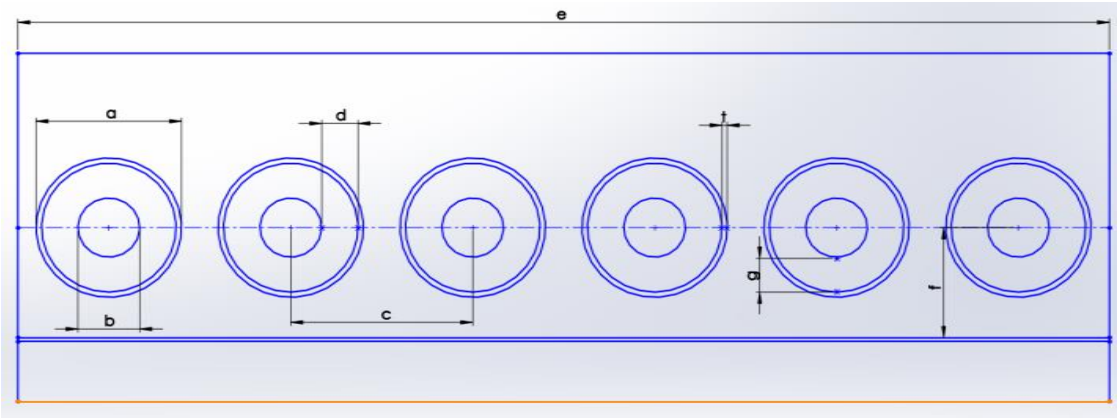
Budihardjo ve Morrison (2009) tarafından yapılan bir araştırmada, 45° eğime sahip cam su ısıtıcı sistemlerinin yıllık güneş enerji toplama verimliliğinin, standart 22° eğime sahip sistemlere göre sadece %1.5 daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Y. Kim ve ark, (2007) boşaltılmış cam tüplü kolektörlerin ısıl davranışlarını sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Hava'nın akışkan olarak kullanıldığı deneylerde tüpler 1200 - 37 mm (uzunluk – çap) ebatlarında seçilmişlerdir. Dört farklı yutucu şeklinden ışık geliş yönüne dik olarak merkezden kaçıklığa sahip tüpleri barındıran model ile en iyi sonuçlara varmışlardır. Kolektörde toplanan ışınımın; yutucu yüzey şekli, güneş ışınlarının geliş açısı, kolektörde tüp konumu ve oluşan gölge noktalarından etkilendiği sonucuna varmışlardır.

Bu çalışmada;optimum çalışma şartları belirlenmek istenen; dış cam tüp, yutucu yüzey ve yansıtıcıdan oluşan boşaltılmış tüplü güneş enerji sistemlerinin optik verimlerine sistem elemanlarının birbirlerine göre konumlarının etkisi gün boyu güneşten gelen değişik açılarda, sayısal olarak ZEMAX programıyla belirlenmiş ve sistemin bir takip sistemiyle veya takip sistemi kullanılmadan en yüksek optik verim şartları incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma kapsamında, Şekil 1'de şeması verilen vakum tüplü IGES (ısıl güneş enerji sistemi) için Optik Analiz Programı kullanılarak sistem katmanlarında geçirilen ve yutulan enerji miktarları bulunmuş, elde edilen veriler Tablo 1'de verilen şartlar için tekrarlanarak tüm geliş açıları için sistem geometrisinin toplananan ışınıma etkisi belirlenmiştir.

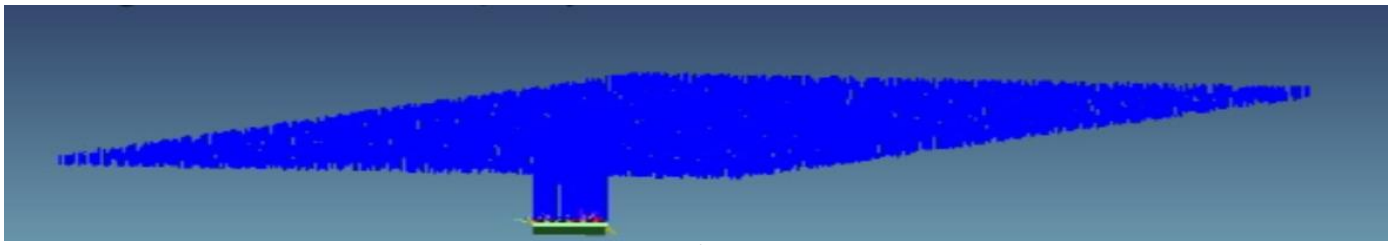


Şekil 1. Kolektör Sisteminin Önden Görünümü

Tablo 1 Kolektör Sisteminin Değişkenleri

Simge	Tanım	Değer
a	Dış cam dış çapı	40 mm
b	Yutucu plaka çapı	17 mm
t	Dış cam et kalınlığı	3 mm
g	Yutucu plaka ile dış cam arasındaki mesafe	Değişken
f	Yansıtıcı yüzey konumu	Değişken

Analizler Zemax yazılımında non-sequential modulünde 400.000.000 ışınla yapılıp (bu geometri için %0,11' ün altında sapmayla) güneş yerine 14x6 m ölçülerinde dikdörtgensel ışın kaynağı kullanılmıştır. Bu büyüklükte bir kaynak 1.4 x0.6 m dış yüzeyindeki bir boşaltılmış silindirik tüplü kollektör sisteminde kaçak ışına izin vermeyeceği için seçilmiştir. Kaynaktan çıkan ışınların kollektör sistemi üzerindeki görüntüsü Şekil 2'de gösterildiği gibi olmaktadır.

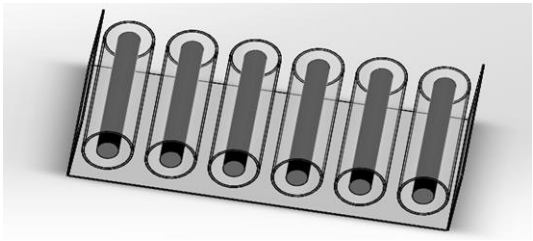


Şekil 2.14 x6 m Ebatındaki Dikdörrtgensel Kaynak İle Kollektör Sisteminin Zemax Ekran Görüntüsü

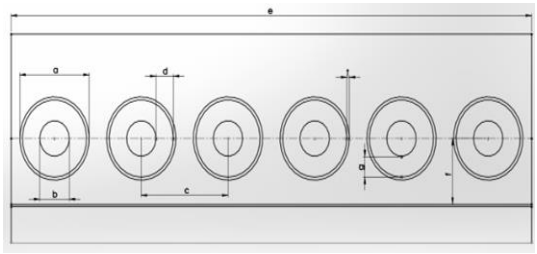
Zemax ray-tracking metoduyla tasarlanan optik sistemlerde system elemanlarının ışınıma etkisinin incelendiği bir sayısal analiz programı olup; programda tasarım; ışın kaynağı, dedektör ve diğer yüzeylerin tanımlanmasıyla yapılmaktadır. Kaynak tasarımı; kaynak geometrisi, kaynakan çıkan ışınım yoğunluğu ve çıkan ışınların doğrultu tanımlanmalarını kapsamaktadır. Tanımlanmış kaynaktan çıkan ışınlar non-sequential modülünde rastlayacakları herhangi bir yüzede yüzeyin malzeme ve geometrik özelliklerine bağlı olarak yansıma, kırılım, saçılma gibi optik fonksiyonları yerine getirip dedektör konulan (ilgilenilen) yüzeydeki özellikleri saptanabilmektedir.

Kaynaktan ayrılan ışınım hüzmesinin homojen ve paralel ışık demetleriyle güneşten gelen ışın demetleri sembolize edilmiştir. Güneşten gelen ışınımın toplayıcı yüzeye faklı enlem saat ve deklinasyon açılarındaki geliş açılarının tamamı kaynağın 'x' ekseni etrafında -90° - 0° - 90° dönmesiyle simule edilip, taranan 180° 'ler 600 açı aralığında herbir aralık 0.30° olmak üzere boşaltılmş tüplü kolektörlerlerin toplayıcı yüzeylerine çarpan anlık ışınım miktarları hesaplanmıştır.
Kaynaktan çıkan ışınların enerji yoğunluğu 1200 W/m^2 olarak alınmış olup bu değer orta kuşak için 1000 m yüksekte açık havada (bulutsuz) okunan 1000 - 1300 W/m^2 değerlerinin arasında bir değerdir. Yine gün boyunca havanın tam açık (bulutsuz) olduğu kabul edilerek analizde direkt ışınımın tek başına etkili olduğu kabul edilmiştir. Saçılmış (Difusive) ışınımın açık havada %10 altında etkinlikte olduğu bilinmektedir.

Analizlerde kollektör sistemleri temelde dış cam, yutucu yüzey ve yansıtıcı plakadan oluşmakta olup; kollektör sisteminin genel görünümü Şekil 2'de, yine kollektör sisteminin önden görünüşü Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 2. Analizlerde Kullanılan Kollektör Sisteminin Genel Görünümü



Şekil 3. Analizlerde Kullanılan Yansıtıcılı Kollektör Sisteminin Önden Görünümü

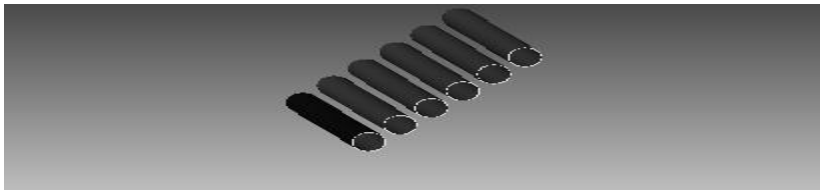
Analizlerde kullanılan referans geometride; dış camın, yutucu plakanın ve yansıtıcı yüzeyin konumlarındaki değişimler Tablo 1 de gösteridiği dış cam çapı, yutucu plaka çapı ve dış cam et kalınlığı sabit olmak üzere yapılmıştır.

Tablo 1. Kollektör Sistemindeki Bazı Ölçüler

Simge	Açıklama	Değer
a	Dış cam dış çapı	40 mm
b	Yutucu plaka çapı	17 mm
t	Dış cam et kalınlığı	3 mm
g	Yutucu plaka ile dış cam arasındaki mesafe	Değişken
f	Yansıtıcı yüzey konumu	Değişken

Dış cam tüm analizlerde bor-silis karışımından kırılma indisi n=1.46 olan cam olarak kullanılmış ve cam kalınlığı olarak 3 mm seçilmiştir. Bu değer, mukavemet, ısıl stabilite ve ısıl şok özellikleri açısından tavsiye edildiğinden seçilmiştir. Dış camla ilgili özellikler Tablo 2 'de verilmiştir.

Analizlerde dış camlar oluşturulurken 40 mm yarıçaplı, 1.4 m uzunluğundaki cam kütükten 37 mm yarıçaplı, 1.4 m uzunluğundaki cam kütük çıkarılarak elde edilen silindirik cam tüp kullanılmıştır. 6 adet borudan oluşan kollektörün Zemax görseli Şekil 4 'te verilmiştir.



Şekil 4. Analizlerde Kullanılan Silindirik Cam Tüplerin Zemax Görselli

Tablo 2. Dış Cam İle İlgili Özellikler

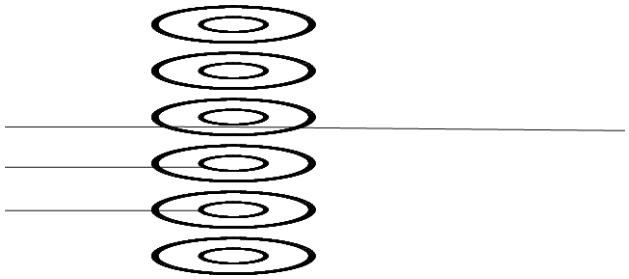
Özellik	Değer
Geçirgenlik (τ)	0.92
Kırıcılık indisi (n)	1.46 - 1.47
Dış Çap	a= 40 mm
Uzunluk	l=1.4 m

Yutucu yüzey tasarımında; özellikle yansıtıcı kullanılan toplayıcı sistemlerde, siyah krom veya siyah nikel kaplamalı boruların kullanımı yaygındır. Seçilen borular, düşük ısı yayılımlarından dolayı, bakır, alüminyum, paslanmaz çelik olabilir. Yutucu yüzeyle ilgili özellikler Tablo 3 ‘de verilmiş olup silindirik dış cam içindeki görünümleri de Şekil 5 ‘te verilmiştir.

Tablo 3. Yutucu Yüzeyle İlgili Seçilen Özellikler

Özellik	Değer
Yutuculuk (ε)	0.945*
Yayılım (α)	0.09
Dış Çap	b= 17 mm
Uzunluk	l=1.4 m
Konum	g=(-19)- (19) mm

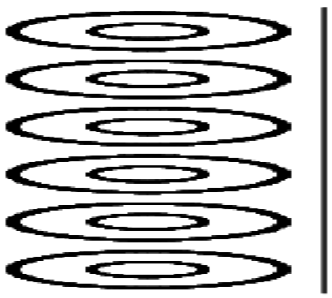
*Bu değer analizde kullanılan 0,3-2 μm dalgaboylu ışınım için ağırlıklandırılmış ortalama değeridir.



Şekil 5. Silindirik Yutucu Yüzeyin Silindirik Dış Cam İle Görünümü

Güneş enerji sistemlerinde yansıtma ile odaklama sistemlerine sıkça rastlanırken; boşaltılmış tüplerde vakum teknolojisinin gelişmesiyle tüp maliyetleri azalmış ve sistemlerde maliyet azaltıcı olarak kullanılan yansıtıcı yüzey elemanlarının kullanımı azalmış ise de yaptığımız analizlerde yansıtıcı yüzeyin konumunun sisteme etkisi incelenmiştir.

Analizlerde Şekil 6'da görünen düzlemsel bir yansıtıcı kullanılmış , yansıtıcı yüzeyin konumu f = 41-130 mm aralığında değiştirilmiştir.



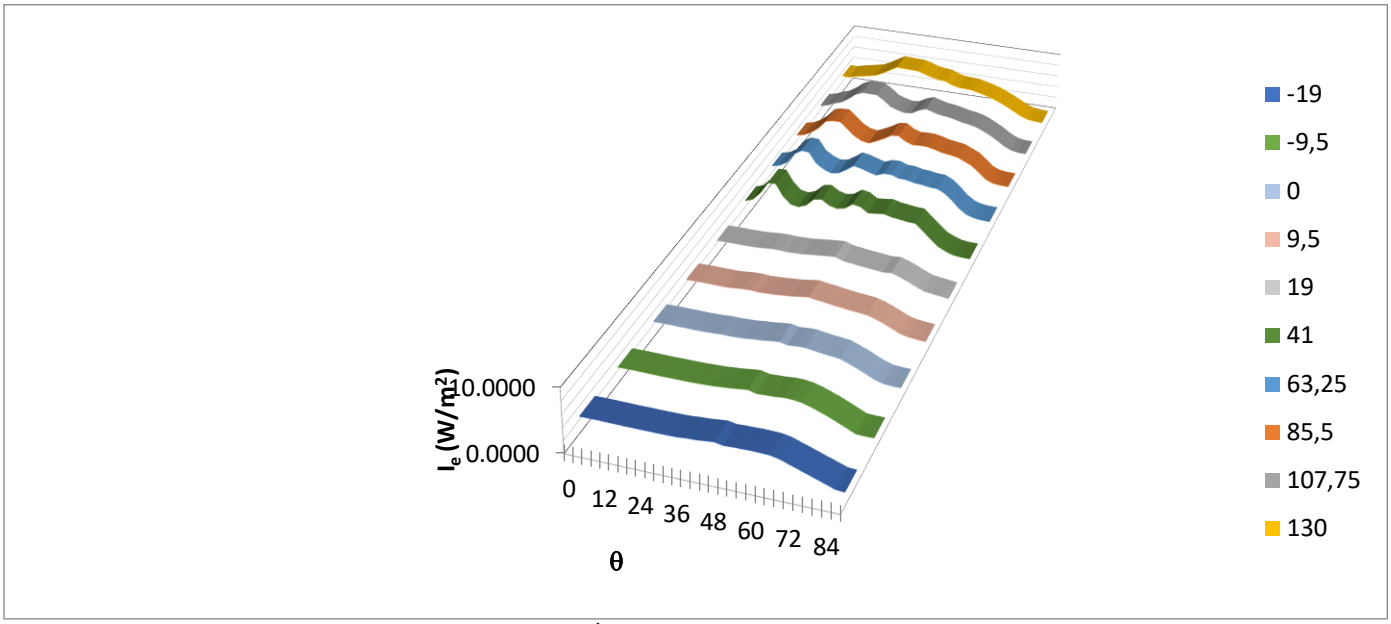
Şekil 6. Düzlem Yansıtıcı Yüzeyli Sistemlerin Görünümü

3. Bulgular ve Tartışma

Silindirik yutucu yüzey geometrisi için dış cam yutucu yüzey mesafasinin toplanan ışınıma etkisini görmek için değiken yutucu yüzey konumları ve yansıtı yüzey dış cam mesafesinin toplanan ışınımdaki etkisini görmek için tanımlanan değişkenler Tablo 4'te verilmiştir. Bu durumlarındaki; toplanan ışınım akısı değerleri Şekil 7'de gösterilmiştir.

Tablo 4. Yansıtıcı Yüzey ve Yutucu Yüzey Konumları

Yansıtıcısız	Düzlem Yansıtıcılı
g-20=19	f=41
g-20=9,5	f=63,25
g-20=0	f=85,5
g-20=-9,5	f=107,75
g-20=-19	f=130



Şekil 7. Silindirik Dış Silindrik İç Geometrisinde Anlık Toplanan Işınım Değerleri

3.Sonuçlar

Boşaltılmış tüplü güneş enerji sistemlerinde verimliliğin esas parametrelerinden olan optik uyumluluğun sistem elemanları konumlandırmaları için belirlenmesi amacıyla yapılan bu çalışmada; Yansıtıcı kullanılmayan boşaltılmış tüp sistemlerinde yutucu yüzey merkez konumunun dış cam merkezinden arka yüzeye doğru tam kaçıklığının günlük toplanan ortalama ışınım değerini % 2 'ye kadar iyileştirdiği saptanmıştır.Analizlerde kullanılan düzlem aynasal yansıtıcılı yüzeylerin dış cam merkez konumuna yaklaştırıldıkça toplanan günlük ışınım değerinin arttığı saptanmıştır. Takip sistemi kullanılmayacak yansıtıcısız boşaltılmış tüplü kollektör sistemlerinin geliş açısı 47 ° olacak şekilde yapılacak konumlandırma sistemin yapılması ışınım yoğunluğu değerini maksimize eder. Takip sistemi kullanılmayacak düzlem yansıtıcılı boşaltılmış tüplü kollektör sistemlerinin geliş açısı 16° olacak şekilde yapılacak konumlandırma sistemin toplayabileceği ışınım değerini maksimize eder.Analizlerde elde edilen tüm sonuçlar benzer bir optik sisteme sahip Solyndra tüplerinin elektriksel güç çıktıları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Boşaltılmış tüplü kollektör sistemleriyle ilgili saptanan iyileştirmeler üretici firmalarla paylaşılarak yeni ürünlerin ekonomik uygunluk ve üretilebilirlilik analizleri yapılmalıdır.

Referanslar

L.M. Ayompe, A. Duffy, M. Mc Keever, M. Conlon, S.J. McCormack,Comparative field performance study of flat plate and heat pipe evacuated tube collectors (ETCs) for domestic water heating systems in a temperate climate,Energy,36-5,2011, 3370-3378, https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.034.

Runsheng Tang, Wenfeng Gao, Yamei Yu, Hua Chen,Optimal tilt-angles of all-glass evacuated tube solar collectors,Energy, 34-9,2009,1387-1395, https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.014.

Runsheng Tang, Yuqin Yang, Wenfeng Gao,Comparative studies on thermal performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters with different collector tilt-angles,Solar Energy,85- 7,2011,1381-1389, https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.03.019.

BUDIHARDJO, I.; MORRISON, G. L.; BEHNIA, M. Development of TRNSYS models for predicting the performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters in Australia. In: Proceedings of ANSZES Annual Conference. 2003.

Yong Kim, Taebeom Seo,Thermal performances comparisons of the glass evacuated tube solar collectors with shapes of absorber tube,Renewable Energy,32 -5,2007,772-795, https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.03.016.

I. Budihardjo, G.L. Morrison,Performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters,Solar Energy, 83- 1, 2009,49-56, https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.06.010.

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

UMAGD, (2023) 15(3), s98-s112.

10.29137/umagd.1334337

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:3 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue

Araştırma Makalesi / Research Article

Gendered Dimensions of Transport and Women's Social Exclusion in Abidjan (Côte d'Ivoire)

Bassirou Bande[*1], Hülagü Kaplan[1]

[1] *Faculty of Architecture, Department of City and Regional Planning, Gazi University, 06570 Maltepe Ankara, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 28/27/2023 **Kabul / Accepted**: 11/08/2023 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Abstract

This paper explores the gendered dimensions of transport in Abidjan and how transport dynamics influence women's out-of-home activity participation, leading to their social exclusion. Using a gender-sensitive analysis approach, the research revealed that Abidjan's transportation system is inadvertently gendered and excludes vulnerable people and women. The findings highlighted women's significant concern about public transportation availability while transportation costs emerged as the primary concern for both genders (54.3 % reported costs as an extreme/major concern while only 23.6 % expressed it as a minor/negligible issue). Women highly cancel trips due to transportation issues (women "always" cancel educational activities 4.5 times more than men); and generally participate in fewer out-of-home activities than men. On a daily basis, men travel more for job and education-related activities (respectively 35.3% and 9.5%) than women (22.6% and 6.0%).

The research recommends targeted interventions to bridge the gender gap in Abidjan by improving women's mobility through safe, reliable, affordable and gender-sensitive public transport. These proposals contribute to equitable transport access for all citizens, essential for social and economic development. Therefore, the research addresses a significant gap in transport-related social exclusion studies on African cities, by offering insights to improve transportation planning and policy in similar urban contexts.

Key Words
"Social exclusion, transport, gender, abidjan, women, activity participation"

***Corresponding Author:** archigenie@yahoo.fr*

1. Introduction

In urban studies and transportation research, the relationship between transportation and social exclusion is a critical aspect, as it influences mobility and opportunities for individuals. Transport is one of the vital aspects of day-to-day urban life, enabling individuals to access places, services, opportunities, and social activities. Though, the extent to which individuals can fully participate in society through transportation varies, and the issue of social exclusion in the transport sector can enormously affect certain groups of individuals.

Transport-related social exclusion (TRSE) is the process of individuals or social groups being excluded from full participation in society as a result of restricted access to transportation services (Kenyon et al., 2002). It is a multidimensional concept that encompasses aspects like affordability, availability, accessibility and acceptability (Lucas, 2012). Previous research has demonstrated that TRSE can negatively affect various aspects of people's lives, such as employment, education, health or social interaction (Hine & Mitchell, 2001; Currie, 2004; Lucas, 2012). Although transportation-related social exclusion can vary widely depending on the local context, including social, economic and geographical factors (Lucas, 2012).

Many factors in previous studies have been identified as contributing to TRSE such as income, gender, age, disability status, household composition and location of residence (Cass et al., 2005; Lucas, 2012; Currie & Delbosc, 2010). Low-income individuals and residents of disadvantaged neighbourhoods are particularly at risk of transportation-related social exclusion due to limited access to transport services or inability to afford them (Lucas, 2012; Currie, 2011). Similarly, gender norms and societal expectations may restrict women's mobility and access to transportation services, further exacerbating their social exclusion (Hanson, 2010).

Despite the extensive attention given to these issues in many regions worldwide (Church et al., 2000; Lucas, 2012; Adeel, 2016), studies on TRSE in Sub-Saharan African cities, such as Abidjan received less attention. Over the past decades, Abidjan, the economic capital of Côte d'Ivoire has experienced rapid urbanization, resulting in many transport and accessibility challenges (Banister, 2005). These challenges have increased social exclusion by restricting individuals' mobility and participation in society (Lucas, 2004). As such, a comprehensive understanding of transport-related social exclusion in a particular context such as Abidjan needs an in-depth analysis that takes various factors into account at different levels, specifically its intersection with gender. Access to transportation is essential for people to engage in various activities, including employment, education, healthcare, and social interactions. However, women face unique challenges and barriers that limit their mobility and access to public transport.

Furthermore, some research on gender differences in travel patterns and transport-related constraints in Abidjan suggested that women were excluded from the transportation sector. These researches suggested that women in Abidjan have lower mobility levels than their male counterparts, with limited access to public transport modes and hence limited access to essential services (Gupta et al., 2018). Abidjan's transport system is gendered and socially excludes women who face significant barriers to access public transport, such as safety concerns, inadequate infrastructure, and limited access to informations. These barriers restricted women's mobility and restricted access to employment, healthcare, education, and other essential services. The males were given more priority, increasing their mobility to access essential services. Also, gender segregation in out-of-home activities in Abidjan is highly gender-segregated, with men engaging in economic activities while women are responsible for domestic tasks and childcare (Das & Kotikula, 2019). Women's limited access to economic opportunities and increased dependency on public transportation for necessary activities were both influenced by the gendered division of labour (Chamseddine & Ait Boubkr, 2021).

Specific initiatives and ideas for public policy have been put in place to close the gender gap in transportation accessibility and to advance women's emancipation (Singhai & Singhai, 2021). In recent years, the current gender pay gap evaluations and analyses have uncovered significant gender inequality within the industry, impacting most transport areas (Wright, 2016). Governments should recognize the significance of gender mainstreaming in transportation planning and policy formation and make it a priority to do so. This will reduce the exclusion of women from the transportation industry and stress the necessity for inclusive public transportation systems that prioritize the safety, comfort, and accessibility of women, taking into consideration the distinct mobility patterns and requirements of women (Zhen, 2021). Therefore, this paper aims to analyse the gendered dimensions of transport and women's social exclusion in Abidjan, Côte d'Ivoire's business centre and economic capital city. By investigating women's experiences in their day-to-day mobility, this research seeks to understand the production of gendered accessibility and women's exclusion in the public transportation system of Abidjan.

2. Context of the Study

Abidjan, the largest city and economic capital of Côte d'Ivoire, is located on Ébrié Lagoon on the Gulf of Guinea (Atlantic Ocean). As one of the largest cities in Africa, Abidjan has 6.3 million inhabitants in an area of 629 km2, representing 21.5% of the country's population. By 2040, Abidjan will be home to over 10 million people according to World Bank projections (2019a).

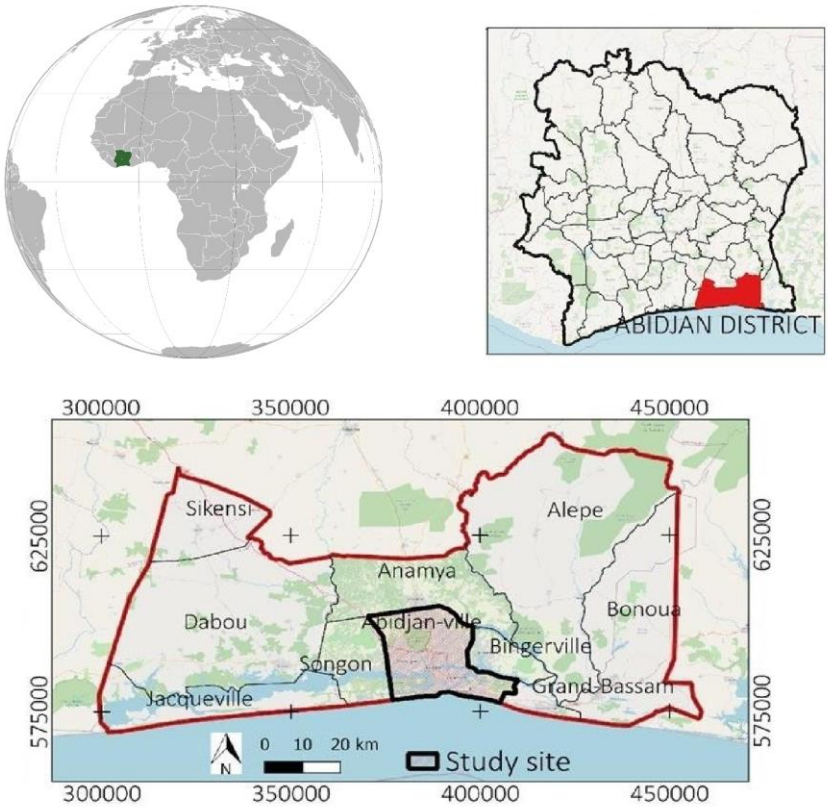


Figure 1: Map of Abidjan District (Ramiaramanana et al., 2021)

According to Ramiaramanana et al. (2021), Abidjan City is facing several problems such as unemployment 19%, poverty 13%, health 9%, transportation 5% and housing 4% etc. A World Bank report (2019b, p.11) stated that more than 10 million trips are made in the city. Domestic travelling costs are among the highest in the world. Less than 1% of trips are made via public transport (Berrou et al., 2017). Transport policies adopted by the city do not consider the needs of the lower and middle classes because most transport projects are geared towards the upper classes. The cost of daily trips made in the city accounts for more than 30% of the income of poor families (Berrou et al., 2017). Private modes of transport i.e. Gbaka, meter taxis, Worro-Woro and inter-communal taxis account for 85% of trips (Berrou et al., 2017).



Figure 2: Public transport modes in Abidjan

These operators pose a high risk to safety, pollution and congestion. The most popular modes of transportation in the city are informal (Gbaka "minibuses" and Woro-woro "informal taxis") and private cars. People also travel by walking or bicycle for short trips. While public transit and motorcycles are negligible (Johnstone & Ratanavaraha, 2020). Motorcycles are not a common mode of transportation in Abidjan compared to other cities (Doumbia et al., 2021).

Recent research has shed light on the connection between transportation vulnerability and social exclusion. An efficient public transportation system in Abidjan seeks to normalize the usage of modes equally among all members of society (Johnstone & Ratanavaraha, 2020). In particular, automobile travel costs are expensive for lower and middle-income people. Also, disabled people, women and the elderly have difficulties travelling and crossing roads. It is essential to provide affordable and accessible transportation services in order to address social exclusion. The choice of different travel modes, such as bicycles, private cars, or buses, can result in varying actual travel times, ultimately affecting out-of-home activities. Limited transportation options, particularly for those unable to drive, can lead to time-consuming journeys to access services and goods.

In Abidjan, women commute less than men, and female mobility is usually restricted by societal conventions, safety concerns, and lack of public transport availability. Females are susceptible to assault and harassment due to their gender while using public transportation, which limits their freedom of movement. Women in Abidjan feel uneasy using the public transportation system. Their movement is restricted by fear, hindering their access to vital services like jobs, education, and healthcare. These journeys often include many stops and short distances, necessitating adaptable and practical transportation solutions. However, Abidjan's current public transportation system is primarily intended for long-distance travel and needs to provide more connections between neighbourhoods and communities to meet these demands fully. The absence of dependable and safe transportation options further impacts women's economic prospects. Due to safety concerns and the need for better transportation options, women are less likely to obtain work opportunities that entail lengthy commutes. This exacerbates gender disparities in the workforce and the gender pay gap. The absence of accessible and inexpensive transportation choices also makes it difficult for women to participate in social and communal events, aggravating their marginalization.

3. Materials and Methods

The study analysed gendered transportation and women's social exclusion to explore how gender influences transportation access and experiences. A comprehensive mixed-method approach has been used through quantitative and qualitative surveys to explore women's social exclusion in Abidjan. This approach captured statistical trends as well as individual experiences and viewpoints (Kowalczyk, 2019). Quantitative data provided patterns and trends while the qualitative part illuminated women's transportation challenges and social inclusion through their personal stories.

The research involved a mixed-method approach to reveal Abidjan's complex transport infrastructure and its effects on women and vulnerable groups. The research was methodical and stratified by random sampling of selected individuals from varied neighbourhoods and income ranges for representation and diversity. Participants were randomly recruited from each stratum. Random selection ensured that all population members had an equal chance of being selected (Martínez-Mesa, 2016). Interviews allowed qualitative investigation of people's experiences, viewpoints, and narratives. Surveys and interviews took into account Abidjan's gender and social dynamics and involved consent from every participant.

Two sets of data are chosen to gather a large pool of relevant information to examine gendered transportation trends in Abidjan. The first set of information and data is gathered from an academic literature review, open interviews with resource persons and consultation with transportation stakeholders. The collected knowledge about public transport and gendered accessibility trends as well as social exclusion issues in developing cities and Abidjan, helps identify key issues and current trends concerning women's accessibility and exclusion in the city. In semi-structured interviews, a representative sample is used to derive conclusions about the population's experiences and issues. These interviews illuminated participants' limits, obstacles, and perceptions of transport-related social exclusion. Qualitative interactions helped the researcher identify women's distinct impediments to accessing public transport and other activities. The interviews added context and fascinating narratives to the quantitative data.

The second set of data and information is extracted from the results of a direct survey in the 19 communes of Abidjan and its suburbs with a sample of 402 individuals. The survey questionnaires were carefully designed to gather quantitative data on demographics, travel habits, public transport access, gender, and social exclusion. By using a standardized survey questionnaire, the researcher collected quantitative data from a representative sample of Abidjanians. The aim of the survey was explained to all respondents and their willingness to participate was requested, ensuring voluntary participation and anonymity (Bhandari, 2022). The data collected was also treated confidentially and used solely for research purposes. Travel patterns, public transport access, education, vulnerability, monthly income, mobility constraints, and social exclusion experiences were carefully included in the questionnaire. The poll sought to understand participants' mobility dynamics and their impact on social inclusion by including these various aspects (Al-Rashid et al., 2020). Recognizing the importance of diversity, the survey questionnaire was given to men and women, young and old, poor and rich.

Table 1: Data Sources and Collection Details

Data/Information	Sample	Source	Level of relevance
General information on transport, accessibility and social exclusion	Unlimited	Academic literature review	Macro-level (Worldwide, developing countries)
Information on the transportation issues and challenges in Abidjan	10	Interviews by the author (resource persons)	Macro-level (Abidjan city, other cities)
Transportation trends and accessibility patterns in Abidjan	Unlimited	National Institute of Statistics (INS)	Macro-level (Greater Abidjan Area)
Direct survey in Abidjan Metropolitan area	402	Questionnaire by the author	Micro-level

This survey questionnaire was conducted in two waves (a total of 402 questionnaires) and each wave covered half of the sample (201 questionnaires) from 10 mixed sites with various levels of public transport accessibility. The first wave was conducted between November and December 2020. And the second wave was completed in July 2021. The two-wave approach was chosen to account for seasonality and minimize climate effects on the study. The sample was also distributed between neighbourhoods accordingly. It presents results from the 19 communes of the Great Abidjan Metropolitan Area.

The collected survey data were digitized and analysed in SPSS. To measure the main TRSE trends in the city, clustering, frequency, mean, weighted average and median were analysed according to their capability to highlight each hypothesis. The chi-square tests, ANOVA and correlation were performed to measure the relationship between variables. Multivariate regression and logistic regression analysis were also used to predict the relationship level between dependent and independent variables.

By using this mixed-methods approach, including a structured survey questionnaire and semi-structured interviews, this comprehensive methodology gave the study a complete grasp of gendered travel and social exclusion in Abidjan. It permitted quantitative and qualitative investigation of statistical trends, human experiences, perspectives, and obstacles. The mix of approaches enabled a more rigorous and complete analysis. This revealed the transportation system's complex dynamics and effects on women's social inclusion in Abidjan.

4. Results and Discussions

4.1. Socioeconomic Characteristics of The Respondents

A preliminary analysis of the respondent's age, gender, education level, and monthly income was performed prior to analysing the study objectives. All the respondents were aged between 10 to above 60 years. The age distribution of the respondents indicates that 33 (8.2%) respondents were from the age group 10-19 years, 97 (24.1%) were between 20-29 years, 96 (23.9%) were between 30-39 years, 98 (24.4%) were from 40-49 years old, 28 (7.0%) were from 50-59 years old and 41 (10.2%) were above 60 years old. Regarding the gender distribution, the majority of the survey respondents 240 (59.7%) were male while 162 (40.3%) were female.

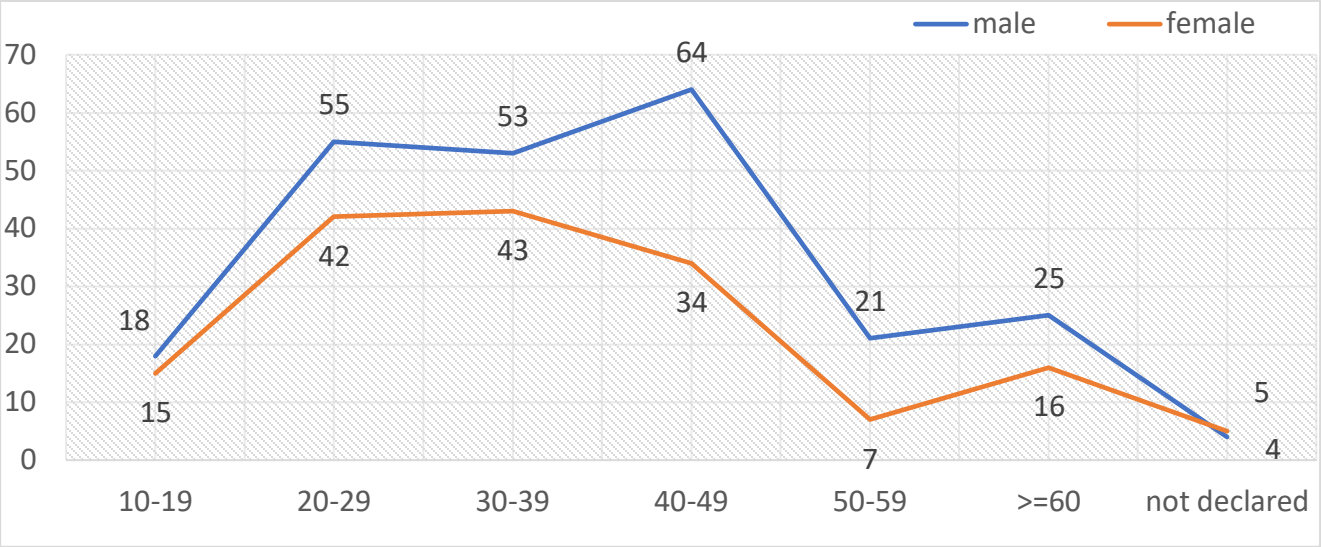


Figure 3: Gendered Profile of the Respondents According Age

The findings in Figure 3 below indicate that, based on the distribution of ages, the highest percentage of respondents were aged between 40-49 years, constituting 24.4% of both. However, women (34) are less represented than men (64); followed by 20-29 years, accounting for 24.1%, 30-39 years, corresponding to 23.9%, and those aged 60 years and above accounted for 10.2%. Those between 50-59 years, with 7%, and 10-19 years, with 8.2%, had the lowest number of respondents.

4.2. Regression, Variance and Reliability Analyses

The value of (R) shows the shared variance between the dependent and independent variables. In the model presented, the value of (R) is 0.728. R-squared is a model used to measure goodness-of-fit. From the analysis, the R-square was 0.529 with an adjusted R-square of 0.4661, which implies that 52.9% of the relationship is explained by the variables under the study. This means that other factors not considered in this study contributed to 47.1% of the dependent variable variance.

Variance analysis was used to examine the model's significance in the study. During significance interval testing, a P-value equal to or less than 0.05 is considered statistically significant. From the analysis, the model has a p-value of 0.000 which is a value less than the minimum threshold of 0.05. This, therefore, means that the model was statistically significant in predicting the factors affecting women's exclusion in the transportation sector in Abidjan at a 95% level of confidence interval. The analysis indicated a relatively high reliability of the study results. The ANOVA results indicated that the regression model was significant at F (representing a test of the null hypothesis) = 7.723, p = 0.000.

Cronbach's Alpha analysis was applied to check the internal consistency and reliability of each submitted question in the data set. Cronbach's Alpha is used for multiple scale items to determine whether the items included converge or not for this gender analysis of out-of-home activity participation. According to (Gliem & Gliem, 2003), a value above .7 is considered acceptable and reliable. To make certain that all designed questions are reliable, six variables i.e., frequency of participation in out-of-home activities, mode of access to out-of-home activities, transport service ranking, issues reducing access, reasons for activities missing/cancellation and frequency of missing events were separately tested. Results show that all the variables except the frequency of out-of-home activities participation are reliable.

Table 2: Internal Consistency and Reliability in the Data Set

Variables	Cronbach's Alpha	No. of items
Frequency of participation in out of home activities	0.524	9
Mode of access to out of home activities	0.734	9
Transport service ranking	0.836	8
Those issues reduce your access	0.708	7
Reason of activities missing/cancellation	0.754	8
Frequency of missing the events	0.844	9

4.3. Gendered Differences in Frequency of Out-Of-Home Activity Participation

One of the hypotheses in this study is "Women have a lower frequency of out-of-home activity participation than men". By testing this hypothesis, the aim is to assess whether women have a lower frequency of out-of-home activity participation than men. The cross-tabulation results show that there exists no relationship between gender and some out-of-home activities i.e., work ($p=0.365>0.05$), education ($p=0.192>0.05$), shopping ($p=0.305>0.05$), cultural events ($p=0.175>0.05$) and political events ($p=0.087>0.05$). Contrary to this, there exists a statistically significant relationship between gender and religious activities ($p=0.000<0.05$), recreational ($p=0.000<0.05$), healthcare ($p=0.020<0.05$) and socializing ($p=0.044<0.05$). These results suggest that gender shapes out-of-home activities and transport behaviour in the city. Both males and females displayed distinct patterns of out-of-home activity. That means gender is definitely a crucial factor when considering out-of-home activities participation in Abidjan.

Transport behaviour differences have been well-documented in many previous studies. Due to gender-based differences in transport in Abidjan, as in many cities, men are expected to work first and foremost above other activities, resulting in unequal opportunities for women. In this way, men may receive work-related priority while women may face disadvantages in accessing job opportunities. Inequality between men and women persists due to this gendered division of labour. Compared to women, men have more time to devote to their careers and profession. Women tend to take on more unpaid household work and their ability to access resources such as healthcare and education may be affected. This contributes to a lack of opportunity for women and perpetuates a cycle of inequality difficult to break.

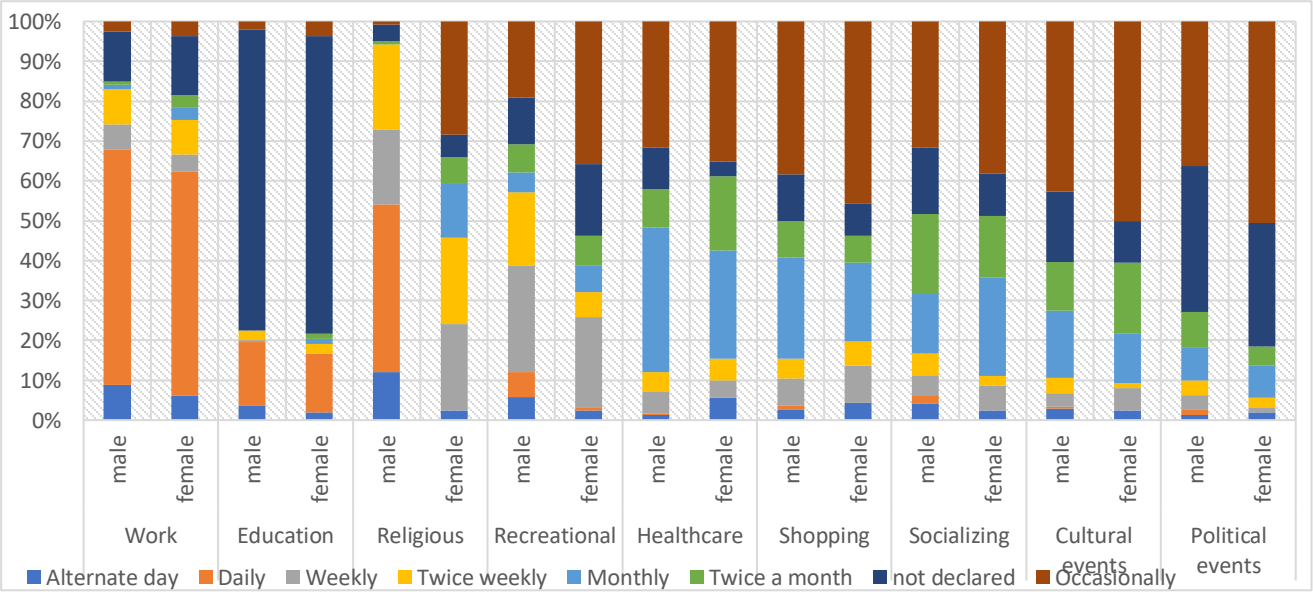


Figure 4: Frequency of Activity Travel by Gender

Figure 4 shows that men travel more frequently for most out-of-home activities than women. Work and education activities were reported to require daily travel by 35.3% and 9.5% of men, respectively. As compared to 22.6% and 6.0% of women, respectively, this percentage is higher for men. Men reported travelling daily to religious activities in 25.1% of cases, but women indicated no such travel (0%). As for participating in social activities and recreational activities, 1.2% and 3.7% of men travel every day, respectively, while only 0.2% and 0% of women do.

However, women reported higher alternate-day shopping and healthcare trips (1.7% and 2.2%, respectively) compared to men (1.5% and 0.7%). These data suggest that men are more likely to engage in activities outside the home than women. In contrast, women are more likely to engage in shopping and healthcare activities. Overall, men travel more than women daily. This difference in behaviour is possibly due to gender roles and expectations. Men are more likely to be the primary breadwinners of the family and expected to work outside the home. Women, on the other hand, are often expected to take care of the household and family members, and so are more likely to engage in shopping and healthcare trips.

As mentioned by Goel et al. (2022), the issue of limited access to public transport restricts women's mobility and hinders their ability to participate in education, employment, healthcare, and other crucial activities (Goel et al., 2022). The findings supported the hypothesis that women have a lower frequency of out-of-home activity participation than men and use public transport less frequently. There is a gender-based difference in access to public transport, and women are more likely to face exclusion in public transport.

4.4. Frequency of Activity Cancellation Based on Gender

An independent sample t-test has been applied to see the difference between males and females regarding cancellation of any activity participation. The results indicate statistically significant differences in activity cancellation between males and females in work-related activities (p-value of 0.019), education activities (p-value of 0.021), shopping activities (p-value of 0.001), socializing-associated activities (p-value of 0.000) and cultural events (p-value of 0.000). The most significant differences were found in socializing-associated activities and cultural events, where p-values were 0.000. This suggests an underlying reason why males and females cancel these activities at different rates.

Table 3: Cancellation of Activity Participation

Cancellation of event	Gender	N	Mean	Std. Deviation	p-value
Work	male	188	1.6915	.76033	.019
	female	111	1.4955	.57007	
Education	male	61	1.9836	1.00816	.021
	female	43	2.5814	1.43481	
Religious	male	223	1.4843	.68344	.485
	female	152	1.4342	.67766	
Recreational	male	216	2.0231	1.08023	.165
	female	131	2.1985	1.22424	
Healthcare	male	220	2.0909	.93677	.462
	female	156	2.1731	1.14815	
Shopping	male	219	2.5297	.96393	.001
	female	147	2.8980	1.09002	
Socializing	male	211	2.3934	.94201	.000
	female	148	2.9122	1.11226	
Cultural	male	206	2.6650	1.02145	.000
	female	137	3.0949	1.19363	
Political	male	155	2.9161	1.16750	.749
	female	110	2.9636	1.21857	

Contrarily, the results indicate no statistically significant differences in activity cancellation between males and females in religious activities (p-value of 0.485), recreational activities (p-value of 0.165), healthcare (p-value of 0.462) and political events (p-value of 0.749). This suggests that there is no gender bias when cancelling religious, recreational, healthcare and political activities. Males and females are equally likely to cancel activities in these categories regardless of their gender.

These findings are particularly interesting because it suggests that gender is an influential factor in the decision-making process for work, education, shopping, socializing and cultural activities' cancellation. Further research should be conducted to understand the underlying reasons for this gender-based discrepancy: why do males and females make such different decisions for these activities' cancellations? This could include a deeper analysis of gender social dynamics or interviews with those who cancelled their activities. Understanding the nuances of this discrepancy phenomenon could help us better understand and predict transport behaviour in similar scenarios. Its findings could be used to reduce gender-based discrepancies, implement gender-sensitive decision-making policies and create an equitable and inclusive environment.

The p-value indicates only that there is a statistically significant difference, not its size or direction. Taking into account the specific frequencies for males and females in each activity may enable us to determine which gender participates more often in each category.

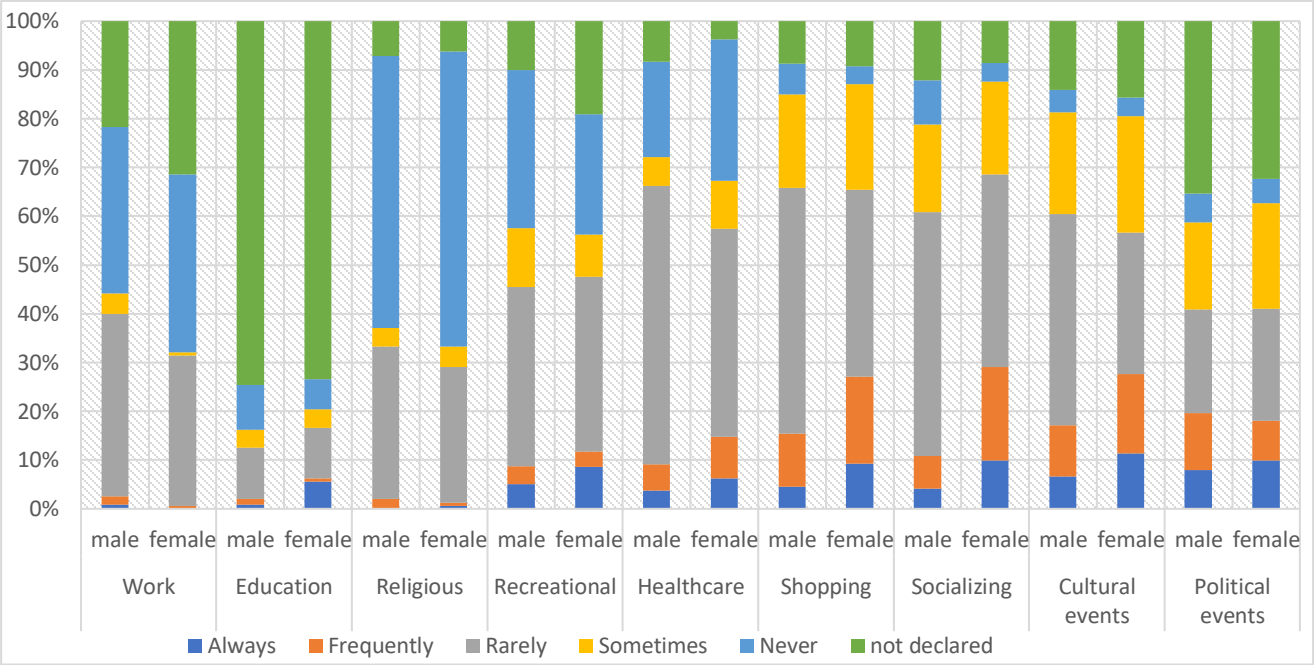


Figure 5: Out-Of-Home Activities Cancellation Based on Gender

As shown in Figure 5, women report cancelling activities more often than men. Results show that women cancel "always" most of their activities (education, religious, recreational, healthcare, shopping, cultural, and socializing), except for work and political events. Interestingly, the discrepancy between the genders is most notable when it comes to “education”, where women are 4.5 times more likely to "always" cancel their educational activities. There is a clear gender-based difference in the prioritization of educational activities, with women more likely to sacrifice their own educational activities to take care of other responsibilities. This finding suggests a profound gender gap in educational engagement, which could adversely affect women's access to education, career advancement, and socioeconomic mobility.

In addition, women cancel more "frequently" healthcare, shopping, cultural, and socializing activities than men (socializing being the most frequently cancelled activity, almost two times). This is likely due to women's increased responsibilities both in terms of family care and work. Women often have to juggle multiple tasks and prioritize certain ones over others, which can lead to more activity cancellations specifically leisure-related ones.

On the other hand, men tend to "rarely" cancel activities of any form (work, education, religious, recreational, healthcare, shopping, socializing, cultural, and political). Thus, men face fewer barriers to participating in different activities and have better access to transportation. However, this doesn't necessarily mean men are more active than women in all of these domains, but rather they encounter fewer barriers or circumstances that require cancellation.

The results indicate a gender disparity in cancelled activity frequency across different domains. These activities' cancellations and lack of transportation access affect both women's quality and quantity of activities and negatively impact their overall well-being. Women are more likely to face constraints such as limited access to education, healthcare, employment opportunities, and social services. This can ultimately lead to gender inequality and women's social exclusion. Thus, providing safe and reliable transportation access for women is essential to create more equitable opportunities for them to participate in economic and social activities. Moreover, it can help promote gender equality and break down social exclusion barriers.

4.5. Choice of Usual Travel Mode According to Gender

Yeh and Chow, (1996) stated that walking remains the predominant mode of transportation in developing nations, so a nearby availability of basic land uses remains vital for the community. Figure 6 illustrates how gender differs in transport mode choice depending on the type of activity. In Abidjan, walking appears to be the primary mode of transportation for all out-of-home activities, followed by Sotra transport. In terms of active travel, men were more likely to engage in this activity than women. Men reported walking 23.9% of the time to attend religious activities, and women reported walking 20.6% of the time. Women reported walking to their jobs only 14.2% of the time, while men reported walking 16.2% of the time. Additionally, 18.4% of men and 15.2% of women reported walking to recreational activities. Furthermore, 6% of men reported walking to healthcare and social activities, compared to 5% and 3.5% respectively for women.

By contrast, 3.5% and 4% of women reported walking to cultural and shopping activities, while 2.5% and 3.7% of men reported doing the same.

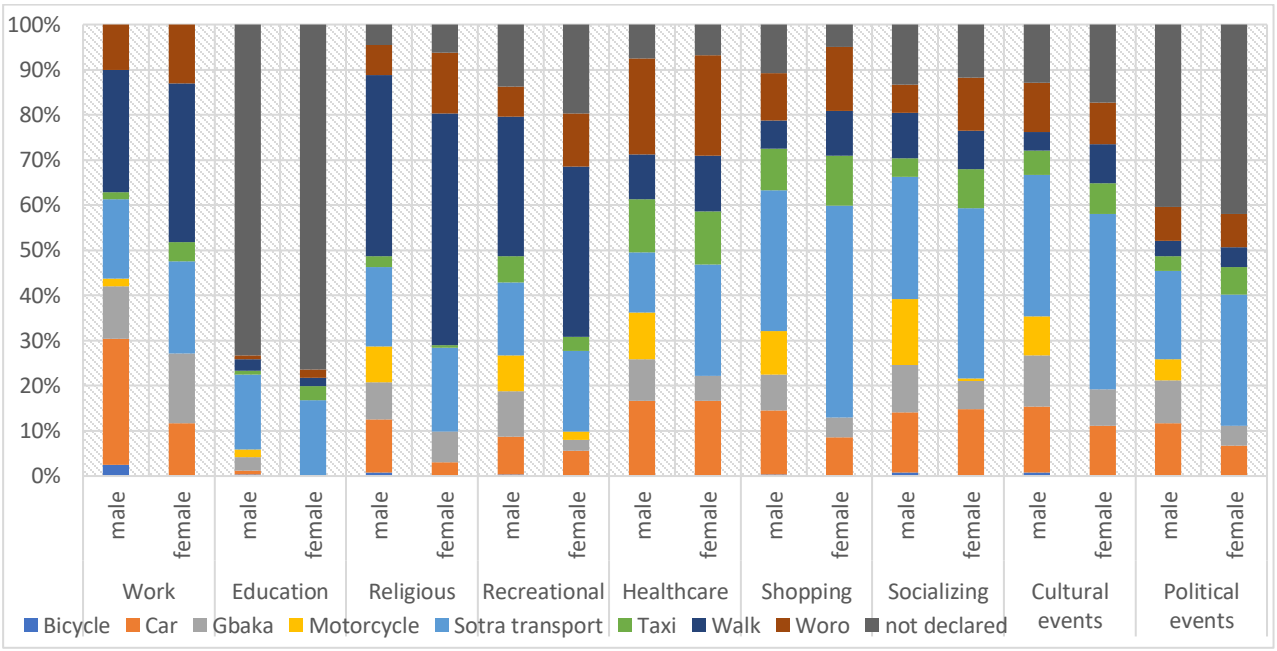


Figure 6: Choice of Usual Travel Mode by Activity

As a result, men are more likely to walk to religious and work activities, while women are more likely to walk to cultural and shopping activities. Therefore, there are differences between men and women in terms of the types of activities they engage in. Men tend to work in areas farther from their homes, which may explain this phenomenon. Women, on the other hand, are more likely to work closer to their homes. In addition, it appears that women are more likely than men to engage in leisure activities near their homes, such as shopping and cultural activities. This could explain why men tend to walk further than women, since they are more likely to walk to work, while women have a tendency to walk for leisure purposes. Additionally, this suggests that women may benefit more from improved access to walking trails and other amenities near their homes.

After walking, men used public transport (both formal and informal) more frequently than women. Women were more likely to use private vehicles to travel. This difference in transportation mode use may be due to differences in access to resources and mobility restrictions. Men reported using public transport modes (SOTRA, Gbaka, Taxi and Woro-woro) for work at a rate of 24.4%, while women reported using them at a rate of 21.3%. The proportion of men who use public transport for educational purposes was 12.7%, while the proportion of women was only 8.6%. Also, 33.2% and 21.2% of men reported using public transport for healthcare and recreational activities, respectively, compared to 25.9% and 14.1% of women. Men reported using public transport for religious activities at a rate of 20.9% compared to women at 15.9%. The difference between the two genders is statistically significant, as evidenced by the p-value of 0.03. These results suggest that men are more likely to access transportation for religious activities than women. Additionally, this indicates that cultural factors may influence the gender gap in transportation access for religious activities.

Overall, walking is the primary mode of transportation for all out-of-home activities for both genders. However, men walk for the majority of activities, while women walk more often for cultural and shopping activities. In addition, men are more likely to use public transportation while women are more likely to use private vehicles. According to World Bank (2008), due to limited private car ownership, much of the population in developing countries relies on public transportation due to the lack of basic land uses within walking distance. In terms of daily trips, men reported participating in out-of-home activities more frequently than women. Men are more likely to travel daily to/from work and education activities than women. Shopping and healthcare activities are the only exception trips, where women reported a higher frequency of participation than men on alternate days.
In conclusion, these results indicate that men are more likely to use all modes of transport for a variety of activities than women. These numbers show that there is a gender gap in transport access, with men travelling more frequently than women. This gap is particularly relevant for educational and recreational purposes.

4.6. Issues to Access Public Transport By Gender

Public transport can be unreliable, overcrowded, and unsafe. It can also be expensive, with fares increasing faster than inflation. Additionally, public transport is not always available in some peripheral areas, leaving residents with limited options. This research asked respondents to rank different issues (availability, cost, and quality) of public transport, on a scale of 1 to 5, representing the problem from lowest to highest concern. The results showed that cost was the highest concern, followed by availability and quality.

This indicates that people are more concerned about public transport affordability than its availability and quality. This could be an indication that people are more likely to use public transport if it is more affordable.

The results show that women report experiencing issues that limit their access to transportation to participate in out-of-home activities. Within the population, women have higher concerns regarding issues that reduce their accessibility to work, education and social activities while men report lower concerns.

Not surprisingly, Figure 7 shows 54.3 % of respondents expressed transportation costs as an extreme or major concern. According to Morisset (2019), the daily struggles of urban life include the cost of public transportation. It is difficult to envision a productive and efficient city when travel is slow and expensive. Abidjan's poorest continue to use public transportation to get around and currently spend an average of 20% to 30% of their income on transportation and 200 minutes each day using or waiting for transportation. Moreover, Berrou et al. (2017) stated that the cost of daily trips made in the city account for more than 30% of the income of poor families.

Only 23.6 % of the population reported transportation costs as a minor or negligible issue with public transport. However, those who did not use public transportation reported transportation costs as a minor concern, with some calling it a negligible issue. This indicates that public transportation is an affordable option for many people, despite their concerns.

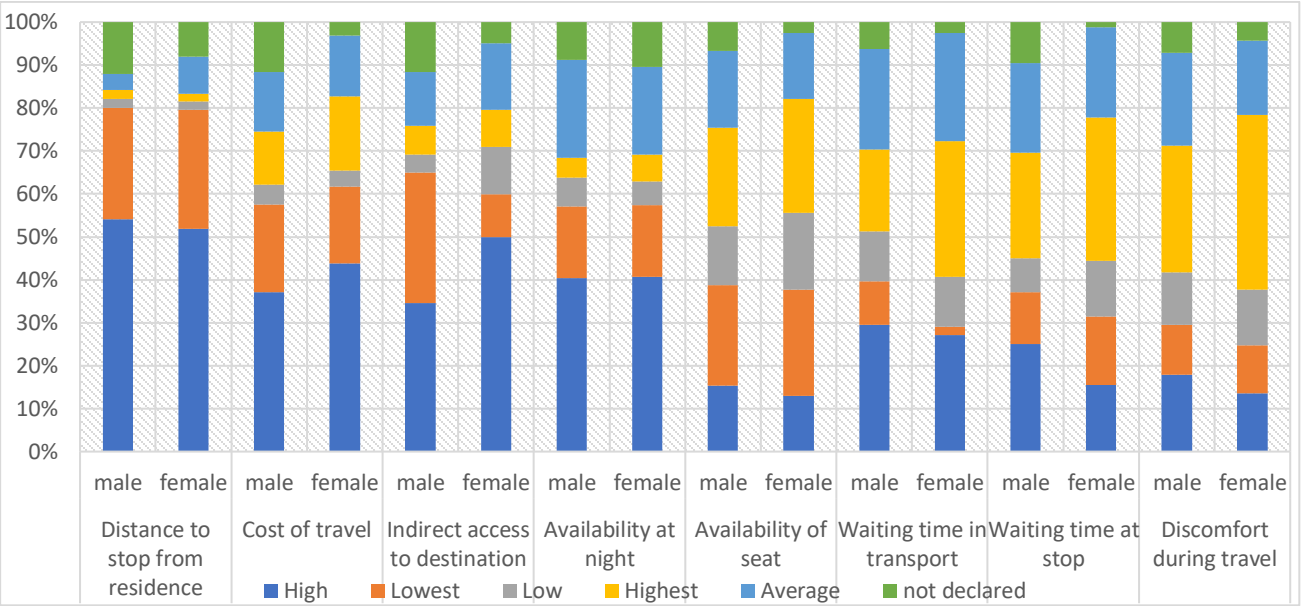


Figure 7: Ranking of Issues Reducing Access to Transport Based on Gender

The issues related to public transport availability (Distance to stop from residence, Indirect access to destination, and Availability at night) were identified as a higher concern specifically for women. Men ranked them as the lowest issue at 15.5%, 18.2%, and 10%, compared to women who ranked them at 11.2%, 4%, and 6.7% respectively. This difference in the ranking of public transport availability issues by gender indicates that women are more affected by these issues than men. Women feel these issues more acutely than men, likely due to the fact that women tend to feel more vulnerable in public spaces, especially at night, which makes public transport availability an important factor in their everyday lives. This lack of access has had a significant negative impact on their quality of life. This has, in turn, led to lowered confidence, and reduced opportunities for personal and professional growth. Women are consequently at a disadvantage compared to men in many areas. There is a need to improve public transport access for women in particular by increasing the number of stops, providing more direct routes to destinations and ensuring availability during late hours.

The results are consistent with previous studies that show women often face gender-based transport inequality. Additionally, women are more likely to use public transport, and are more likely to face safety issues, particularly in urban areas. As such, it is important to identify and address these issues to ensure women have safe and reliable access to public transport. This highlights the need for increased safety measures and better transport access for women.

5. Conclusion and Recommendations

The research was based on the gendered transport dimensions and women's social exclusion in Abidjan, Côte d'Ivoire. The study has successfully explored and illuminated gendered differences in transportation behaviours, activity participation, trip cancellation rates, mode choices and perceived barriers to access public transportation in Abidjan City. According to the research findings, gender is a significant variable influencing the way that individuals interact with transportation systems and participate in out-of-home activities. As Hanson (2010) explains, gender and mobility are inexplicably intertwined and influence one another in visible and invisible ways. The mobility system contributes to resourcefulness, freedom, and change to the existing power structure between genders. Conversely, denial of mobility or imposed immobility is seen as a way to 'keep women in a subordinate position' (Adeel and Yeh, 2018).

The research on the gendered dimensions of transport and women's social exclusion in Abidjan provided an essential understanding of women's challenges in accessing public transport. The data analysis revealed significant gender disparities in access to public transport in Abidjan. As mentioned by Gupta et al. (2018), in urban environments, gender-based transportation inequalities may be more prevalent among women; and women in Abidjan face significant obstacles and constraints in accessing public transport, which has led to transport-related social exclusion (Gupta et al., 2018). In this study, we have identified several key aspects of gender-based differences in transportation behaviour and activities in Abidjan.

A notable finding in this study is: women generally participate in fewer out-of-home activities than men, with some exceptions. On a daily basis, men in Abidjan travel more frequently for job and education-related activities than women (respectively 35.3% and 9.5% for men and 22.6% and 6.0% of women); contrasting with women who are more likely to travel more for shopping and healthcare on alternate days. From the analysis, we observed that the larger part of the population who feel excluded from the transport sector are women. Women experienced higher levels of transport-related social exclusion, hindering their ability to participate in economic, social, and cultural activities fully. Men were given greater opportunities than women; which concurs with that of Chamseddine & Ait Boubkr (2021), where transportation is influenced by the gendered division of labour; women have limited access to economic opportunities and increased dependency on public transportation. Issues related to the affordability, availability and quality of public transportation were identified as significant factors affecting activity participation, particularly among women. Women are reported to face more barriers and constraints in utilizing public transportation than men; including safety concerns, inadequate infrastructure, limited availability of public transport options, and restricted access to information on transport services.

The research results indicate that women face significant barriers and challenges in accessing public transport, which leads to transport-related social exclusion. The issue of gender-based differences in accessing public transport is evident: women's frequency of out-of-home activities participation is lower than that of men. This showed that there is limited mobility and restricted access to economic opportunities and women experience higher levels of exclusion in transport than their male counterparts. Vulnerable groups, including elderly individuals, persons with disabilities, and those from low-income backgrounds, also faced discriminating social and economic barriers in accessing the public transport system. Furthermore, men in Abidjan are more likely to participate in out-of-home activities than women, particularly in the fields of jobs and education. On a daily basis, men travel more frequently for job and education-related activities; contrasting with women who are more likely to travel for shopping and healthcare on alternate days. The reason behind these disparities may be primarily attributed to the sociocultural constructs of gender roles that influence the division of labour and time allocation between men and women.

A significant gender difference is also observed in the rate of cancelled activities, with women reporting higher numbers of trip cancellations due to transportation issues. Women are more likely to face barriers or constraints that force them to cancel some activities participation. There is a clear gender-based difference in the prioritization of educational activities, where women are 4.5 times more likely to "always" cancel their educational activities. Consequently, this leads to the reduction of women's quality of life, self-esteem, sociability, professional and personal opportunities. Child caregiving or family responsibility may be a significant barrier that limited women's ability to use public transportation effectively. The lack of accessible infrastructure such as ramps, elevators and designated seating, further exacerbated the exclusion experienced by women and generally vulnerable groups. The study also found that men are more likely to use active modes of transportation like walking and public transportation for a variety of purposes while women use private vehicles more frequently. Here, various socioeconomic factors and safety concerns may be the reason that limit the mobility of women.

Among the issues related to public transportation in Abidjan, cost emerges as the primary concern for both genders (54.3 % of respondents expressed transportation costs as an extreme or major concern while only 23.6 % reported costs as a minor or negligible issue). However, women express greater concern about the availability of public transportation, suggesting that they are more adversely affected by these issues than men. Men's travel patterns are also likely to be influenced by the fact that they are more likely to have a driver's license and access to a private car. Men are also more likely to engage in business-related trips such as work, seminars or conferences opportunities. Women, on the other hand, maybe more limited in their ability to travel due to a lack of transportation options. Women are more likely to be underemployed or unemployed, leading to further disparities in income and economic opportunities. This leads to a perpetuation of the gender gap in the workforce, where women are less likely to be promoted or receive higher wages. This may be because women are still underrepresented in many industries and are not afforded the same

opportunities as men. Therefore, it is crucial to address gender disparities in transport to ensure equal opportunities for all. Moreover, public transportation options available for women must be safer, more reliable and easily accessible.

The research findings highlight the importance of gender-sensitive transportation policies and planning in Abidjan to ensure equal access to transportation and consequently equal access to opportunities for all. The gender-based differences in transport behaviours and activity participation in Abidjan emphasize the need to address the issue through inclusive transportation planning and policymaking. Addressing these gendered dimensions of transport is essential to contribute to women's empowerment, improve their economic opportunities and promote social equity in the city. Thus, there is an urgent need for targeted interventions to address the gender gaps in public transport and promote women's empowerment and social inclusion. This is crucial to improve women's access to opportunities, enhance their economic and social participation and ensure their safety and well-being in public transportation. Policymakers, transport specialists and urban planners should incorporate gender-specific concerns and needs when improving the city's transportation landscape, with a particular focus on ensuring that women have access to safe, affordable, and reliable transportation networks. Safe, affordable, accessible and equitable transportation can have a positive impact on the health, well-being and economic opportunities for all citizens. By promoting social inclusion and gender equality in Abidjan and beyond in other cities, these efforts could be significant to mitigate women's social exclusion. It will enable women to access more resources and have more opportunities for professional development and will help Abidjan and other cities improve gender equity and inclusivity in transportation.

References

Adeel, M. & Yeh, A. G. O. (2018) Gendered immobility: influence of social roles and local context on mobility decisions in Pakistan, Transportation Planning and Technology, 41:6, 660-678, Doi: https://doi.org/10.1080/03081060.2018.1488932

Banister, D. (2005). Unsustainable Transport: City Transport in the New Century (1st ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203003886

Berrou, J.-P., Darbon, D. Bouquet, C. Bekelynck, A. Clement, M. Combarnous F. & Rougier E. (2017), "Le réveil des classes moyennes ivoiriennes ? Identification, caractérisation et implications pour les politiques publiques ", Papiers de recherche AFD, n° 2018-71, Juillet. https://doi.org/10.3917/afd.berro.2018.01

Bhandari, P. (2022). A Guide to Ethical Considerations in Research. [online] Scribbr. Available at: https://www.scribbr.com/methodology/research-ethics/

Cass, N., Shove, E., & Urry, J. (2005). Social exclusion, mobility and access. The sociological review, 53(3), 539-555.

Cazemier, M. (2022). New Needs, New Methods: A Review of Sustainable Transport and Mobility Planning in Abidjan, Côte d'Ivoire. Master thesis, Leiden University, Leiden, Netherlands.

Chamseddine, Z. and Ait Boubkr, A. (2021). Understanding Gender, Income and Travel Behavior in Casablanca City – Morocco. The Open Transportation Journal, 15(1), pp.272–279. Doi https://doi.org/10.2174/1874447802115010272

Church, Andrew & Frost, Martin & Sullivan, Karen. (2000). Transport and social exclusion in London. Transport Policy. 7. 195-205. https://doi.org/10.1016/S0967-070X(00)00024-X

Currie, G. (2004) Gap Analysis of Public Transport Needs: Measuring Spatial Distribution of Public Transport Needs and Identifying Gaps in the Quality of Public Transport Provision. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1895, 137-146.

Currie, G., & Delbosc, A. (2010). Modelling the social and psychological impacts of transport disadvantage. Transportation, Vol. 37, (6), pp. 953-966.

Currie, G., Richardson, T., Smyth, P., Vella-Brodrick, D., Hine, J., Lucas, K., Stanley, J., Morris, J., Kinnear, R., & Stanley, J. (2010). Investigating links between transport disadvantage, social exclusion and well-being in Melbourne–Updated results. Research in transportation economics, 29(1), 287-295.

Das, S. and Kotikula, A. (2019). Gender-based Employment Segregation: Understanding Causes and Policy Interventions.
Doherty, J. (2021). Mobilizing social reproduction: Gendered mobility and everyday infrastructure in Abidjan. 758–774, . Doi https://doi.org/10.1080/17450101.2021.1944288

Doumbia, M., Kouassi, A. A., Silué, S., Yoboué, V., Liousse, C., Diedhiou, A., … Kouadio, K. (2021). Road Traffic Emission Inventory in an Urban Zone of West Africa: Case of Yopougon City (Abidjan, Côte d'Ivoire). Energies, 14(4), 1111. https://doi.org/10.3390/en14041111

Gliem, J. & Gliem, R. (2003). Calculating, Interpreting, And Reporting Cronbach's Alpha Reliability Coefficient For Likert-Type Scales. 2003 Midwest Research to Practice Conference in Adult, Continuing, and Community Education.

Goel, R., Oyebode, O., Foley, L., Tatah, L., Millett, C. & Woodcock, J. (2022). Gender differences in active travel in major cities across the world. Transportation. Doi https://doi.org/10.1007/s11116-021-10259-4

Gupta, M., Bandyopadhyay, S., Mahapatro, M. & Jha, S. (2018). PROTOCOL: The effects of road infrastructure, and transport and logistics services interventions on women's participation in informal and formal labor markets in low- and middle-income countries: a systematic review. Campbell Systematic Reviews, 14(1), 1–57. Doi https://doi.org/10.1002/cl2.200

Hanson, S. (2010) Gender and mobility: new approaches for informing sustainability, Gender, Place & Culture, 17:1, 5-23, https://doi.org/10.1080/09663690903498225

Hanson, S., & Johnston, I. (1985). Gender differences in work-trip length: explanations and implications. Urban Geography, 6(3), 193-219.

Hine, J. & Mitchell, F. (2001). The Role of Transport in Social Exclusion in Urban Scotland. Social Research in Transport (SORT) Clearinghouse. http://dx.doi.org/10.3141/1895-18

Johnstone, L., & Ratanavaraha, V. (2020). Public transport initiatives in West Africa, a case study of Abidjan. GEOMATE Journal, 19(72), 197-204.

Kenyon, S., Lyons, G., & Rafferty, J. (2002). Transport and social exclusion: investigating the possibility of promoting inclusion through virtual mobility. Journal of Transport Geography, 10(3), 207-219. https://doi.org/10.1016/S0966-6923(02)00012-1

Kowalczyk, D. (2019). Research Methodologies: Quantitative, Qualitative & Mixed Method - Video & Lesson Transcript | Study.com. [online] Study.com. Available at: https://study.com/academy/lesson/research-methodologies-quantitative-qualitative-mixed-method.html

Lucas, K. (2012). Transport and social exclusion: Where are we now? Transport Policy, 20, 105–113.

Lucas, K. (2019). A new evolution for transport-related social exclusion research? Journal of transport geography, 81, 102529.

Lucas, K. (Ed.). (2004). Running on empty: Transport, social exclusion and environmental justice (1st ed.). Bristol University Press. https://doi.org/10.2307/j.ctt1t89876

Martínez-Mesa, J. (2016). Sampling: How to select participants in my research study? Anais Brasileiros de Dermatologia, [online] 91(3), pp.326–330. Doi: https://doi.org/10.1590/abd1806-4841.20165254

Morisset, J. (2019). The challenge of urban mobility in Abidjan. World Bank. Retrieved 16 June from https://blogs.worldbank.org/nasikiliza/the-challenge-of-urban-mobility-in-abidjan

Ramiaramanana, F. N., Lam, K., & Martinez, L. (2021). Policy making and political implications and contradictions in changing urban environment-Housing and public transport in Abidjan, Ivory Coast. "African cities in 2030: multidisciplinary research to meet health, demographic, economic and political challenges" Bordeaux Summer School!

Singhai, A. & Singhai, K. (2021). Gender, Inclusive Transport, and Sustainable Development Goals: A Legal Perspective to Transport Policies.

World Bank. (2019a). Côte d'Ivoire Eighth Economic Update: Key Messages. Retrieved July 7, 2023, from World Bank website: https://www.worldbank.org/en/country/cotedivoire/publication/cote-divoire-eighth-economic-update-key-messages

World Bank. (2019b). Que la Route Soit Bonne : Améliorer la Mobilité Urbaine à Abidjan (French). Washington, D.C. http://documents.worldbank.org/curated/en/624341549322162402/Que-la-Route-Soit-Bonne-Améliorer-la-Mobilité-Urbaine-à-Abidjan

Wright, T. (2016). Gender and Sexuality in Male-Dominated Occupations: Women Working in Construction and Transport. . Doi https://doi.org/10.1057/978-1-137-50136-3

Zhen, S. (2021). Rethinking public transportation for women's safety and security, BLOGS, PUBLIC TRANSPORT, TRANSPORT AND HEALTH. https://sustainablemobility.iclei.org/rethinking-public-transportation-for-womens-safety-and-security/

Zhen, S. (2021). Rethinking public transportation for women's safety and security. [online] ICLEI Sustainable Mobility. Available at: https://sustainablemobility.iclei.org/rethinking-public-transportation-for-womens-safety-and-security/.

Yeh, A. G. O. & Chow, M. H. (1996) An integrated GIS and location-allocation approach to public facilities planning—An example of open space planning, Computers, Environment and Urban Systems, Volume 20, Issues 4–5, Pages 339-350, ISSN 0198-9715, https://doi.org/10.1016/S0198-9715(97)00010-0

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

UMAGD, (2023) 15(3), s113-s122.

10.29137/umagd.1339630

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:3 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue

Araştırma Makalesi / Research Article

Numerical Analysis of Bio-Hybrid Crashworthiness Design and Investigation of Energy Absorption Performances Under Oblique Impact

Hakan Burçin Erdoğuş[1]

[1]*Izmir Kavram Vocational School, Machinery and Metal Technologies Department, 35230, Izmir, Türkiye*

***Başvuru/Received**: 08/08/2023* ***Kabul / Accepted**: 31/08/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Abstract

Designs inspired by nature are used in several areas as automotive, aerospace and defence industry. In studies on the axial crushing analysis of thin-walled structures such as crashworthiness, a critical role of developments of design aspects have been achieved by the bioinspired perspective. The energy absorption performance of the crashworthiness which shapes the basis of the crushing analysis is the main aspects of the numerical and experimental solution methods. In order to verification of finite element model, the energy absorption characteristic specifications were performed the square tube under axial loads. Using the proposed of lotus-inspired design performances of axial load condition, the newly design was prepared square tube included lotus bifurcation as called "bio-hybrid". To compare the axial and oblique loads performances of the L (lotus) and BH (bio-hybrid) structures, force-deformation curves was evaluated with characteristic properties as EA, CFE, SEA, MCF and PCF. The numerical analysis showed that the square outer frame included lotus bifurcation of crashworthiness is suitable than natural circular lotus configuration under oblique loads. However, the lotus-inspired configuration is determined advantageous under axial loads.

Key Words

"Crashworthiness, energy absorption, bio-inspired design, oblique impact"

***Corresponding Author:** hakan.erdogus@kavram.edu.tr*

1. Introduction

Crashworthiness is one of the main parts that ensure the safety of passengers and drivers in automobile accidents. There are two crashworthiness behind the bumper that distributes the kinetic energy released by the impact (San Ha et al., 2023). It is based on reducing the energy absorption by converting kinetic energy into plastic deformation energy. For this reason, studies have determined that geometric factors play a critical role as well as material selection. The studies carried out, it was aimed to increase the stiffness of structures by dividing the thin-walled polygonal and circular outer frame into multi-cells with different patterns (Nia et al., 2013; Nia et al., 2014; Fang et al., 2015; Ahmed et al., 2017; Shen et al., 2017; Xu et al., 2018; Wang et al., 2018). To investigate the behaviour of crashworthiness under impact loads, the sequential folding has achieved of the scaffold that consist of different corner geometries (Chen et al., 2018; Albak et al., 2021; Chen et al., 2019). From the shapes designed to increase the energy absorption capacity of the scaffold, it was seen that significant improvement was achieved in the high order hierarchical structures (Fan et al., 2018).

The adaptation of plants and animals living in nature is an important source of inspiration for designers in the fields of architecture and engineering. The numerical and experimental results indicated that the energy absorption is high efficiency for considered on bio-inspired properties (San Ha et al., 2020). Gong et al. (2022) carried out the energy absorption performances of the crashworthiness in a lotus-like and multi-cell structure. However, the optimum design parameters were determined by numerical simulations. Bamboo, plant stem, pomelo peel and horsetail-inspired structures provides an advantageous structure which is prepared with the definition of bionic energy absorber under axial loads (Zou et al., 2016; Zhang et al., 2019; Qin et al., 2022; Cheng et al., 2022). The design parameters such as multi-cell number and structural hierarchy, outer and inner diameter of the circular structure that was designed by bioinspired crashworthiness were more effectively in the SEA (specific energy absorption) (Zhang et al., 2018; Gong et al., 2020; Zhang et al., 2019). According to the experimental and numerical analysis studies, the best results were obtained with the increase in the number of multi-cells in the horsetail bionic structure (Xiao et al., 2016). Similarly, in the bionic conch-like crashworthiness, the effect of inner and outer diameter of structures on PCF (peak crashing forces) was greater than other geometric parameters (Zhang et al., 2019; Song et al., 2019) Xu et al, (2022) determined that in the pinus sylvestris hierarchical scaffold, which they designed as a square profile that was prepared the multi-cells of the inner parts of the corners, more suitable by means of sequential folding during deformation (Albak, 2021; Xu et al., 2022). In another design related to edge shape of bioinspired designs, the SEA significantly increased on the honeycomb frame with a triangular hierarchy (Yin et al., 2021). Song et al. (2022) determined the three cell shape of pine cone inspired structures was better energy absorption than other configurations. In bioinspired crashworthiness designs, analysis is also made on the basis of shell animals. In one of these, beetle elytra-like modelling, the SEA and CFE (crushing force efficiency) values determined that the wall thickness plays an important role for the best efficiency (Du et al. 2020). For the crashworthiness performance improvement, the behaviour of these structures under oblique loads has also been investigated in many studies (Fang et al., 2015; Zhang et al., 2021; Zhu et al., 2023). Huang et al. (2019) discussed that the most suitable EA (energy absorption) was obtained with the five-cell model in their optimization according to the O. scyllarus-like structure design.

The main purpose of this study is to design a square outer frame of crashworthiness that is used the hierarchical interior bifurcation pattern of a lotus inspired structure. However, the energy absorption parameters of the newly crashworthiness lotus-liked structure were investigated to improve the design. Our proposed methodology, for the designs defined as lotus (L) and bio-hybrid (BH), analysis was carried out under oblique and axial loads that is executed the numerical analysis method.

2. Material and Methods

In main crashworthiness analysis, the area under the force-deformation curve is evaluated as the total energy absorption of the structure. The deformation caused by a plate impacted on the structure in an axial or angular position is executed in numerical and experimental analysis. When the moving plate impact on the structure, the kinetic energy is transformed into plastic deformation energy. In this process, the geometric characteristic of the crashworthiness plays an important role for excellent energy absorption. Several equations in the literature are used to calculate the performance indicators of structure. The main indicators calculated in performance are respectively: PCF, mean crushing force (MCF), SEA, EA, CFE (Zhang et al., 2018; Qin et al., 2022;). The energy absorption of the whole system during deformation as:

$$\mathrm{EA(d)} = \int_0^{\mathrm{d}} \mathrm{F(x)dx} \tag{1}$$

where d is the axial displacement and F is the axial compression force. The maximum point on the force-displacement curve in numerical and experimental analyses is called PCF. The SEA is calculated by dividing EA by the mass of the structure. Based on the force-deformation graph, the MCF is given as:

$$\mathrm{MCF(d)} = \frac{\mathrm{EA(d)}}{\mathrm{d}} \tag{2}$$

CFE, which is the stability of the structure against the maximum impact force, can be explained as:

$$\mathrm{CFE} = \frac{\mathrm{MCF}}{\mathrm{PCF}} \text{ x } 100\% \tag{3}$$

To improve the design of crashworthiness, it is aimed to provide the optimal value of PCF and CFE with large cross-section area. In this case, the crashworthiness design is desired to have a low initial peak force at the crash. Based of crashworthiness studies in literature are focused on improving one or more parameters, it is basically aimed to reduce the fluctuation of force-displacement.

2.1 Finite Element Validation

Multi-cells are obtained that is placed panels in various hierarchies inside the square and circular tubular structure. Wu, (2016) designed the structures for multi-cell and square cross-section of crashworthiness and studied experimental and numerical analysis. The square section structures are 200 mm length and various wall thickness as given in Figure 1. The boundary conditions of plates (moving and fixed) and crashworthiness of FE assembly are set up for reference FE model (Wu et al., 2016). The moving and fixed plates was designed 100 x 100 mm² steel which is used material properties are follows; density 7.8x10³ kg/m³, Poisson's ratio 0.3, Young's modulus 200 GPa. As seen in Figure 1(b) and 1(c), the C1 and C4 are designed 3D deformable in the Solidworks software then was imported into the FE assembly. The structures bottom surface and fixed plate outer surface are constrained each other. For this study, the design of which was verified the FE model was set in Abaqus software considering the material properties of AI6063-T5 as follows: density 2.7x10³ kg/m³ , Young's modulus 68.2 GPa, Poisson's ratio 0.3(Wu et al., 2016). A static friction coefficient of 0.2 for surface-to-surface contact is defined in quasi-static conditions. The C1 and C4 structures was meshed C3D8R and for moving plates S4R, despite the shell structures which is used crashworthiness analysis generally performed in LS-DYNA (Xiao et al., 2016; Gong et al., 2020; Gong et al., 2022).

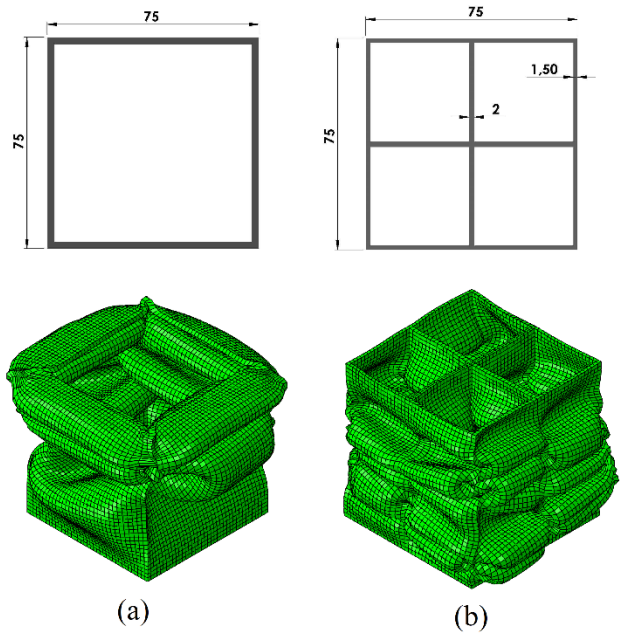


Figure 1. The deformation and lobe shapes during compression in **(a)** C1 and **(b)** C4 designs.

The number of mesh elements dimension is taken as 1.5 mm considering the validation model. The moving plate velocity is 10 m/s and deformed the structures from 0 to 120 mm. According to the quasi-static analysis solution, the ratio of kinetic energy to internal energy is below 5 % for validation of FE (Figure 1). The force-deformation curve of C1 and C4 which were designed in the same mass is showed in the Figure 2. It was ensured closed to FE model (Wu et a., 2016).

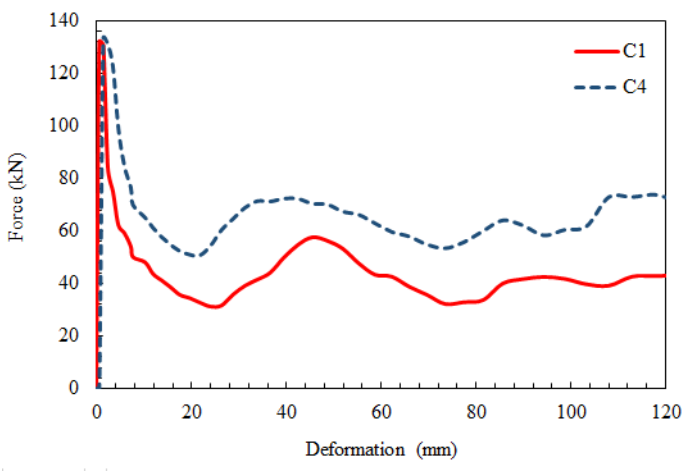


Figure 2. The force-deformation curves of C1 and C4 for convergence of FE model

The cross-sectional areas of C1 and C4 structures are equal, thus the PCF are 132.21 kN and 133.77 kN respectively. Until the sustained deformation to 120 mm, C4 collapse modes more uniform than C1 (Wu et al., 2016).

Table 1. FE analysis results vs. C1 structure verifications of FE model for performance parameters

Performance Parameters	C1*	C1 (Wu, 2016)	Error (%)
PCF(kN)	132,21	131,37	0,63
MCF(kN)	44,75	42,66	4,67
SEA(kJ/kg)	13,7	12,64	2,81
EA(kJ)	5,37	5,11	4,67
CFE(%)	33,85	32,5	3,98

In the impact simulation applied to the C1 structure for FE model verification, C1* values were calculated by the force-deformation curve and the Equation (1), (2) and (3). According to the referenced results, as given in Table 1, the model validation was approved since the error in the simulation model was < 5%.

2.2 Geometry of Bio-Hybrid Design

Generally, a circular outer frame is prepared for crashworthinesses on the basis of bio-inspired. Numerical and experimental analyses of these designs, which are created with the inspiration are carried out under the most appropriate conditions with various parameters. In particularly, the grooves on the tubular scaffold with circular cross-section were observed to behave with the definition of "corcentina mode" (Wang et al., 2018; Gong et al., 2020; Cheng et al., 2022;). In axial loading, it is desirable to provide the deformation as collapse without bending of scaffold in the same direction.

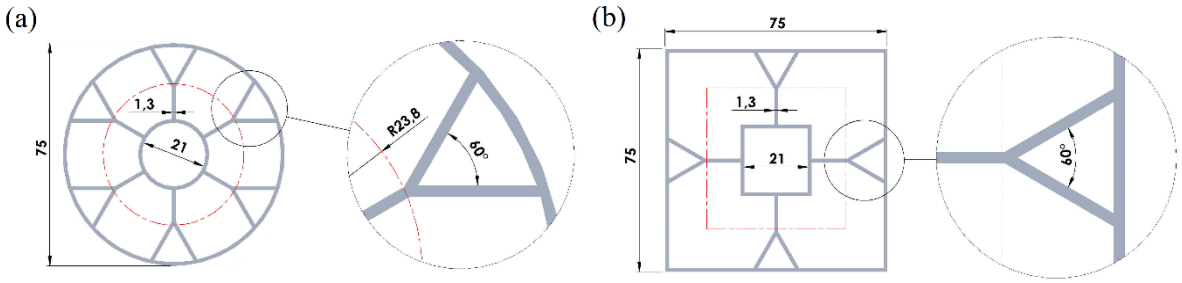


Figure 3. Design specifications of crashworthiness, **(a)** Lotus-liked, **(b)** Bio-hybrid.

When the kinetic energy is absorbed of the structure, dimension of structure is changed with corcentina mode under compression in square cross-section. Here, the newly crashworthiness created by the square outer frame with the bifurction panels which is inspired lotus-like structure is shown in the Figure 3. In this design idea, the wall thickness along with the inner and outer diameters for the L design was prepared by considering the reference model (Wu et al., 2016). It was prepared as 375 gr of L (Lotus) and BH (Bio-hybrid) designs with respect to C1 and C4.

2.3 Finite Element Simulations for Axial and Oblique Loads

The crashworthiness fixed behind the vehicle bumper can be deformed at different angles when there is an accident. As the load increases at the oblique angle, the crashworthiness is resisted to buckling (Huang et al., 2019). To investigate the buckling stiffness of multi-cell structures, studies were carried out single-cell polygonal and circular bio-inspired structures under oblique loads (Fang et al., 2015; Umeda & Mimura, 2019; Huang & Hu, 2019; Zhu et al., 2023). In this paper, numerical analy-sis was performed using Abaqus/Explicit software (Abaqus, 2014). The FE model prepared to examine the behaviour of the L and BH designs under axial and oblique loads is shown in the Figure 4. Moving plates are positioned on the structure at different angles (0°-15°-30°).

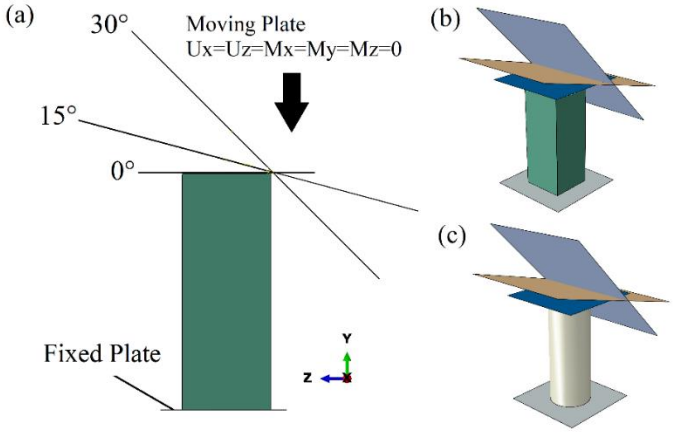


Figure 4. (a) FE models of designs assembly in all parts, **(b)** Bio-hybrid (BH), **(c)** Lotus-inspired (L).

Accordingly, the moving plates velocity is 10 m/s under quasi-static conditions at a low feed rate. The moving plate and structures have interacted to each other by surface-to-surface contact. The bottom of structures and fixed plate have constrained interaction. All parts in the simulation model are hard con-tact and static friction coefficient of 0.2 (Wu et al., 2016; Gong et al., 2022; Deng et al., 2023).

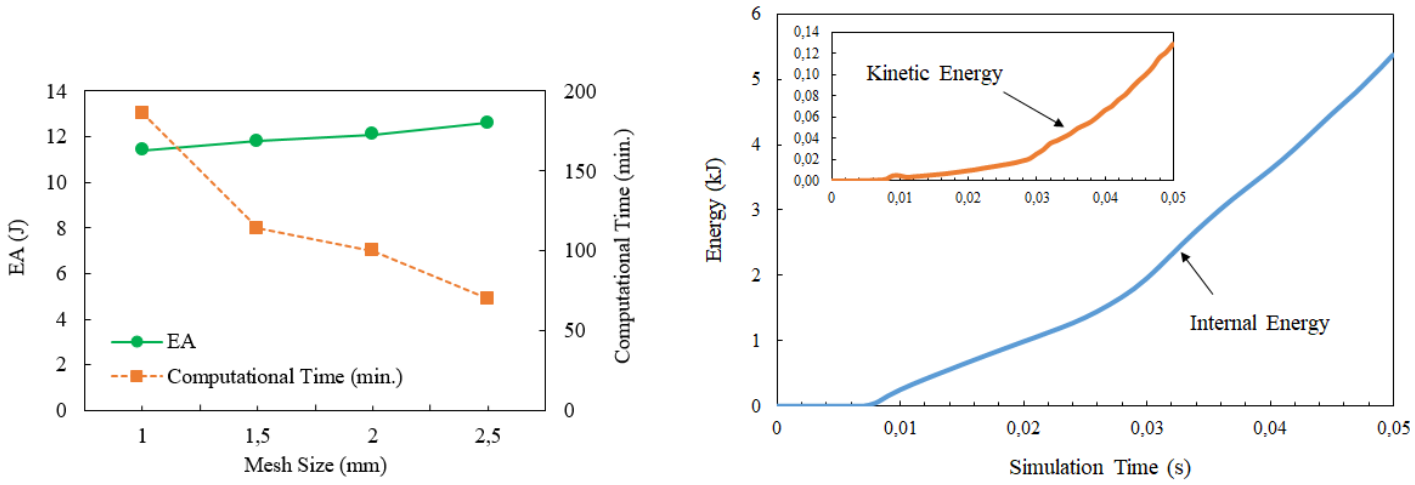


Figure 5. Mesh convergency and total energy curves of quasi-static analysis for the FE whole model verification.

The structures are designed in solid model, the element type of structures C3D8R and the fixed and moving shell plates are prepared 150 x 150 mm² and used S4R element type. To improve the mesh convergence of the FE model, simulations were performed by dividing structure into 1-1.5-2 and 2.5- mesh elements. As given in Figure 5, EA values of structure between 1 and 1.5 were close to each other. In the same study, PCF was determined as 125.1 kN, 125.61 kN, 126.75 kN and 127.31 kN, respectively. The mesh sizes of structures are set at 1.5 mm for reducing computation time and convergence of results. In order to investigate energy dissipation of simulations, the ratio of hourglass energy to total energy has been less than 1% and kinetic energy has been less than 5% of internal energy. Here, the quasi-static conditions were verified during the system analysis as given in the Figure 5. In addition, the sum of the reaction forces of the nodes on the fixed plate was used to obtain the force-deformation curves in these simulations.

2. Results and Discussion

In this section, force-deformation curves of L and BH crashworthiness were determined under axial and oblique loads includes EA, MCF, SEA and CFE parameters. The behaviour of the bio-inspired structure, which provides good energy absorption under axial load,

has been determined as a result of the analysis under oblique loads. In addition, the energy absorption was investigated of the newly structure (BH) with a square outer frame, which was generated with a lotus plant-like interior panel pattern.

3.1. Force-Deformation Curves

To compare the characteristics of the L and BH structures, force-deformation curves were plotted as seen in the Figure 6(a). When the force-deformation curve for BH is evaluated, it is observed that the PCF reaches its maximum point at the beginning of the stage, and then the plateu stage occurs with the increase in folding with the deformation of structure. However, the reaction forces gradually decreased as the plastic deformation increased during deformation. In contrast, when the moving plate impacted on the L, the force-deformation curve has occurred by fluctuation with collapse mode. As seen in the first stage of the Figure 6(a) curve, the deformation of strucutures linearly increased with the impacted moving plate to the top of the strucutes. In the second stage, while the crushing by the moving plate continued, the force reached its peak value. The last stage of deformation curve, the corcentina mode began and plastic deformation increased in the walls of structures. Thus, the force-deformation curve continued as fluctuation in the densification stage.

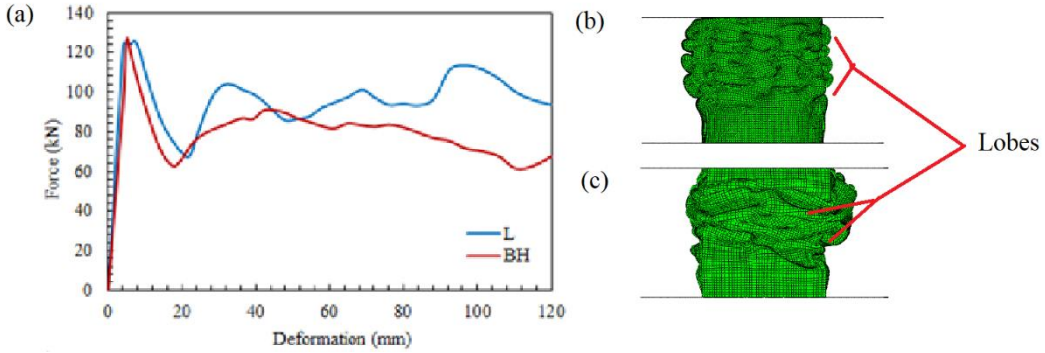


Figure 6. (a) The force-deformation curves of L and BH structures with deformation lobes, **(b)** L, **(c)** BH.

Comparing to L and BH structures, the energy absorption capacity of structures depends on force-deformation curves and these structures are evaluated from the numerical results in the literature. When structures are compressed on the axial direction by the moving plate, on the top of the structures wall has folded as seen in Figures 6(b) and (c). During this mode of deformation, lobes are formed on the structures for absorbing kinetic energy. Here, it is seen that L has more symmetrical lobes than BH against the applied axial load. In addition, 150 kN of PCF for L is characterized as the best crashwort-hiness performance (Gong et al., 2022). For the BH and L design, the PCF was determined 126.43 kN, 125.81 kN respectively. The force-deformation curve fluctuation of axial loading developed in a stable direction in BH. Here, the BH in terms of MCF was calculated 19.5% lower than L.

3.2. Crashworthiness Performances for Loading Angle

This section presents the behaviour of L and BH structures under oblique loads. Due to the crushing performance regarding the different oblique loads were conducted numerical analysis.

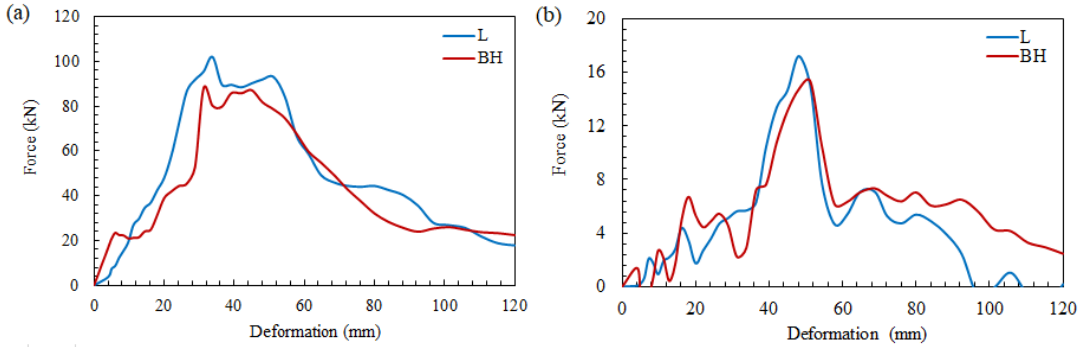


Figure 7. The force-deformation curves of L and BH structures for crushing **(a)**15° and **(b)** 30° under loads.

Figure 7(a) and (b) illustrates the L and BH structures force-deformation curve that is affected 15° and 30° angles. Although similar curve fluctuation was plotted in both structures, the PCF value of BH was lower compared to L. The PCF values obtained at 15°, L and BH structures were determined as 101.99 kN and 87.10 kN, respectively. Obviously, the maximum force point was reduced by 17% for BH, the square profile to which the lotus bifurcation pattern was adapted in square frame of structures. Compared of L and BH's PCF at 30°, it is seen that reduced by 12.19% with the BH design (Figure 7b). In MCF, which is one of the determining parameters of the crashworthiness performance, the improvement made at 15° and 30° was achieved to be 8.8% and 6%, respectively. The best

energy absorption and MCF can be obtained with the appropriate arrangement provided in the topology of the structure (Fan et al., 2018).

Umeda & Mimura 2018 demostrated that PCF decreased between the angle of impact was 10° and 20° on polygonal structures in quasi-static conditions. During the angular collision, the folding of structure wall is formed at 0 - 60 and 120 mm deformation distances as seen in the Figure 8. Due to the plastic deformation of structures, the lobes shaped by folding are collapsed on top of each other. To compare the buckling performance of the mentioned structures for 15° under loading on L and BH as given in respectively Figure 8(a) and (c). The red line defined of simulated in Figure 8, the buckling conditions of both structures were examined. Therefore, it is seen that L is more resistance to plastic deformation than BH.

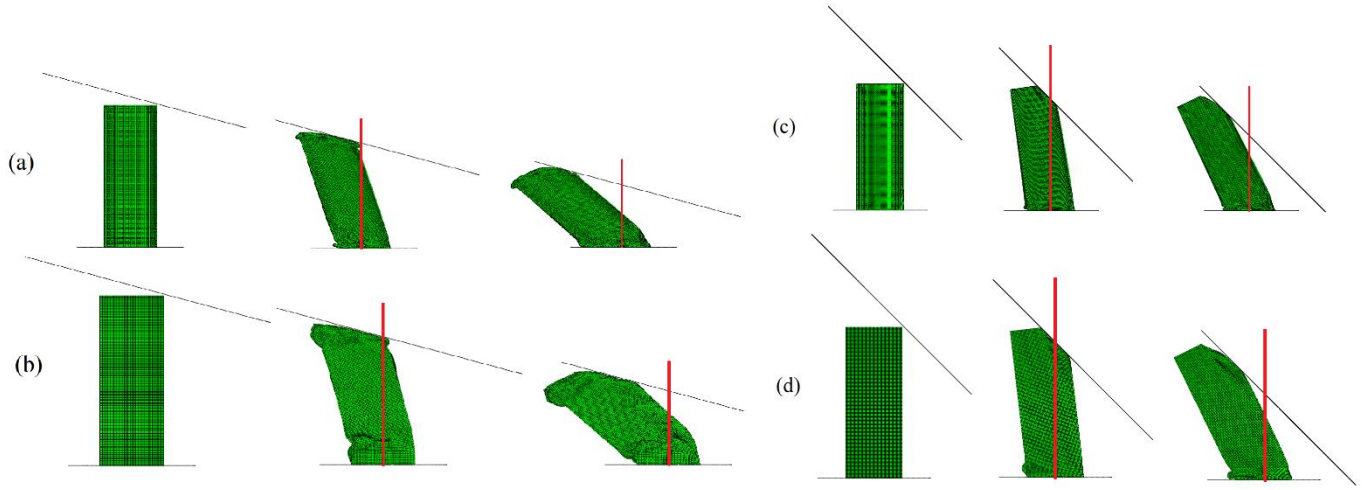


Figure 8. Collapse modes of structures under oblique loads with several displacement of moving plate, for 15° **(a)** L, **(b)** BH; for 30° **(c)** L, **(d)** BH.

Obviously, BH is more advantageous than the L design in inclined loads. Figure 8(b) and (d) are given the deformation of BH at an angle of 30° occured similarly to 15° impact. Huang and Hu, (2019) concluded that the circular crashworthiness design is more resistant to the possibility of buckling under oblique loads. When the multi-cell of structures are prepared by the walls in the crashworthiness, the resistance of the structures increase to the inclined load conditions.

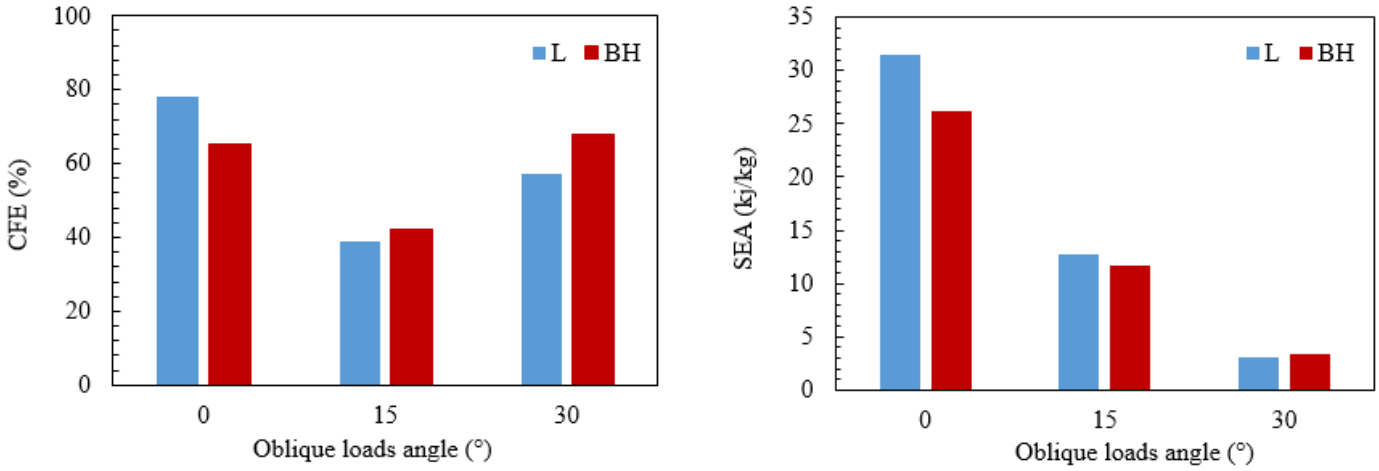


Figure 9. The comparison of structures main performance parameters, **(a)** CFE, **(b)** SEA.

For the crashworthiness performance evaluation, the basic parameters CFE and SEA comparisons are given in the Figure 9. It is evaluated that L performs better in terms of CFE and SEA when the moving plate impact on the structure in axial direction. In contrast to the axial direction of moving plate, the effect of oblique loads on the BH, SEA was found to be three times higher, especially loading at 15°. According to the simulation results calculated by dividing EA by the mass of the structure at the same angle, CFE was developed by 7.52% with BH design. Although there was no significant difference between the two designs for SEA at 30° loading conditions. The BH for CFE is 18.84% more efficient than L. Comparing to the L and BH structures performance criteria, the BH provided moresuitable performance under 15° and 30° loading than axial impact

3. Conclusion

Based on the numerical analysis of the lotus-inspired (L) and considered lotus bifurcation with outer square frame is called bio-hybrid (BH) was investigated in this paper. The convergence of the analysis results was ensured by conducting a validation study for the finite element model established in the first stage of the study. Although there is crashworthiness analysis under axial loads in the literature, oblique loads solution has not been adequately for generating of structural design. Based on the results from the numerical analysis of L and BH structures summerized as:

1- In terms of the CFE of the BH and L structure designs, there was a difference of 14.25% in the average of the CFE value in oblique angles. lt has been observed that polygonal designs are more advantageous than circular geometry under oblique loads.
2- There was no significant change in SEA criteria for 10 m/s impact from axial to oblique loads in L and BH designs.
3- It was good agreement that the force-deformation curve was more stable in the BH design and the wavelength was less than the L design.

The results of the analysis showed that by improving the bioinspired design, it gives significant effect for oblique loads on the structures that consist of corner for controllable deformation. It has been executed that the square outer frame scaffolding prepared with the bioinspired approach is more efficient in inclined loads. The study shown that the strength of circular cross-section bioinspired designs can be increased not only under axial but also inclined loads by desinging them with equal weight and polygonal cross-sections.

References

Abaqus 6.14. (2014), Analysis User's Manual, Dessault Systémes.

Ahmed, N., Xue, P., Kamran, M., Zafar, N., Mustafa, A., & Zahran, M. S. (2017). Investigation of the energy absorption characteristics of metallic tubes with curvy stiffeners under dynamic axial crushing. Latin American Journal of Solids and Structures, 14, 1293-1313. doi: https://doi.org/10.1590/1679-78253820.

Albak, E. I. (2021). Crashworthiness design for multi-cell circumferentially corrugated thin-walled tubes with sub-sections under multiple loading conditions. Thin-Walled Structures, 164, 107886.doi: https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107886.

Chen, S., Yu, H., & Fang, J. (2018). A novel multi-cell tubal structure with circular corners for crashworthiness. Thin-Walled Structures, 122, 329-343.doi: https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.10.026.

Chen, T., Zhang, Y., Lin, J., & Lu, Y. (2019). Theoretical analysis and crashworthiness optimization of hybrid multi-cell structures. Thin-Walled Structures, 142, 116-131.doi: https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.05.002.

Cheng, X., Bai, Z., Zhu, F., Chou, C. C., Jiang, B., & Xu, S. (2022). An optimized bio-inspired thin-walled structure with controllable crashworthiness based on magnetorheological fluid. Mecha-nics of Advanced Materials and Structures, 1-16. doi: https://doi.org/10.1080/15376494.2022.2146240.

Deng, X., Lu, Q., Liu, F., & Huang, J. (2023). Energy absorption comparison of conventional and dual gradient hierarchical multicellular tubes under axial impact. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 45(3), 182. doi: https://doi.org/10.1007/s40430-023-04115-y.

Du, J., Hao, P., Liu, M., & Scarpa, F. (2020). Multi-cell energy-absorbing structures with hollow co-lumns inspired by the beetle elytra. Journal of Materials Science, 55(10), 4279-4291. doi: https://doi.org/10.1007/s10853-019-04190-4.

Fan, H., Luo, Y., Yang, F., & Li, W. (2018). Approaching perfect energy absorption through structural hierarchy. International Journal of Engineering Science, 130, 12-32.doi: https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2018.05.005

Fang, J., Gao, Y., Sun, G., Qiu, N., & Li, Q. (2015). On design of multi-cell tubes under axial and ob-lique impact loads. Thin-Walled Structures, 95, 115-126.doi: https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.07.002.

Gong, C., Bai, Z., Lv, J., & Zhang, L. (2020). Crashworthiness analysis of bionic thin-walled tubes inspired by the evolution laws of plant stems. Thin-Walled Structures, 157, 107081.doi: https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107081.

Gong, C., Hu, Y., & Bai, Z. (2022). Crashworthiness analysis and optimization of lotus-inspired bionic multi-cell circular tubes. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 1-19.doi: https://doi.org/10.1080/15376494.2022.2111622.

Huang, H., & Xu, S. (2019). Crashworthiness analysis and bionic design of multi-cell tubes under axial and oblique impact loads. Thin-Walled Structures, 144, 106333. doi: https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106333.

Nia, A. A., & Parsapour, M. (2013). An investigation on the energy absorption characteristics of multi-cell square tubes. Thin-Walled Structures, 68, 26-34. doi: https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.01.010.

Nia, A. A., & Parsapour, M. (2014). Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections. Thin-Walled Structures, 74, 155-165. doi: https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.10.005.

Qin, S., Deng, X., & Liu, X. (2022). Crashworthiness analysis of bioinspired hierarchical gradient mul-ticell tubes under axial impact. Thin-Walled Structures, 179, 109591.doi: https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109591.

San Ha, N., & Lu, G. (2020). A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications. Composites Part B: Engineering, 181, 107496. doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107496.

San Ha, N., Pham, T. M., Chen, W., & Hao, H. (2023). Energy absorption characteristics of bio-inspired hierarchical multi-cell bi-tubular tubes. International Journal of Mechanical Sciences, 251, 108260. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108260.

Shen, W., Gu, X., Jiang, P., Hu, J., Lv, X., & Qian, L. (2017). Crushing analysis and multiobjective optimization design for rectangular unequal triple-cell tubes subjected to axial loading. Thin-Walled Structures, 117, 190-198.doi: https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.04.018.

Song, J. F., Xu, S. C., Wang, H. X., Wu, X. Q., & Zou, M. (2018). Bionic design and multi-objective optimization for variable wall thickness tube inspired bamboo structures. Thin-Walled Structu-res, 125, 76-88. doi: https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.01.010.

Song, J., Xu, S., Liu, S., & Zou, M. (2022). Study on the crashworthiness of bio-inspired multi-cell tube under axial impact. International Journal of Crashworthiness, 27(2), 390-399. doi: https://doi.org/10.1080/13588265.2020.1807686

Umeda, T., & Mimura, K. (2018). Energy absorption due to oblique impact crushing of thin-walled tubes. In EPJ Web of Conferences (Vol. 183, p. 04001). EDP Sciences. doi: https://doi.org/10.1051/epjconf/201818304001

Xiao, Y., Yin, H., Fang, H., & Wen, G. (2016). Crashworthiness design of horsetail-bionic thin-walled structures under axial dynamic loading. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 12, 563-576.doi: https://doi.org/10.1007/s10999-016-9341-6.

Xu, X., Zhang, Y., Wang, J., Jiang, F., & Wang, C. H. (2018). Crashworthiness design of novel hie-rarchical hexagonal columns. Composite Structures, 194, 36-48. doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.03.099.

Xu, S., Li, W., Li, L., Li, T., & Ma, C. (2022). Crashworthiness design and multi-objective optimiza-tion for bio-inspired hierarchical thin-walled structures. Comput. Model. Eng. Sci, 5, 19. doi: https://doi.org/10.32604/cmes.2022.018964.

Yin, H., Wang, X., Wen, G., Zhang, C., & Zhang, W. (2021). Crashworthiness optimization of bio-inspired hierarchical honeycomb under axial loading. International journal of crashworthi-ness, 26(1), 26-37. doi: https://doi.org/10.1080/13588265.2019.1650695.

Wang, Z., Liu, J., & Yao, S. (2018). On folding mechanics of multi-cell thin-walled square tu-bes. Composites Part B: Engineering, 132, 17-27. doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.036.

Wu, S., Zheng, G., Sun, G., Liu, Q., Li, G., & Li, Q. (2016). On design of multi-cell thin-wall structu-res for crashworthiness. International Journal of Impact Engineering, 88, 102-117. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.09.003.

Zhang, Y., Xu, X., Wang, J., Chen, T., & Wang, C. H. (2018). Crushing analysis for novel bio-inspired hierarchical circular structures subjected to axial load. International Journal of Mechanical Sci-ences, 140, 407-431. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.03.015.

Zhang, W., Yin, S., Yu, T. X., & Xu, J. (2019). Crushing resistance and energy absorption of pomelo peel inspired hierarchical honeycomb. International Journal of Impact Engineering, 125, 163-172. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.11.014.

Zhu, H., Yao, S., Li, Z., Liu, J., Xu, P., & Liu, M. (2023). Crashworthiness analysis of multilayered hexagonal tubes under axial and oblique loads. Mechanics of Advanced Materials and Structu-res, 30(17), 3608-3629. doi: https://doi.org/10.1080/15376494.2022.2079031.

Zou, M., Xu, S., Wei, C., Wang, H., & Liu, Z. (2016). A bionic method for the crashworthiness design of thin-walled structures inspired by bamboo. Thin-Walled Structures, 101, 222-230. doi:https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.12.023.

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

UMAGD, (2023) 15(3), s123-s132.

10.29137/umagd.1309302

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:3 Aralık/December 2023

Research Makalesi / Araştırma Article

Goal Programming Approach for Service Staff Scheduling Problem in A Restaurant

Hüseyin Ertan İnan[1]

[1]*Ondokuz Mayıs University, Faculty of Tourism, Department of Tourism Management, 55440, Samsun, Türkiye*

***Başvuru/Received**: 03/06/2023* ***Kabul / Accepted**: 03/09/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Abstract

Personnel scheduling plays a crucial role in the service industry, particularly in labor-intensive businesses like restaurants. The effective allocation of shifts for employees is essential to ensure uninterrupted service and optimize profitability. Poor scheduling can negatively impact both the business and its employees, resulting in decreased profitability and increased physical and mental strain. Continuity of service is essential in restaurant businesses. Shift plans ensure that the service continues uninterrupted by assigning personnel to various shifts. In order to provide the best service in restaurants, the daily shifts of the personnel working in shifts should be planned systematically. In this study, it is aimed to create the shift schedules of the service personnel in the Eskişehir branch of one of the leading restaurants in Turkey. The restaurant employs two types of service personnel: busboys and waiters. The number of required personnel varies across different days and shift periods. In this context, personnel shift schedules were created by using the goal programming method in the study, taking into account the business objectives, personnel needs and shift characteristics. The results of this study can contribute to the literature on staff scheduling in restaurants and can help restaurant businesses create more effective schedules.

Key Words

"Goal programming, personnel scheduling, shift scheduling, restaurant management, human resources management"

Corresponding Author: heinan@anadolu.edu.tr

1.Introduction

As labour-intensive service industries, restaurants require careful workforce planning to ensure optimal staffing levels (Bolayir & Ergülen, 2022). Inaccurate personnel allocation and shift arrangements can lead to decreased profitability and increased mental burden on employees. Although working for long hours in the hotel, restaurant and service sectors can be seen as cost savings, it can negatively affect employee performance and overall service quality (Çalişkan & Ünüsan, 2011). Service continuity is vital, particularly in tourism, restaurant and hotel businesses. Scheduling is a method that aims to allocate or distribute remaining resources or equipment to carry out a task within a given time frame (Laga & Sarno, 2018). Staff scheduling is the process of creating work schedules for staff so that an organization can meet the demand for its goods or services (Bolayır & Ergülen, 2022). Shift schedules enable personnel to be assigned to different shifts, ensuring uninterrupted service delivery (Aksoy et al., 2021). Therefore, it is essential to systematically plan daily shifts for personnel to optimize service provision in restaurant establishments. Personnel scheduling involves determining when employees will work based on their needs, preferences, and various limitations while aligning with business objectives. It is crucial for meeting workforce requirements effectively (Supciller & Erbilek, 2021).

Staff scheduling problems are significant challenges in both production and service sectors. In shift scheduling, employees are assigned to specific positions on particular days and hours. This process requires considering technical and legal constraints, employee preferences and needs, and various enterprise-specific constraints while aiming for balanced and fair assignments (Supciller & Erbilek, 2021). Optimization models can help overcome these problems in the creation of staff schedules. Previous studies on personnel scheduling frequently employ methods such as integer programming (Ingolfsson et al., 2010; Nobil et al., 2022), multi-objective optimization (Wang et al., 2022), and various metaheuristics (Hao et al., 2004; Jafari & Salmasi, 2015). Goal programming is another optimization method that can be used for this purpose. This method was used in many studies on tourism (Ernst et al., 2004; Kassa and Tizazu, 2013; Davras, 2017), education (Ciritcioğlu et al., 2017; Supciller & Erbilek, 2021), and health industries (Bektur &Hasgül, 2013; Ciritcioğlu et al., 2017; Varli & Eren, 2017).

Effective personnel scheduling is crucial for optimizing workforce management in service industries, especially in restaurants. Businesses can create equitable and efficient schedules that ensure service continuity and enhance overall performance by considering various factors such as business objectives, employee preferences, and shift characteristics. Restaurant staff scheduling is considered one of the most difficult problems (Akhundov, Tahirov & Glock, 2022). The staff scheduling problem in a restaurant might be further complicated by such factors as: unexpected situations and sudden increases in demand; individual preferences, skill sets, working hours availability of staff; multiple shifts, leaves, holidays, and sick days and various roles of staff such as waiter, chef, busser, kitchen assistant, and cleaners. Goal programming is an efficient method for personnel scheduling problems because it is an analytical method in which the characteristics of the goals are certain, and the decision maker minimizes the part of the goals that cannot be achieved. Its main difference from other maximization or minimization problems is that multiple and conflicting objectives can be included in the objective function (Supciller & Erbilek, 2021). Although various linear programming models have been used in previous studies on restaurant staff scheduling (Choi, Hwang & Park, 2009; Akhundov et al., 2022; Ahamad & Ghani, 2023), studies using goal programming are still limited (Bektur and Hasgül, 2013; Nasir et al., 2022). There is a gap in the restaurant industry for the use of goal programming in staff scheduling.

Considering this gap in the literature, this study aims to schedule the shifts of service personnel in the Eskişehir branch of one of Turkey's leading restaurants by using goal programming. The restaurant employs two types of staff: bussers and waiters. Different numbers of bussers and waiters are required on different days and shift periods. The objective is to create personnel schedules that are as equitable and fair as possible. Goal programming was used, considering business objectives, and shift characteristics. This study is important for the restaurant industry as it offers new practical information and a mathematical model for staff scheduling. A literature review on the use of goal programming in staff scheduling is given in section two. The aim and formulation of goal programming are given in section three. The mathematical model, business rules and preferences and separate work schedules of bussers and waiters created as a result of model analysis are shown in section four. In section 5, research conclusions, suggestions and research limitations are mentioned.

2. Literature Review

Staff shift scheduling is essential in the healthcare sector. One of the goals of healthcare establishments is cost savings and improving service quality. When examining past studies in the literature, it is observed that nurse scheduling problems are frequently addressed. Varli & Eren (2017) proposed a goal programming model to meet the required number of nurses in intensive care, operating room, and emergency departments of a hospital. Similarly, Atmaca et al. (2012) used goal programming to create shift schedules for nurses in a hospital. Goal programming models for staff scheduling are also used in many fields outside the service sector (Varli & Eren, 2017). In some studies, goal programming has been integrated with multi-criteria decision-making methods such as AHP to create scheduling models (Supciller & Erbilek, 2021; Varli & Eren, 2017). In their study, Supciller & Erbilek (2021) aimed to address the staff scheduling problem in the education field, which is another important service sector. They determined the weekly shift schedule for part-time student workers in a university's central library. They used goal programming and the Analytic Hierarchy Process methods to make appropriate assignments to suitable days and shifts while considering the students' weekly class schedules. In another study, the working conditions of security guards with different job types in a university were considered from different perspectives, and shift assignments

were made using goal programming (Ciritcioğlu et al., 2017). When reviewing past studies, different methods have been used, taking into account the sector characteristics and constraints to create staff schedules in various fields such as tourism, healthcare, and education. Staff scheduling is of critical importance in the tourism sector. Tourism is a service sector, and the high short-term fluctuations in demand, the need for services to be available 24/7, and the inability to stockpile the workforce further increase the importance of workforce planning (Davras, 2017). Personnel costs are often one of a hotel's most significant expense items. Payroll and related expenses sometimes exceed 30% of hotel operating costs (Ernst et al., 2004). Kassa and Tizazu (2013) created weekly shift schedules for the engineering department personnel of a five-star hotel, taking into account their rest needs and the required number of personnel per shift using the integer programming method. Davras (2017) created shift schedules for receptionists in a five-star hotel using integer linear programming, considering the required daily and hourly personnel numbers, breaks, and managers' prioritized objectives. Bolayır and Ergülen (2022) aimed to make workforce planning considering the working constraints and staff salaries in the hotel. They found the optimal number of workers in the hotel's shifts by establishing a pure integer programming model. The tourism sector includes not only hotels and accommodation establishments but also transportation, food and beverage, and entertainment businesses. Various studies have been conducted in the aviation sector to create staff schedules. Metaheuristic methods such as ant colony optimization (Deng & Lin, 2011), genetic algorithms (Levine, 1996), and integer programming (AhmadBeygi et al., 2009) have been used for crew scheduling in the airline industry.

Restaurants are labour-intensive sectors within the food and beverage industry. When creating staff schedules in restaurant establishments, different constraints should be considered. Choi et al. (2009) used integer programming to balance full-time and part-time workers and create shift schedules, enabling the restaurant to maintain an appropriate service level and reduce overall labour costs. Ahamad and Ghani (2023), conducted a study in a fast-food restaurant. They developed a binary integer programming (BIP) model and aimed to minimize the number of staff working in a day and as a result of the study they created fair working schedules with a smaller number of staff. Akhundov et al. (2022), developed integer programming models. They considered some tasks and responsibilities, employee types and experience levels and differences in the complexity of customer orders. They reported that overstaffing levels and labour costs were reduced as a result of the optimization. In another study, Noor, Alwadood & Adnan (2022) used a mixed integer linear programming model at a fast-food restaurant in order to find the optimum working schedule. Few studies have used goal programming. Bektur and Hasgül (2013) created staff shift schedules using goal programming, considering the employees' skills, seniority levels, preferences, and the system's demands. Nasir et al. (2022) used goal programming to create a schedule and aimed to ensure a fair workload for each worker. As a result of their study, they stated that they provide the same total number of shifts for restaurant staff.

When the studies on staff scheduling in restaurants are examined, studies using goal programming are still limited. There is a significant gap in the literature on restaurant staff shift scheduling, and more work needs to be done in this area. The remainder of the article provides information about goal programming and continues with the application of goal programming to solve the staff scheduling problem in a restaurant.

3. Goal Programming

Goal programming aims to assist decision-makers in making choices that will satisfy conflicting goals as much as possible (Goh, 2019). There are some fundamental concepts that shape the structure of goal programming. These concepts include objective function, deviation variables, goals, and constraints. The objective function is a function that minimizes undesirable constraints in the objectives (Öztürk, 2009; Supciller & Erbilek, 2021).

Deviation variables represent the deviations from the goals and are included in the objective function of the model to indicate cases where the desired goal is exceeded or not achieved. Negative deviation variables indicate how much the goal is not achieved, while positive deviation variables indicate how much the goal is exceeded (Eroğlu, 2021).

Goal programming involves two types of constraints: system constraints and goal constraints. The goals that the decision-maker aims to achieve or considers necessary are translated into goal constraints in the model. Goal constraints are flexible and allow for deviations from the goals, unlike system constraints. System constraints do not allow any deviations (Eroğlu, 2021; Öztürk, 2009; Supciller & Erbilek, 2021).

3.1. Formulation of Goal Programming

In goal programming, the aim is to minimize deviation variables. Unlike linear optimization, the objective function is not directly maximized or minimized in goal programming. Objective Function is a function minimizing undesired deviations from the targets and shown in Equation (1) (Öztürk, 2009). Equation (2) represents the goal constraint. Equation (3) and Equation (4) include the deviation variables. In goal programming, the deviation variables symbolized as d_i^+ and d_i^- are tried to be minimized. The mathematical representation of goal programming is as follows (Supciller & Erbilek, 2021):

y_i : j. decision variable

k_{ij}: i. goal and j. decision variable coefficient

l_i : the desired value for i. goal

d_i^+: positive deviation variable
d_i^-: negative deviation variable

Minimize Z = $\sum_{i=1}^{k}(d_i^+ + d_i^-)$ (1)

$\sum_{j=1}^{n} k_{ij} y_i + d_i^+ + d_i^- = l_i$ (2)

$d_i^+ x\ d_i^- = 0$ (3)

$x_i, d_i^+, d_i^- \geq 0$ = 1,2…..,k j = 1,2…,n (4)

4. Application

In this section, a goal programming model has been created in order to obtain the most appropriate solution for the creation of the shift schedules of bussers and waiters in a restaurant business. Goal programming is classified as single-objective programming, equally-weighted/unweighted multi-objective programming, weighted multi-objective programming, priority multi-objective programming, and weighted-priority multi-objective programming according to the objectives of the problem (Öztürk, 2009; Supçiller ve Erbilek, 2021). In this research, an Equally Weighted/Unweighted approach was used in the establishment of the model, since the objectives of the research do not have any priority and the deviation variables are equally important. While creating the goal programming model, these stages of defining the problem were achieved: determining the parameters and decision variables, determining the system and goal constraints, and creating the goal function. The created model was solved with the GAMS v22.5 package program, and weekly shift schedules were created for the bussers and waiters, and the days when the staff would be off were determined.

4.1. Defining the Problem

The research was carried out in the Eskişehir branch of a restaurant business that has many branches in Turkey. Shift planning was done manually by the human resources assistant manager. In manual assignments, making a fair shift assignment for each staff member is both difficult and time-consuming. The shift assignments of the bussers and waiters are made according to the following conditions:

- A total of 12 bussers and 7 waiters works in the restaurant.
- Bussers cannot work as waiters or waiters cannot work as bussers.
- All personnel work in shifts in the morning (08:00 - 18:00), mid-day shifts (12:00 - 22:00) and at night (16:00 - 02:00).
- 1 waiter must be on duty in the morning shift.
- Minimum 2 and maximum 3 waiters should be on duty during the mid-day and night shifts.
- Minimum 2 and maximum 3 bussers should work in the morning shift.
- Minimum 3 and maximum 4 bussers should work in the mid-day shift.
- Minimum 3 and maximum 5 bussers should work in the night shift.
- All staff should be given one day off per week and staff should work 6 days a week.
- No staff should be off on the weekend.
- All staff should work on Fridays as much as possible.
- If a staff member is assigned to the night shift, they should not be assigned to the morning shift the next day.
- Each waiter on the morning shift can only be assigned one day per week.
- Appointments are requested to be made as equally and fairly as possible.

The minimum and maximum number of bussers and waiters to work in shifts is summarized in Table 1:

Table 1. Number of Bussers and Waiters to Work in Shifts

Bussers (12 Staff)	**Shift**	**Min – Max Number of Bussers**
Shift No: 1	Morning (08:00-18:00)	2 - 3 staff
Shift No: 2	Mid-day (12:00- 22:00)	3 - 4 staff
Shift No: 3	Night (18:00 - 02:00)	3 - 5 staff
Waiters (7 Staff)	**Shift**	**Min – Max Number of Waiters**
Shift No: 4	Morning (08:00-18:00)	1 staff
Shift No: 5	Mid-day (12:00- 22:00)	2 - 3 staff
Shift No: 6	Night (18:00 - 02:00)	2 - 3 staff

4.2. Parameters

n: total number of service personnel working in the restaurant = 19 *(Bussers: 1-12, Waiters:13-19)*
m: number of days = 7 *(1: Mon, 2: Tue, 3: Wed, 4: Thu, 5: Fri, 6: Sat, 7: Sun)*
t: total number of shifts of bussers and waiters = 6 *(**Bussers**: Shift 1: Morning, Shift 2: Mid-day, Shift 3: Night; **Waiters**: Shift 4: Morning, Shift 5: Mid-day, Shift 6: Night)*
i: Personnel index i = 1.2…..,n
j: Day index j = 1.2…..,m
k: Shift index k = 1,2,..,t

4.3. Decision Variable

$$x_{ijk=} \begin{cases} 1 \text{ i. staff is assigned on j. day to k. shift} \\ 0 \quad \text{otherwise} \end{cases}$$

4.4. Constraints

In this section, constraints for the busser and waiter staff are provided.

4.4.1. Constraints for bussers
1. Constraints on the maximum and minimum number of bussers to be assigned to each shift.

Required number of bussers for the morning shift

$\sum_{i=1}^{12} X_{ijk} \geq 2$ ∀j, k = 1 (5)

$\sum_{i=1}^{12} X_{ijk} \leq 3$ ∀j, k = 1 (6)

Required number of bussers for the mid-day shift

$\sum_{i=1}^{12} X_{ijk} \geq 3$ ∀j, k = 2 (7)

$\sum_{i=1}^{12} X_{ijk} \leq 4$ ∀j, k = 2 (8)

Required number of bussers for the night shift

$\sum_{i=1}^{12} X_{ijk} \geq 3$ ∀j, k = 3 (9)

$\sum_{i=1}^{12} X_{ijk} \leq 5$ ∀j, k = 3 (10)

2. Bussers should have one day off per week and work for six days,

$\sum_{j=1}^{g} \sum_{k=1}^{3} X_{ijk} = 6$ i = 1,2…,12 (11)

3. All bussers should be scheduled to work on weekends

$\sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{3} X_{ijk} = 12$ j = 6,7 (12)

4. Each busser should be assigned to only one of the daily shifts,

$\sum_{k=1}^{3} X_{ijk} \leq 1$ i = 1,2,…,12, ∀j (13)

5. If a busser is assigned to the night shift, he/she should not be assigned to the morning shift the following day,

$X_{ijk} + X_{i(j+1)(k-2)} \leq 1$ i = 1…12, j = 1,2…,6, k=3 (14)

4.4.2. Constraints for waiters
1. Constraints on the maximum and minimum number of waiters to be assigned to each shift.

Required number of waiters for the morning shift

$\sum_{i=13}^{n} X_{ijk} = 1$ ∀j, k = 4 (16)

Required number of waiters for the mid-day shift

$\sum_{i=13}^{n} X_{ijk} \geq 2$ ∀j, k = 5 (17)

$\sum_{i=13}^{n} X_{ijk} \leq 3$ ∀j, k = 5 (18)

Required number of waiters for the night shift

$\sum_{i=13}^{n} X_{ijk} \geq 2$ ∀j, k = 6 (19)

$\sum_{i=13}^{n} X_{ijk} \leq 3$ ∀j, k = 6 (20)

2. Each waiter should be assigned to the morning shift only once per week,

$\sum_{j=1}^{g} X_{ijk} \leq 1$ i = 13,1 4, ..., n, k = 4 (21)

3. Waiters should have one day off per week and work for six days,

$\sum_{j=1}^{g} \sum_{k=4}^{t} X_{ijk} = 6$ i = 13,14, …., n (22)

4. All waiters should be scheduled to work on weekends,

$\sum_{i=13}^{n} \sum_{k=4}^{t} X_{ijk} = 7$ j = 6,7 (23)

5. Each waiter should be assigned to only one of the daily shifts,

$\sum_{k=4}^{t} X_{ijk} \leq 1$ i = 13,14, …, n, ∀j (24)

6. If a waiter is assigned to the night shift, he/she should not be assigned to the morning shift the following day,

$X_{ijk} + X_{i(j+1)(k-2)} \leq 1$ i = 13, 14, …, n, j = 1,…,6, k = 6 (25)

4.4.3. Goal constraints

1. Ensure that the number of shifts assigned to each busser in the morning, mid-day, and evening is as evenly distributed as possible.

Night Shift;

$\sum_{j=1}^{g} X_{ijk} + d1n_i - d1p_i = 4$ i = 1,2,…,12, k = 3 (27)

Mid-day Shift;

$\sum_{j=1}^{g} X_{ijk} + d2n_i - d2p_i = 3$ i = 1,2,…,12, ∀j, k = 2 (28)

Morning Shift;

$\sum_{j=1}^{g} X_{ijk} + d3n_i - d3p_i = 2$ i = 1,2,…,12, ∀j, k = 1 (29)

2. Ensure that the number of shifts assigned to each waiter in the mid-day, and evening is as evenly distributed as possible.

Night Shift;

$\sum_{j=1}^{g} X_{ijk} + d5n_i - d5p_i = 3$ i = 13,14…n, ∀j, k = 6 (30)

Mid-day Shift;

$\sum_{j=1}^{g} X_{ijk} + d6n_i - d6p_i = 3$ i = 13,14,…,n, ∀j, k = 5 (31)

3. Ensure that all waiters and bussers work on Friday as much as possible.

Bussers' Constraint;

$\sum_{k=1}^{3} X_{ijk} + d4n_i - d4p_i = 1$ k = 1,2,3, i = 1,2,…,12, j = 5 (32)

Waiters' Constraint;

$\sum_{k=4}^{t} X_{ijk} + d7n_i - d7p_i = 1$ k = 4,5,6, i = 13,14,…,19, j = 5 (33)

4.5. Objective Function

$$\text{MinZ} = (\sum_{i=1}^{12} d1n_i - d1p_i + d2n_i - d2p_i + d3n_i - d3p_i + d4n_i + \sum_{i=13}^{19} d5n_i - d5p_i + d6n_i - d6p_i + d7n_i) \quad (34)$$

In the solution of the developed model, a computer with Intel Core i5, 2.30 GHz, 6 GB memory and Windows 10 operating system was used. The GAMS 22.5 package program was used to solve the model. With the solution of the model, weekly work plans of the busser and waiter personnel in the restaurant were created.

The weekly shift schedule of the bussers is shown in Table 2, and the weekly shift schedules of the waiters are shown in Table 3. In parallel with the model constraints, the shifts of all personnel were fairly distributed. All busser and waiter staff were assigned to work six days a week. On weekends, all bussers and waiters were assigned to work in different shifts. No assignments were made to morning shifts after night shifts. While it is requested that the personnel assignments be as balanced as possible, all personnel are expected to work as much as possible on Fridays. In parallel with this restriction, while all the bussers are on duty on Friday, only one waiter is off on Friday.

Table 2. Shift Schedule for Bussers

	1	2	3	4	5	6	7
	(Monday)	**(Tuesday)**	**(Wednesday)**	**(Thursday)**	**(Friday)**	**(Weekend)**	**(Weekend)**
Morning	B2	B1	B3	B1	B12	B1	B1
08:00- 18:00	B5	B8	B4	B4	B10	B3	B4
	-	-	B11	B8	B9	B9	B11
Mid-day	B4	B3	B1	B9	B1	B4	B12
12:00- 22:00	B7	B6	B2	B11	B3	B7	B9
	B12	B10	B8	B10	B5	B11	B5
	-	-	B12	-	B6	B6	B10
Night	B6	B7	B6	B2	B2	B2	B2
16:00- 02:00	B11	B12	B10	B3	B4	B10	B6
	B9	B9	B5	B5	B11	B5	B3
	-	-	-	B7	B7	B12	B7
	-	-	-	-	B8	B8	B8

Table 3. Shift Schedule for Waiters

	1	2	3	4	5	6	7
	(Monday)	**(Tuesday)**	**(Wednesday)**	**(Thursday)**	**(Friday)**	**(Weekend)**	**(Weekend)**
Morning **08:00- 18:00**	W2	W3	W7	W4	W6	W5	W1
Mid-Day	W3	W5	W4	W3	W7	W1	W3
12:00- 22:00	W7	W7	W5	W5	W5	W4	W4
	-	-	-	-	-	W7	W5
Night	W1	W4	W1	W1	W1	W6	W6
16:00- 02:00	W4	W6	W2	W2	W2	W2	W2
	W6	-	W6	-	W3	W3	W7

One of the constraints is that the bussers and waiters have one day off per week. The days off of the bussers are shown in Table 4. Accordingly, four bussers are off on Monday, four on Tuesday, two on Wednesday, and two on Thursday. The days off of waiters are shown in Table 5. One of the waiters is off on Monday, two on Tuesday, one on Wednesday, two on Thursday and one on Friday. In line with the constraints determined in the model, no personnel were considered to be off at the weekend. As a result of the modelling, shift assignments of all service personnel were carried out in a balanced way in line with the operational expectations.

Table 4. Days Off for Bussers

Busser No:	**B1**	**B2**	**B3**	**B4**	**B5**	**B6**
Day Off:	Monday	Tuesday	Monday	Tuesday	Tuesday	Thursday
Busser No:	**B7**	**B8**	**B9**	**B10**	**B11**	**B12**
Day Off:	Wednesday	Monday	Wednesday	Monday	Tuesday	Thursday

Table 5. Days Off for Waiters

Waiter No:	**W1**	**W2**	**W3**	**W4**	**W5**	**W6**	**W7**
Day Off:	Tuesday	Tuesday	Wednesday	Friday	Monday	Thursday	Thursday

5. Conclusion and Suggestions

Personnel scheduling aims to determine the working periods of employees considering the staffing needs in line with business objectives. Such scheduling plays a crucial role in restaurant operations as incorrect staffing levels and shift arrangements can impact business profitability. Additionally, having employees work at a high pace and for long durations can have a negative effect on job performance and service quality. In this context, various mathematical modelling methods can be used to assign employees to shifts in a fair and balanced manner. Goal programming can provide results that are closest to the desired or ideal assignment conditions.
Therefore, when it is not possible to achieve certain desired or ideal assignment conditions due to specific constraints, goal programming can help find a more flexible and closer-to-ideal solution. This study aims to create shift schedules for the service staff at a leading restaurant chain's branch in Eskişehir, Turkey. The study makes an important contribution to the literature as there are few studies related to the scheduling of restaurant employees. In the first stage of the research, a mathematical model is created, parameters are defined, decision variables are identified, and constraints are established based on business and personnel preferences. As a result of the study, separate work schedules are created for bussers and waiters. Different numbers of personnel are required on different days and shift periods for bussers and waiters in the restaurant. The aim is to assign personnel in a fair and equal manner. By considering business objectives, personnel preferences, and shift characteristics, shift schedules are created using the goal programming method. As a result of the study, each employee is ensured to work six days a week, with one day off. Weekends are the busiest days for the restaurant. Since weekends cannot be given as days off to the employees, shift assignments are made in a way that all personnel serve on those days. Night shifts end at 02:00. Assigning a staff member to a morning shift at 08:00 on the following day after working a night shift can create problems in terms of the employee's quality of life and job performance. Therefore, an employee assigned to the night shift is not assigned to the morning shift on the following day. Fridays are not as busy as weekends, but they are busier compared to other weekdays. The business expects all employees to work on Fridays if possible. In the generated shift schedule, except for one employee, all employees are assigned to work on Fridays. The results of this study can help restaurant businesses have knowledge about personnel scheduling and create work plans more effectively. This can contribute to creating a harmonious and trustful environment within the organization while enhancing employee performance. Imbalanced and unfair shift assignments within the organization can trigger organizational cynicism and negatively affect employee organizational commitment.

Balanced and fair distribution of shifts can contribute to cost savings in management while enhancing the quality of work life for employees. When it comes to arranging work shifts, restaurant managers encounter two-fold difficulties: dealing with having too many staff members which leads to high labor expenses, and having too few staff members, which increases the risk of service mistakes (Choi, Hwang and Park, 2009). Mental and physical burdens created by unbalanced shift plans on employees may cause a decrease in the performance of personnel who are in one-to-one communication with the customer. Customer dissatisfaction will cause the restaurant to lose customers. A high turnover rate will bring along various financial and time costs, such as hiring new staff and training costs. Fair staff scheduling in restaurants addresses challenges by distributing shifts equitably among employees, enhancing morale and engagement, reducing turnover, and improving service quality while minimizing errors. Similar goal programming applications in restaurants can ensure these benefits. Moreover, this approach helps reduce disputes and ensure legal compliance by avoiding overtime, ultimately resulting in a positive workplace culture and customer satisfaction.

This study has several limitations. First of all, this study was carried out in a restaurant in Eskişehir. Different restaurants may have different constraints, needs and purposes. In future studies, shift schedules for service personnel in fast-food restaurants, fine-dining restaurants, and other restaurants with different needs and constraints can be created using the goal programming method. New models can be developed by adding different constraints and personnel preferences to the model. However, goal programming models may not be an effective solution method as they can push the memory and speed limits of computers when dealing with large-scale problems. Various meta-heuristic methods can be used to address large-scale personnel scheduling problems in restaurants. In this study, it is limited to the data that the restaurant can provide. Various data, such as employee preferences, employee salaries, and overtime wages, could not be obtained, and these constraints could not be added to the model. By adding these constraints in future studies, the results can be compared.

References

Ahamad, S. N. S., & Ghani, N. H. A. (2023). A Binary Integer Programming Model for Personnel Scheduling: A Case Study at Fast-Food Restaurant in Johor. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, *30*(3), 334-347.

AhmadBeygi, S., Cohn, A., & Weir, M. (2009). An integer programming approach to generating airline crew pairings. *Computers & Operations Research*, *36*(4), 1284–1298. https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.02.001.

Akhundov, N., Tahirov, N., & Glock, C. H. (2022). Optimal Scheduling of Waitstaff with Different Experience Levels at a Restaurant Chain. *INFORMS Journal on Applied Analytics*, 52(4), 324-343.

Aksoy, Ş. K., Gün, T., & Çiçek, H. (2021). Turizm Sektöründe Vardiyali Çalışma Sisteminin Çalışan Mutluluğuna Etkisi. *Turizm Ekonomi ve İşletme Araştırmaları Dergisi*, *3*(2).

Atmaca, E., Pehlivan, C., Aydoğdu, C. B., & Yakici, M. (2012). Hemşire çizelgeleme problemi ve uygulaması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 28(4):351-358.*

Bektur, G., & Hasgül, S. (2013). Kidem Seviyelerine Göre İşgücü Çizelgeleme Problemi: Hizmet Sektöründe Bir Uygulama. *Afyon Kocatepe Üniversitesi, İİBF Dergisi,15(2),* 385-402.

Bolayır, B.,& Ergülen, A. (2022). Otel Personelinin Optimal İşgücü Planlaması: Saf Tamsayılı Programlama Uygulaması, *Kastamonu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, *24*(2), 178-196. https://doi.org/10.21180/iibfdkastamonu.1105411

Çalişkan, O., & Ünüsan, Ç. (2011). Otel Çalışanlarının Kurumsal Sosyal Sorumluluk Algısının İş Tatmini ve İşte Kalma Niyetine Etkisi. *Anatolia: Turizm Araştırmaları Dergisi*, *22*(2), 154-166.

Choi, K., Hwang, J., & Park, M. (2009). Scheduling Restaurant Workers to Minimize Labor Cost and Meet Service Standards. *Cornell Hospitality Quarterly*, *50*(2), 155–167. https://doi.org/10.1177/1938965509333557.

Ciritcioğlu, C., Akgün, S., Varli, E., & Eren, T. (2017). Shift Scheduling Problem a Solution Suggestion for Safety Officers in University of Kırıkkale. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, *9*(2), 1–23. https://doi.org/10.29137/umagd.351463

Davras, G. M. (2017). Konaklama işletmelerinde alternatif vardiya çizelgeleme modeli. *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 19(3), 471-489. https://doi.org/10.16953/deusosbil.311304

Deng, G.-F., & Lin, W.-T. (2011). Ant colony optimization-based algorithm for airline crew scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, *38*(5), 5787–5793. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.10.053

Ernst, A. T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., & Sier, D. (2004). Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. *European Journal of Operational Research*, *153*(1), 3–27. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00095-X

Eroğlu, E. (2021). *Yöneylem Araştırması*. İstanbul Üniversitesi Açık ve Uzaktan Eğitim Fakültesi Yayınları.
Goh, C. (2019). Optimizing accounting decision making using goal programming. *Journal of Corporate Accounting & Finance*, *30*(1), 161-168.

Hao, G., Lai, K. K., & Tan, M. (2004). A neural network application in personnel scheduling. *Annals of Operations Research*, 128, 65-90.

Ingolfsson, A., Campello, F., Wu, X., & Cabral, E. (2010). Combining integer programming and the randomization method to schedule employees. *European Journal of Operational Research*, *202*(1), 153–163. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.04.026

Jafari, H., & Salmasi, N. (2015). Maximizing the nurses' preferences in nurse scheduling problem: Mathematical modeling and a meta-heuristic algorithm. *Journal of Industrial Engineering International, 11*(3), 439–458. https://doi.org/10.1007/s40092-015-0111-0

Kassa, B. A., & Tizazu, A. E. (2013). Personnel scheduling using an integer programming model- an application at Avanti Blue-Nile Hotels. *SpringerPlus, 2*(1), 333. https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-333

Laga, S. A., & Sarno, R. (2018). Time and Cost Optimization Using Goal Programming and Priority Scheduling. In *2018 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication* (pp. 35-40). IEEE.

Levine, D. (1996). Application of a hybrid genetic algorithm to airline crew scheduling. *Computers & Operations Research, 23(6), 547-558.*

Nasir, D. S. M., Sabri, N. D. A., Shafii, N. H., & Hasan, S. A. (2022). Shift Scheduling with the Goal Programming Approach in Fast-Food Restaurant: McDonald's in Kelantan. J*ournal of Computing Research and Innovation*, 7(1), 104-112.

Nobil, A. H., Sharifnia, S. M. E., & Cárdenas-Barrón, L. E. (2022). Mixed integer linear programming problem for personnel multi-day shift scheduling: A case study in an Iran hospital. *Alexandria Engineering Journal*, *61*(1), 419–426. https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.030,

Noor, N. M., Alwadood, Z., & Adnan, N. C. (2022). A Mixed Integer Linear Programming Model for Crew Scheduling At Fast Food Restaurant. *International Journal of Social Science Research*, 4(2), 89-99.

Öztürk, A. (2009). *Yöneylem Araştırması.* Ekin Yayınevi, Bursa, Türkiye.

Supciller, A. A., & Erbilek, P. (2021). Analitik hiyerarşi prosesi ve hedef programlama ile bir üniversite kütüphanesindeki kısmi zamanlı personellerin çizelgelenmesi. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, *27*(1), 1–12. https://doi.org/10.5505/pajes.2020.86383

Varli, E., & Eren, T. (2017). Vardiya Çizelgeleme Problemi ve Bir Örnek Uygulama. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 185–185. https://doi.org/10.17671/gazibtd.309302

Varli, E. ve Eren T. (2017). Hemşire Çizelgeleme Problemi ve Hastanede Bir Uygulama. *Akademik Platform, 5-1, 34-40.*

Wang, X., Ferreira, F. A. F., & Chang, C.-T. (2022). Multi-objective competency-based approach to project scheduling and staff assignment: Case study of an internal audit project. *Socio-Economic Planning Sciences*, *81*, 101182. https://doi.org/10.1016/j.seps.2021.101182

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

UMAGD, (2023) 15(3), s133-s142.

10.29137/umagd.1297157

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:3 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue

Araştırma Makalesi / Research Article

Farklı Priz Hızlandırıcı Katkıların Püskürtme Beton Performansına Etkisinin Karşılaştırmalı Analizi

Comparative Analysis of the Effect of Different Setting Accelerator Admixtures on Shotcrete Performance

Hasan Polat*[1], Cengiz Özel [2]

[1] *Bingöl Üniversitesi, Teknik bilimler MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Bingöl, TÜRKİYE*
[2]*Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 16/05/2023 **Kabul / Accepted**: 19/09/2023 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Öz

Priz hızlandırıcılar hem kuru hem de ıslak karışım püskürtme beton uygulamalarında giderek daha fazla kullanılmaktadırlar. Priz hızlandırıcılar, erken yaş dayanımını artırmak, tozu ve geri sekmeyi azaltmak için kuru karışım uygulamalarında yaygın olarak kullanılırken, ıslak karışımda hızlı sertleşme ve erken mukavemet elde etmek için kullanılırlar. Yapılan bu çalışmada ıslak karışım püskürtme betonlarda kullanılan sıvı priz hızlandırıcı katkıların optimum değerleri araştırılmıştır. Priz hızlandırıcı katkı miktarı kullanılan çimento miktarının %0 (kontrol), %2, %4, %6 ve %8 oranlarında kullanılarak püskürtme beton numuneleri üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde, priz süresi tayini, basınç dayanımı (1gün, 7gün, 28 gün) deneyleri yapılmış ve iç yapı analizleri ile incelenmiştir. Çalışmada çimento olarak CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmış olup, katkı olarak alkali içeren ve içermeyen iki farklı priz hızlandırıcı katkı kullanılmış, su/çimento oranı 0,35 olarak sabit tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda, alkali içeren katkılarda %4'den yüksek katkı kullanımın uygun olduğu belirlenmiştir. Alkali içermeyen katkı türünde ise %8'den yüksek belli oranlarında katkı kullanımın uygun olacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca 1 ve 7 günlük basınç dayanımlarında priz hızlandırıcı katkı etkisinin bariz bir şekilde görüldüğü 28 günde ise kontrol betonun basınç dayanımına göre yaklaşık %22 oranında bir azalma meydana geldiği görülmüş olup yapılan içyapı analizleriyle bu durum desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler

"Püskürtme beton, priz hızlandırıcı katkı, basınç dayanımı, priz süresi tayini"

Abstract

Setting accelerators are increasingly used in both dry and wet mix shotcrete applications. While setting accelerators are widely used in dry mix applications to increase early age strength, reduce dust and rebound, they are used in wet mix applications to achieve rapid hardening and early strength. In this study, the optimum values of liquid setting accelerator admixtures used in wet mix shotcrete were investigated. Shotcrete specimens were produced by using 0% (control), 2%, 4%, 6% and 8% of the cement amount. Setting time determination, compressive strength (1 day, 7 days, 28 days) tests were performed on the produced specimens and analyzed by internal structure analysis. In the study, CEM I 42.5 R type cement was used as cement, two different setting accelerator additives with and without alkali were used as admixtures, and the water/cement ratio was kept constant at 0.35. As a result of the experiments, it was determined that the use of additives higher than 4% was appropriate for additives containing alkali. In the alkali-free admixture type, it is estimated that the use of admixtures at certain ratios higher than 8% will be appropriate. In addition, it was observed that the effect of the setting accelerator admixture was clearly seen in the compressive strengths of 1 and 7 days, and a decrease of approximately 22% was observed in 28 days compared to the compressive strength of the control concrete, and this was supported by the internal structure analysis.

Key Words

"Shotcrete, accelerator additive, compressive strength, setting time determination"

***Sorumlu Yazar:** hpolat@bingol.edu.tr*

1. Giriş

Geleneksel olarak bilinen çimento esaslı kompozit beton, birçok altyapı ve üstyapı uygulamasında yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Geleneksel betonun üretimi kolaydır, istenilen şekli verebilir, yüksek basınç dayanımı gösterir ve ekonomiktir. Bununla birlikte, çekme dayanımı ve yorulma dayanımı gibi süneklik gerektiren özellikleri oldukça düşüktür.

Geleneksel beton, bazı durumlarda istenilen özellikleri sağlayamadığı için özel betonların kullanılmasını zorunlu kılar. Bu özel betonlardan biri de Amerikan Beton Enstitüsü tarafından (ACI: American Concrete Institue), "bir hortumla taşınarak bir yüzey üzerine basınçlı hava yardımıyla yüksek hızla püskürtülen beton ya da harç karışımı" olarak tanımlanmış olduğu püskürtme betondur (ACI Committe 506. 1966). Ayrıca Püskürtme beton, bir yüzey üzerine yüksek hızla pnömatik olarak püskürtülen harç veya beton" olarak tanımlanan özel bir beton türüdür. Bu nedenle, püskürtme beton benzersiz bir malzeme olarak değil, betonu yerleştirmek için özel bir süreç olarak kabul edilir (Galan, vd., 2019; Warner, 1995., Cengiz & Turanlı, 2019; Yun, vd., 2020; Wang, vd., 2020; Maltese, vd., 2007; Won, vd., 2013, Polat, vd., 2023, İnce, vd., 2018, İnce, vd., 2015).

Püskürtme beton 1970 yılında Frankfurt ve Münih belediye tünellerinde kaplama yapılarının bir parçası olarak kullanıldığından, tünel desteği, hızlı onarım, şev desteği, gaz ve petrol kuyuları ve diğer yer altı yapıları gibi farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Dorn, vd., 2022; Aitcin, 2016). Daha hızlı inşaat süreçleri için çimento hidratasyonunu hızlandırma arzusu neredeyse çimentonun kendisi kadar eskidir (Çakıroğlu, vd., 2010). Hidratasyon olayını hızlandırmak için, su/çimento oranını (s/c) azaltmak, çimento inceliğini artırmak veya kürleme sıcaklığını artırmak gerekmektedir. Ayrıca çimentonun hidratasyon hızını artıran katkılar da uygulanabilir (De Belie, vd., 2005). Püskürtme betonda, dayanımın yanı sıra dayanıklılık özelliklerinin de geliştirilmesi ve püskürtme betondan beklenen bazı özelliklerin sağlanabilmesi için katkı maddelerinin kullanımı bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu, geleneksel betonda olduğu gibi püskürtme betonun üretiminde katkı maddelerinin kullanılmasını gerektirir. Katkı maddeleri, püskürtme betonun dayanıklılığını artırabilir ve istenen özelliklerin elde edilmesine yardımcı olabilir. (Yang, vd., 2020., İnce, vd., 2018).

Katkıların türleri ve özellikleri, püskürtme betonun inşaat kalitesini ve çevre güvenliğini, ayrıca sertleşmiş püskürtme betonun mekanik özelliğini ve dayanıklılığını etkileyen önemli faktörlerdir. Püskürtme beton yapım teknolojisindeki farklılıklara göre, malzemenin varoluş biçimi söz konusu olduğunda, hızlandırıcı katkı maddesi püskürtme beton için sıvı ve toz hızlandırıcı katkı maddeleri olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Bunlar arasında toz hızlandırıcı katkı maddesi kuru püskürtme beton teknolojisi için uygundur (Melbye, 2006). Sıvı hızlandırıcı katkı, ıslak püskürtme beton teknolojisi için uygundur ve üretimde düşük enerji tüketimi, toz kirliliği olmaması ve püskürtme işleminde düşük geri sekme oranı gibi birçok avantajına atfedilen püskürtme betonda yaygın olarak kullanılmaktadır (Levent, & Kalmış, 2014). Priz hızlandırıcı katkılar karışımın priz başlangıcını kısalttığından aynı zamanda geri sekmeyi da azaltır ve bir defada kalın bir tabaka oluşturabilmeyi sağlar (Neville 2011; Hughes, vd.,1995). Püskürtme betonda kullanılan priz hızlandırıcı katkı türleri; alkali içeren priz hızlandırıcılar ve alkali içermeyen priz hızlandırıcılar olarak sınıflandırılabilir (EFNARC, 1996).

Yapılan bu çalışmada püskürtme betonlarda yaygın olarak kullanılan sıvı alkali içeren ve içermeyen priz hızlandırıcı katkıların çimentoyla katkı uyumunu belirlemek çalışmanın temel amacı olarak belirlenmiştir. Bu amaç doğrultusunda alkali içeren ve içermeyen iki farklı katkı bağlayıcı miktarının %0 (kontrol), %2, %4, %6 ve %8 oranında kullanılarak, çimento katkı uyumu ve basınç dayanımı üzerindeki etkisini belirlenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışma kapsamında bağlayıcı olarak CEM I 42,5 R tipi çimento ve çimento katkı uyumunu belirlemek için iki farklı priz hızlandırıcı katkı kullanılmıştır.

2.1.1. Çimento

Yapılan çalışmada Elâzığ SEZA çimentodan temin edilen yoğunluğu 3.13 g/cm^3 ve incelik değeri 4130 cm^2/g olan CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentoya kimyasal özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler (CEM I 42,5 R)

Kimyasal bileşim (%)		**Çimentonun Fiziksel Özellikleri**	
SiO_2(%)	19,16	Özgül Ağırlık(g/cm3)	3,13
Al_2O_3 (%)	4,87	Özgül Yüzey (cm^2/g)	4130
Fe_2O_3 (%)	3,76	İncellik (µ)	2,8
CaO (%)	63,03	Priz Başı (dk)	125
MgO (%)	1,65	Priz Sonu (dk)	210
Kimyasal bileşim (%)		**Çimentonun Fiziksel Özellikleri**	

SO_3 (%)	3,26	Hacim Sabitliği	1
K_2O (%)	0,58	Basınç Dayanımı (N/mm^2)	
Na_2O (%)	0,17	2 gün	28,1
CI (%)	0,0102	7 gün	40,4
Kızdırma Kaybı	3,43	28 gün	54,2
Çözünmeyen Kalıntı	0,61		

2.1.2. Kimyasal katkılar

Çalışmada alkali içeren ve içermeyen olmak üzere iki farklı priz hızlandırıcı katkı kullanılmıştır. Priz hızlandırıcı katkılar AKKİM Kimya A.Ş 'den temin edilmiş olup özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Kimyasal Katkıların Özellikleri

Kod	Katkı oranı (%)	Yoğunluk (g/cm^3)	pH	Klorür İçeriği	Alkali Miktarı (Na_2O eşdeğeri, %)
A (Alkali içeren)	35	1,47	13,0	<0,1	<25
AF (Alkali free)	52	1,42	2,5	<0,1	<0,1

3. Metot

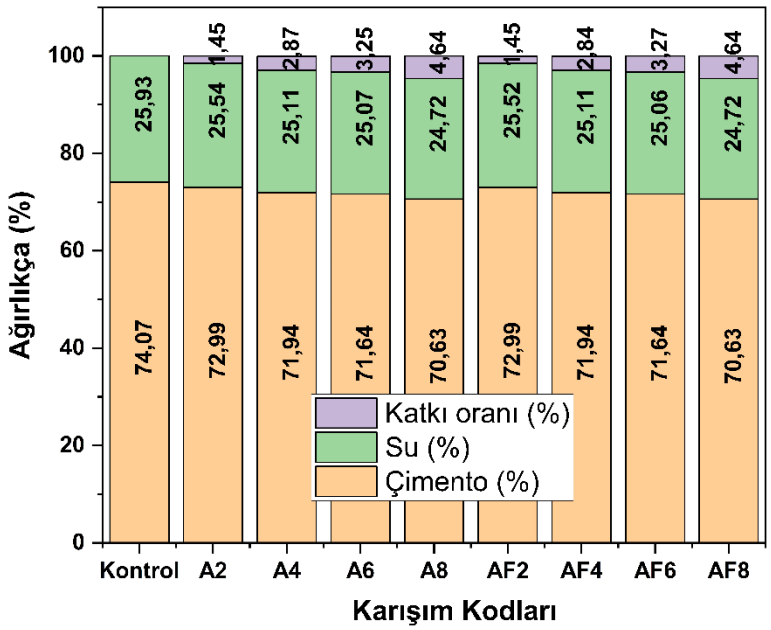
3.1. Üretim Yöntemi

Yapılan çalışmada çimento ve priz hızlandırıcı katkı uyumunu belirlemek için püskürtme beton numuneler laboratuvar ortamında üretilmiştir. Üretilen püskürtme beton numuneleri döküm işlemi gerçekleştirilerek üretilmiştir. Numune üretimi esnasında su/çimento oranı 0,35 olarak sabit tutulmuş olup, kullanılan çimento miktarının %0, %2, %4, %6 ve %8 oranında priz hızlandırıcı katkı kullanılmıştır. Priz hızlandırıcı katkı oranları (EFNARC, 1996) standardında belirtilen değerler göz önüne alınarak belirlenmiştir. Üretilen püskürtme beton numuneleri Şekil 1'de, üretilen numunelerin karışım oranları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Üretilen Numuneler

Yapılan çalışmada Şekil 1'de gösterildiği gibi 5x5x5 cm boyutunda harç numuneler üretilmiştir. Üretim numunelerin birinci aşamada çimento katkı uyumunu belirlemek için Vicat iğnesi deney aleti kullanılarak priz başlangıç ve bitiş süreleri belirlenmiştir. İkinci aşamada katkı oranına bağlı olarak, 1gün, 7gün ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Çalışmada üretilen gruplar ve içerikleri Şekil 1'de verilmiştir. Çalışmada gruplandırma yapılırken alkali içeren katkı (A) olarak, alkali içermeyen katkı (AF) olarak kodlanmıştı. Örneğin AF4 %4 oranında alkali içermeyen katkı kullanılarak elde edilen numune grubunu belirmektedir.



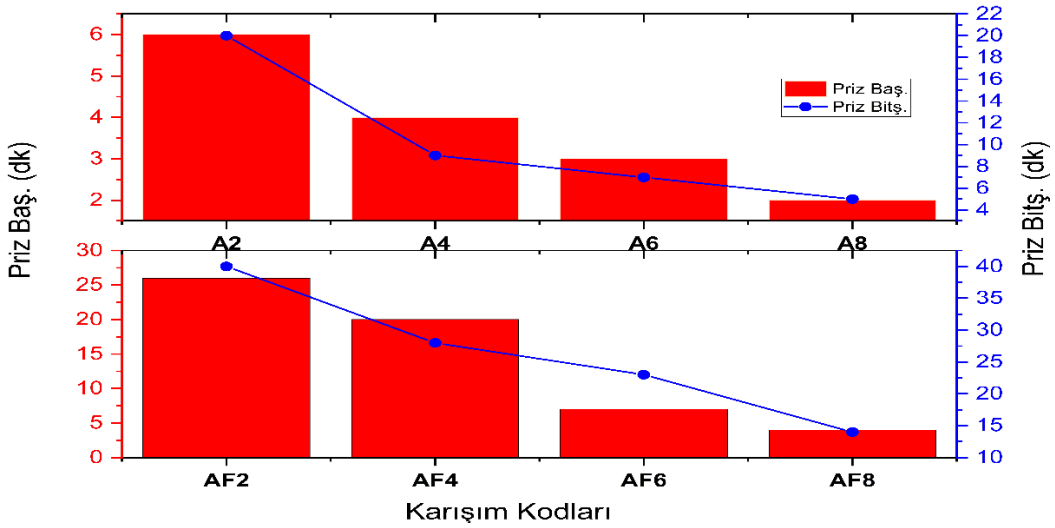
Şekil 2. Püskürtme Beton Karışım Oranları (%)

4. Araştırma Bulguları

Yapılan çalışma sonucunda üretilen numunelerin, birim hacim ağırlık, priz başlangıç ve bitiş süresi tayini ve basınç dayanımı özellikleri incelenmiş ve içyapı analizleriyle desteklenmiştir. Elde edilen veriler ve analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.

4.1. Priz Başlangıç ve Bitiş Zamanının Belirlenmesi

Priz başlangıç ve bitiş süreleri tayini deneyi (ASTM C 597)'e göre yapılmıştır. Yapılan deney sonucunda elde edilen veriler Şekil 3'de verilmiştir.

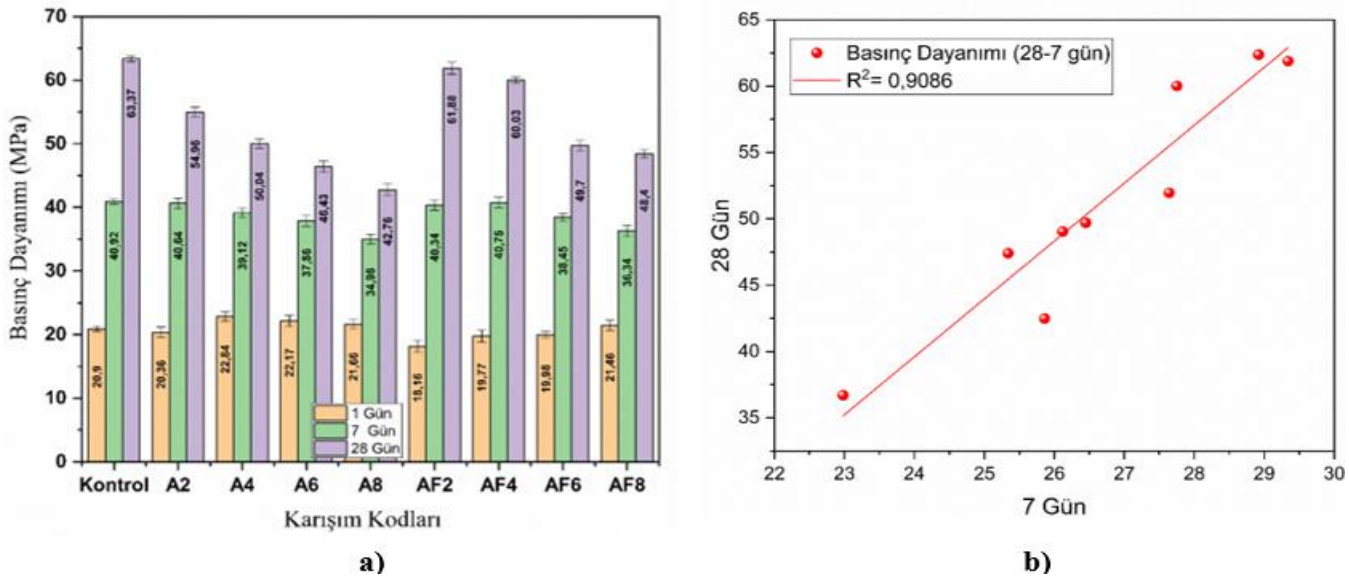


Şekil 3. Püskürtme Betonların Priz baş. ve Priz sonu değerleri (dk)

Belirtilen püskürtme betonlar için priz başlangıç ve bitiş süreleri (Rilem Report 10, 1995)'te belirtilen (priz başlangıcı 3dk, priz sonu 12 dk aşılmasın) göz önüne alınarak Şekil 2'de verilen değerler incelendiğinde, alkali içeren katkıda A4, A6 ve A8, alkali içermeyen katkıda ise AF8 grupları uygun sonuç vermiştir. Alkali içeren katkılarda %4'den yüksek, alkali içermeyen katkı türünde ise %8'den yüksek katkı kullanmak olasıdır. Alkali içeren katkı oranları göz önüne alındığında yüksek oranda katkı kullanımının ekonomik yönden uygun olmadığı görülmekte olup, basınç dayanımı değerleri göz önüne alındığında %4'den daha fazla katkı kullanılan diğer gruplarda basınç dayanımı değerlerin azaldığı görülmektedir. Bu bakımdan alkali içeren katkılarda %4 oranında priz hızlandırıcı katkı kullanmak optimum bir değer olarak belirlenmiştir.

4.2. Basınç Dayanımı

Üretilen numunelerin basınç dayanımı dayanımı (TS EN 12390-3, 2010)'a göre yapılmış olup, basınç dayanımı değerleri Şekil 4'de verilmiştir. Basınç dayanımı değerleri incelendiğinde kür süresinin artmasıyla tüm numune gruplarında artış meydana gelmiştir. Meydana gelen artış miktarı katkılı numunelerde ilk günlerde (1 ve 7 gün) fazlayken kontrol numunesinde ileriki yaşlarda daha fazla olmuştur.

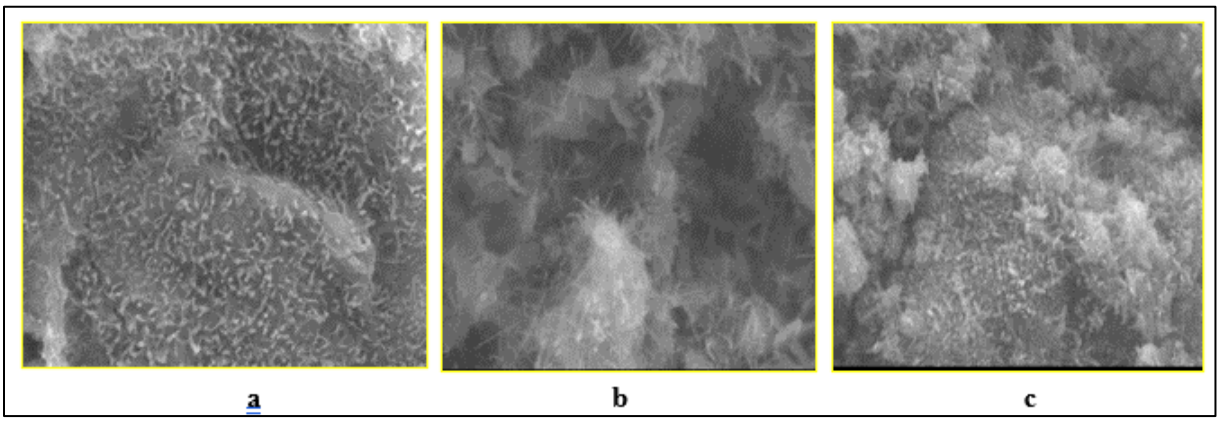


Şekil 4. (a) Basınç Dayanımı Değerleri (b) Basınç Dayanımı Değerleri İlişkisi (28-7 gün)

Priz hızlandırıcı katkılı numunelerin 1 günlük dayanımları incelendiğinde en yüksek dayanım değerinin A4 kodlu numuneden elde edildiği ve kontrol numunesine göre yaklaşık %9,28, AF8 kodlu numunenin ise %2,6 oranında bir artış meydana geldiği belirlenmiştir. 7 günlük dayanım değerleri incelendiğinde priz hızlandırıcı katkılı numunelerin kontrol numunelerine göre yaklaşık %1 ve %10 oranında azalma gösterdiği ve 28 günlük dayanım değerlerinde bu azalma miktarının olarak yaklaşık %22 oranına ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca basınç dayanımı 7 ve 28 günlük ilişki şekil 4'de verilmiş olup aralarında yüksek bir belirleyicilik katsayısı (R^2=0,9086) elde edilmiştir.

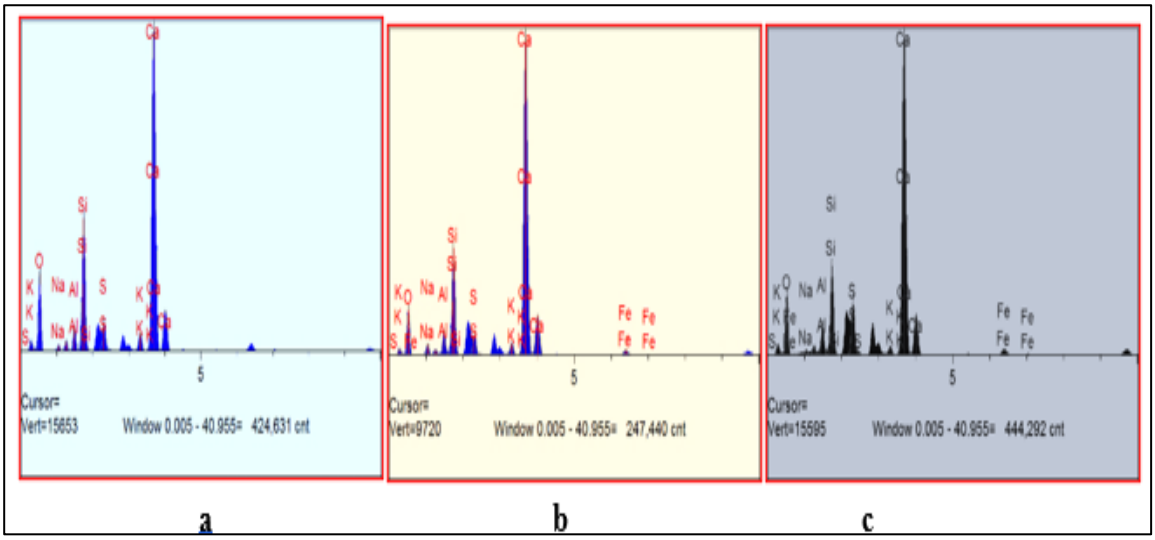
4.3. SEM ve EDX Analizleri

Çalışmada üretilen numunelerden optimum katkı oranına sahip (A4 ve AF8) ve kontrol numunelerine ait 1 günlük SEM görüntüleri Şekil 5'de gösterilmiştir. 1 günlük SEM görüntüleri incelendiğinde hidratasyon ürünleri, hidratasyon sürecindeki farklılıklar nedeniyle farklılık göstermiştir. SEM sonuçlarından, hızlandırıcı eklenmediğinde çimento parçacıklarının erken hidratasyon hızının yavaş olduğu, Şekil 5b'de hidratasyon oranı Şekil 5a ve 5c'ye göre daha yüksektir. İğnemsi AFt, 1 günlük hidratasyon yaşında çimento klinkerinin yüzeyine püsküllü bir birikim ve bağlanma şeklinde şekil 5b'de görülmektedir.



Şekil 5. (a) Kontrol (b) A4 (c) AF8'e ait SEM Görüntüleri

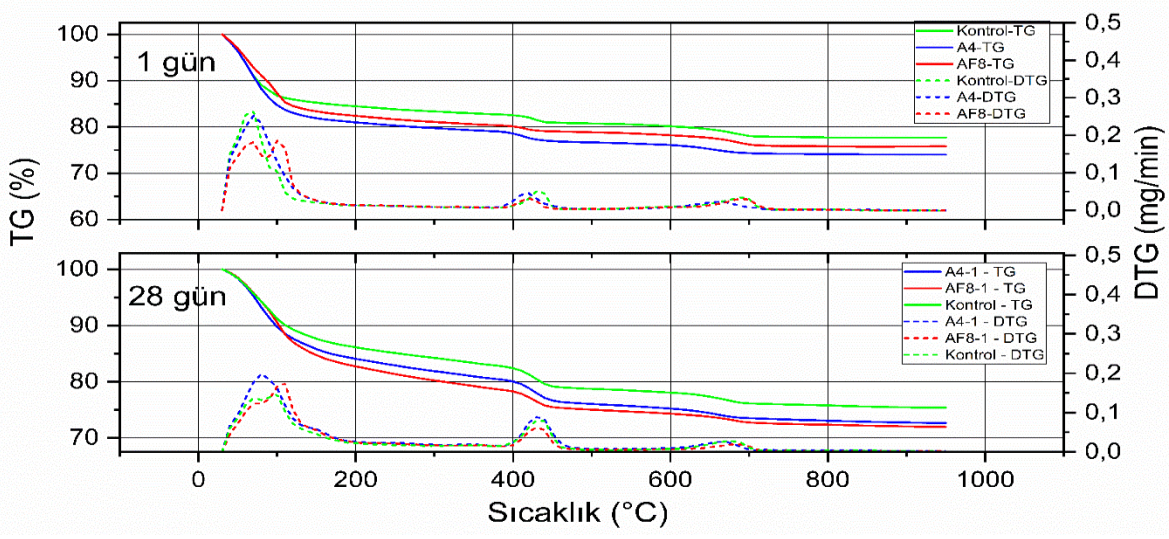
Kontrol, A4 ve AF8 numunelerine ait EDX analiz sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Bütün numunelerin EDX analizleri benzer bir dağılım göstermiş olup, bulunan elementler C, O, Al, Si ve Ca için sırasıyla yaklaşık %5,42- %6,34, %38,17-%42,82, %2,04-%3, %7,60-%10,31 ve %33,39- %40,12 olarak belirlenmiştir. Na, Mg, Ki Fe ve diğer elementler ağırlıkça %2.00 altında belirlenmiştir.



Şekil 6. (a) Kontrol (b) A4 (c) AF8 ait EDX Analizleri

4.4. TGA Analizi

TGA veya TG "termogravimetrik analiz" anlamına gelir ve malzemelerin sıcaklık değişimlerine yanıt olarak ağırlık kaybını ölçmek için kullanılan bir analiz yöntemidir. DTG (diferansiyel termal gravimetre), ise ağırlık kaybı hızı, sıcaklığın veya sürenin fonksiyonudur. Çimento bir birleşik karışımdır ve TGA analizi, çimentonun bileşenlerinin ayrışması ve ayrışma sıcaklıklarının belirlenmesi açısından önemlidir. Çimentonun TGA analizi, genellikle 2000C ile 1000^0C arasında bir sıcaklık aralığında gerçekleştirilir. Priz hızlandırıcı katkı maddesi içeren çimento hamurunun TGA analizi, normal çimentonun TGA analizinden farklılık gösterebilir. Ayrıca priz hızlandırıcı katkı maddesi içeren çimento hamurunun TGA analizi, çimento hamurunun sertleşme sürecindeki değişikler hakkında bilgi sağlayabilir. Üretilen püskürtme betonların TGA analiz değerleri Şekil 7 ve Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 7. Termografik Analiz Değerleri

Tablo 3. TGA Analiz Değerleri

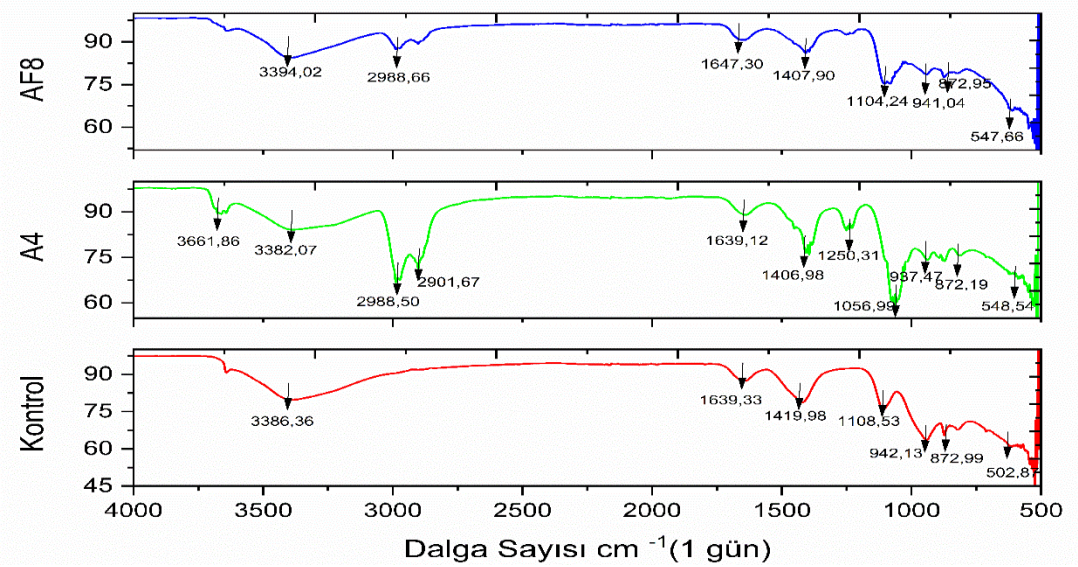
1 günlük	T_5	T_{10}	T_{50}	T_{MAX}	Artık kütle	Kütle kaybı
Kod	°C	°C	°C	°C	(%)	(%)
A-4	55,52	73,21	-	70,0	74,02	25,98
AF-8	59,75	87,02	-	100,0	75,76	24,24
Kontrol	55,60	74,42	-	70,0	77,68	22,32
28 günlük	T_5	T_{10}	T_{50}	T_{MAX}	Artık kütle	Kütle kaybı
A-4	71	98,08	-	80	72,63	27,37
AF-8	74,92	102,4	-	110	71,95	28,05
Kontrol	74,63	111	-	100	75,37	24,63

Tablo 3'de T_5, T_{10}, T_{50}, Tmax (yüzde kütle kayıplarının meydana geldiği sıcaklık değerleri), artık kütle ve kütle kaybı değerleri verilmiştir. TGA analiz değerlerinde 1 günlük sonuçlar incelendiğinde, alkali içeren priz hızlandırıcı katkının betonun erken yaşta prizlenmesini hızlandırdığını ve bunun sonucunda daha hızlı bir sertleşme süreci olduğunu göstermektedir. Ancak bu süreçte, alkali içeren katkının betonun kimyasal yapısını etkilediği ve toplam kütle kaybına neden olduğu da açıktır. 28 günlük TGA sonuçlarına göre, tüm numunelerin toplam kütle kaybı artmıştır. Bu sonuçlar, betonun 28 gün boyunca sürekli olarak sertleşmesi ve kurumasıyla ilişkilidir. Alkali içeren katkı ve alkali içermeyen katkı kullanılan numunelerde kontrol numunesine göre daha yüksek kütle kaybı olması, bu katkıların betonun kimyasal yapısını etkilediğini ve betonun özelliklerini değiştirdiğini göstermektedir. 1 günlük TGA sonuçlarında alkali içeren ve içermeyen katkılara sırasıyla kontrol numunesine göre %16,40 ve %8,60 oranında, 28 günlük numunelerde ise %11,2 ve %13,89 oranlarında daha fazla kütle kaybı meydana gelmiştir. Ayrıca, 28 günlük sonuçlarda alkali içeren katkı kullanan numunelerde kütle kaybı oranı alkali içermeyen katkı kullanan numunelerden daha düşük olduğundan, uzun vadede alkali içeren katkının betonun dayanıklılığına olumsuz bir etkisi olmayabilir.

4.5. FTIR Analizi

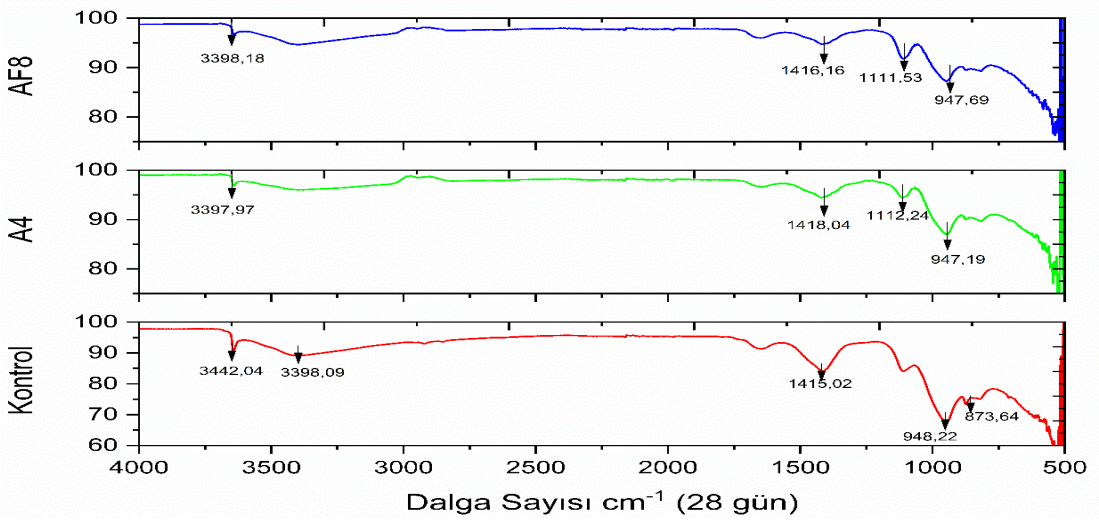
FT-IR spektroskopisinde 500-1600 cm^{-1} aralığında katı kafeslerini oluşturan atomların titreşimleri, 1600-3000 cm^{-1} aralığında ise moleküler titreşimler izlenmektedir (Şahin, & Koçak, 2022). Üretilen Kontrol, A4 ve AF8 numunelerine ait FTIR spektrumları Şekil 8 ve Şekil 9. 'da verilmiştir. Kontrol numunesinin (Portland çimentosu) FT-IR analizine göre 3442, 3386, 1415, 1639, 1419,1108, 948, 942, 872 ve 502 cm^{-1} dalga sayılarında titreşim piklerine sahip olduğu görülmektedir.

Buna göre 3442 ve 3386 cm^{-1} dalga sayıları aralığındaki belirgin bir pik vermediği ancak 3371 cm $^{-1}$ civarındaki geniş bantlar, O – H bağının esneyen titreşim modlarına atfedilmiştir (Silva, vd., 2002). Si-O bağları 875 cm^{-1} dalga sayısında titreşim piki şeklinde, Al-O bağları 538 cm^{-1} görülmektedir (Gomes, & Ferreira, 2005; Varas, vd., 2005).



Şekil 8. 1 Günlük Numunelerin FTIR Analiz sonuçları

FTIR spektrumları incelendiğinde 3661,86 cm^{-1} spektrumda Bassanit oluşumu görülmektedir (Mollah, vd., 2004). Portland çimentosunda orijinal olarak bulunan sülfatlar, alçıtaşı ($CaS0_4 \cdot 2H_20$), hemihidrat (bassanit, $CaSO_4 \cdot 0.5H_20$) ve anhidrittir ($CaS0_4$) (Dener, 2023). 1645 cm^{-1} görülen küçük titreşim bandı, H-OH bağlarının bükülme titreşim modlarına karşılık gelir (Mollah, vd., 2000). 1400–1500 cm^{-1} aralığındaki titreşimler CO_3 denk gelmektedir (Yu, vd., 1999; Bernal, vd., 2015). Si-O bağının en güçlü titreşimine atfedilen bant, FTIR spektrumunda gözlendi. 960 ile 980 cm^{-1} arasındaki dalga sayılarında ortaya çıkar. Ancak alüminosilikat kaynağına bağlı olarak daha yüksek dalga sayılarında (1050 cm^{-1}) oluşabilir. 1200 ile 950 cm^{-1} arasındaki bandın Si-O-Si veya Si-O-Al bağının asimetrik esneme titreşim modu ile ilişkili olduğu belirtilmiştir (Zhang, vd., 2002; Zhang, vd., 2020; Wang, vd., 2020)



Şekil 9. 28 Günlük Numunelerin FTIR Analiz Sonuçları

5. Sonuç

Priz hızlandırıcı katkıların püskürtme betonların priz süresi ve basınç dayanımı üzerindeki etkisinin incelendiği bu çalışma, ilerde yapılacak olan püskürtme beton çalışmalarına ışık tutacaktır. Yukarda yapılan incelemeler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Alkali içeren katkılarda %4'den yüksek, alkali içermeyen katkı türünde ise %8'den yüksek katkı kullanmak olasıdır. Alkali içeren katkı oranları göz ününe alındığında yüksek oranda katkı kullanımının ekonomik yönden uygun olmadığı görülmektedir. Bu bakımdan alkali içeren katkılarda %4 oranında priz hızlandırıcı katkı kullanmak optimum bir değer olarak belirlenmiştir. Ayrıca basınç dayanımı değerleri göz önüne alındığında %4^den daha fazla katkı kullanılan diğer gruplarda basınç dayanımı değerlerin azaldığı görülmektedir.
- Basınç dayanımı değerleri incelendiğinde en yüksek dayanımım değerinin A4 kodlu numuneden elde edildiği ve kontrol numunesine göre yaklaşık %9,28, AF8 kodlu numunenin ise %2,6 oranında bir artış meydana geldiği belirlenmiştir. 7 günlük dayanım değerleri incelendiğinde priz hızlandırıcı katkılı numunelerin kontrol numunelerine göre yaklaşık %1 ve %10 oranında azalma gösterdiği ve 28 günlük dayanım değerlerinde bu azalma miktarının olarak yaklaşık %22 oranına ulaştığı gözlemlenmiştir.

- 1 günlük SEM görüntüleri incelendiğinde hidratasyon ürünleri, hidratasyon sürecindeki farklılıklar nedeniyle farklılık göstermiştir. A4 kodlu numunenin hidratasyon oranı kontrol ve AF8 kodlu numuneye göre daha yüksektir. İğnemsi AFt, 1 günlük hidratasyon yaşında çimento klinkerinin yüzeyine püsküllü bir birikim ve bağlanma şeklinde A4 kodlu numunede görülmektedir.

- 1 günlük TGA sonuçlarında alkali içeren ve içermeyen katkılara sırasıyla kontrol numunesine göre %16,40 ve %8,60 oranında, 28 günlük numunelerde ise %11,2 ve %13,89 oranlarında daha fazla kütle kaybı meydana gelmiştir Beton karışımlarında kullanılan katkıların, betonun özelliklerini etkilediği ve uzun vadeli davranışını değiştirebileceği gösterilmiştir. Bu nedenle, beton karışımlarında katkı kullanılırken dikkatli olunmalı ve uzun vadeli beton davranışının anlaşılması için uzun süreli testler yapılmalıdır. Ayrıca farklı katkı türü ve farklı oranlarda katkı kullanılarak çalışmaların yapılması ile püskürtme betonların özelliklerinin saptanması sonraki yapılacak çalışmalara tavsiye edilebilir.

Referanslar

ACI Committe 506. (1966). Recommended Practice for Shotcrete, American Concrete Institute, Farmington Hills.

Aïtcin, P. C. (2016). Accelerators. In Science and technology of concrete admixtures (pp. 405-413). Woodhead Publishing.
ASTM C 597. (1979). Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete.Annual Book of ASTM Standards, Pennsylvania. USA.

Bernal, S. A., Rodríguez, E. D., Mejía de Gutiérrez, R., & Provis, J. L. (2015). Performance at high temperature of alkali-activated slag pastes produced with silica fume and rice husk ash based activators. *Materiales de construcción*, *65*(318).

Cengiz., O., Turanli. L. (2004). Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test. Cement and concrete research, 34(8), 1357-1364.

Çakıroğlu, M. A., & Terzi S. (2010). Püskürtme betonda yüzey hazırlığının önemi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 2(2), 85-92.

De Belie, N., Grosse, CU, Kurz, J., & Reinhardt, HW (2005). Püskürtme beton için farklı hızlandırıcı katkıların ve çimento türlerinin priz ve sertleşme davranışı üzerindeki etkisinin ultrasonla izlenmesi. Çimento ve Beton Araştırması, 35 (11), 2087-2094.

Dener, M. (2023). Effect of Ferrochrome Slag Substitution on High Temperature Resistance and Setting Time of Alkali-Activated Slag Mortars. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 1-11.

Dorn, T., Blask, O., & Stephan, D. (2022). Acceleration of cement hydration–A review of the working mechanisms, effects on setting time, and compressive strength development of accelerating admixtures. Construction and Building Materials, 323, 126554.
EFNARC, (1999). European Specification for Sprayed Concrete Guidelines, ISBN. 0952248360, p28.

Galan, I., Baldermann, A., Kusterle, W., Dietzel, M., & Mittermayr, F. (2019). Durability of shotcrete for underground support–Review and update. Construction and Building Materials, 202, 465-493.

Gomes, C., & Ferreira, O. P. (2005). Analyses of microstructural properties of VA/VeoVA copolymer modified cement pastes. Polímeros, 15, 193-198.

Hughes, TL, Methven, CM, Jones, TG, Pelham, SE, Fletcher, P., & Hall, C. (1995). Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi ile çimento bileşiminin belirlenmesi. Gelişmiş Çimento Esaslı Malzemeler, 2 (3), 91-104.

İnce, H. H., Çakıroğlu, M.A., İnce, G., & Öcal, C. (2018). Püskürtme beton üretiminde kullanılan katkı maddeleri, III. Uluslararası mesleki ve teknik bilimler kongresi, 3421- 3428, Gaziantep.

İnce, H. H., Öcal, C., İnce, G& Çakıroğlu, M.A. (2018). Püskürtme beton uygulama örnekleri, III. Uluslararası mesleki ve teknik bilimler kongresi, 3421- 3428, Gaziantep,

İnce, H., Öcal, C., Alkan Çakıroğlu, M. & Çelik, S. (2015). Püskürtme Beton Uygulamaları ve Kullanım Alanları. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,6(2),100-10.

Levent, Y., Kalmış, M., (2014). Püskürtme Beton Uygulamalarında Yaşanan Sorunlar ve Çözümleri, İksa Kurs Notları, İstanbul.

Maltese, C., Pistolesi, C., Bravo, A., Cella, F., Cerulli, T., & Salvioni, D. (2007). A case history: Effect of moisture on the setting behaviour of a Portland cement reacting with an alkali-free accelerator. Cement and Concrete Research, 37(6), 856-865.

Melbye, T., 2006, Sprayed Concrete for Rock Support. UGC International. Division of Degussa Construction Chemicals (Switzerland) Ltd. 11th Edition, Switzerland.

Mollah, M. Y. A., Yu, W., Schennach, R., & Cocke, D. L. (2000). A Fourier transform infrared spectroscopic investigation of the early hydration of Portland cement and the influence of sodium lignosulfonate. *Cement and concrete research*, *30*(2), 267-273.

Mollah, M. Y., Kesmez, M., & Cocke, D. L. (2004). An X-ray diffraction (XRD) and Fourier transform infrared spectroscopic (FT-IR) investigation of the long-term effect on the solidification/stabilization (S/S) of arsenic (V) in Portland cement type-V. Science of the total environment, 325(1-3), 255-262.

Neville A M, 2011. Properties of concrete, Pearson Education Limited, England.

Polat, H. & Özel, C. (2023). The Effects of Water/Cement Ratio and Cement Dosage Variables on the Performance of Shotcrete: Compressive Strength and Drying Shrinkage Perspektife. Türk Doğa ve Fen Dergisi, 12 (2), 82-87.

Rilem Report 10 (1995) "Application of Admixtures in Concrete "State of the art Report, T.C. 84 ACC.
Silva, D. A. D., Roman, H. R., & Gleize, P. J. P. (2002). Evidences of chemical interaction between EVA and hydrating Portland cement. Cement and concrete research, 32(9), 1383-1390.

Şahin, Y. İ., & Koçak, Y. (2022). Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimentoların Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 10(2), 802-814.

TS EN 12390-3. (2010). Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımını Tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara

Varas, M. J., De Buergo, M. A., & Fort, R. (2005). Natural cement as the precursor of Portland cement: Methodology for its identification. *Cement and Concrete Research*, *35*(11), 2055-2065.

Wang, J., Xie, Y., Zhong, X., & Li, L. (2020). Test and simulation of cement hydration degree for shotcrete with alkaline and alkali-free accelerators. Cement and Concrete Composites, 112, 103684.

Wang, J., Xie, Y., Zhong, X., & Li, L. (2020). Test and simulation of cement hydration degree for shotcrete with alkaline and alkali-free accelerators. Cement and Concrete Composites, 112, 103684.

Warner, J. (1995). Understanding Shotcrete--The Fundamentals. Concrete International, 17(5), 59-64.

Won, J. P., Hwang, U. J., Kim, C. K., & Lee, S. J. (2013). Mechanical performance of shotcrete made with a high-strength cement-based mineral accelerator. Construction and Building Materials, 49, 175-183.

Yang, R., He, T., Guan, M., Guo, X., Xu, Y., Xu, R. ve Da, Y. (2020). Püskürtme beton için alüminyum sülfat esaslı alkali içermeyen hızlandırıcı katkının hazırlanması ve hızlandırıcı mekanizması. İnşaat ve Yapı Malzemeleri, 234, 117334.

Yu, P., Kirkpatrick, R. J., Poe, B., McMillan, P. F., & Cong, X. (1999). Structure of calcium silicate hydrate (C-S-H): Near-, Mid-, and Far-infrared spectroscopy. *Journal of the American Ceramic Society*, *82*(3), 742-748.

Yun, K. K., Choi, S., Ha, T., Hossain, M. S., & Han, S. (2020). Comparison of long-term strength development of steel fiber shotcrete with cast concrete based on accelerator type. Materials, 13(24), 5599.

Zhang, G. Y., Lin, R. S., Wang, Y. S., & Wang, X. Y. (2022). Influence of K^+ and CO_3^{2-} in activator on high-temperature performance of alkali-activated slag-ceramic powder binary blends. Case Studies in Construction Materials, 17, e01306.

Zhang, G., Yang, H., Ju, C., & Yang, Y. (2020). Novel selection of environment-friendly cementitious materials for winter construction: Alkali-activated slag/Portland cement. Journal of cleaner production, 258, 120592.

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development
UMAGD, (2023) 15(3), s143-s152.
10.29137/umagd.1312191
Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:3 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue
Araştırma Makalesi / Research Article

Çelik Üretiminde Ortaya Çıkan Atık Demir Oksit'in Aventurin Sırlarında Yeniden Kullanımı

The Reuse of Spent Iron Oxide of Steelmaking into the Aventurine Glazes

Aslı Çakır Arianpour[1*], Farzin Arianpour [1,2]

[1]*Kastamonu Üniversitesi, Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Seramik ve Cam Bölümü, 37100, Kastamonu, TÜRKİYE*
[2]*Kastamonu Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı, 37100, Kastamonu, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 10/06/2023* ***Kabul / Accepted**: 22/09/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Öz
Endüstriyel atık malzemelerin seramik ürünlerde geri dönüştürülmesi/yeniden kullanılması, ekonomik ve çevresel etkileri nedeniyle son yıllarda trend olan bir araştırma konusu olmuştur. Metalurjik yan ürünler, seramik ve cam endüstrisinde araştırılan yaygın atık malzemelerdendir. Bu araştırmada, demir çelik üretimi sırasında ortaya çıkan atık demir oksit tozu seçilmiş ve aventurin sırlarda alternatif bir hammadde olarak araştırılmıştır. Seçilen atık demir oksit malzemesi, metal parçaları ve büyük aglomeraları temizlemek ve homojen bir toz elde etmek için başlangıç olarak fiziksel işlemlerden geçirilmiştir. Elde edilen ADO tozu daha sonra XRF, XRD ve DTA/TG teknikleriyle karakterize edilerek kimyasal bileşimi, kristal fazları ve termal davranışı araştırılmıştır. ADO tozunun karakterizasyonu sonucunda %95'ten fazla Fe_2O_3 ve ana fazının hematit fazı olduğu tespit edilmiştir. İkinci adımda, ADO'nun aventurine sırlarda etkisini tespit etmek için sır reçetelerine ağırlıkça %10-30 eklenerek üretilen sırların fiziksel, faz ve mikroyapısal özellikleri araştırılmıştır. Sırlar yaş öğütme ile hazırlandıktan sonra 980ºC'de bisküvi pişirimi gerçekleştirilmiş seramik plakaların yüzeylerine akıtma yöntemiyle uygulanmış ve. 1100 ºC'de 30 dak sinterlenmiştir. Yüzeylerin görsel olarak incelenmesi sonucunda, üretilen aventurin sırların homojen oluşum sergilediği, çatlaklar veya reaksiyona girmemiş bölgeler gibi sır hataların olmadığı görülmüştür. Üretilen aventurin sırlarında anortit, lityum alüminyum silikat, kuvars, kristobalit, lityum demir çinko oksit, lityum demir oksit, hematit kristallerinin olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler
"Aventurin, seramik sır, demir oksit, atıkların yeniden kullanımı, karakterizasyon"

Abstract
Recycling/reusing industrial waste materials in ceramic products has been a trending research topic in recent decades due to its economic and environmental impacts. The metallurgical by-products are common waste materials that are investigated in the production of ceramics, glasses, and glazes. In this research, a spent iron oxide powder obtained from iron and steel production is selected and investigated as an alternative material for forming aventurine glazes. The selected waste iron oxide material ADO was previously physically processed to remove metal pieces and large agglomerate to obtain a uniform homogenous powder. The ADO powder was then characterized by XRF, XRD, and DTA/TG techniques to investigate the chemical composition, phase structure, and thermal behavior. The characterization of ADO powder revealed that it contains more than 95 wt% Fe_2O_3 with a significant constitutional phase of hematite. In the second step, the effect of ADO was investigated on the physical, phase, and microstructural properties of aventurine glazes by adding 10-30 wt% in the recipes. The glazes were prepared by wet milling and applied on the surfaces of 980ºC pre-fired ceramic plates. And then fired at 1100 ºC for 30 min. As a result of the visual examination of the surfaces, it was observed that the produced aventurine glazes exhibited a homogeneous formation and there were no glaze defects such as cracks or unreacted areas. Anorthite, lithium aluminum silicate, quartz, cristobalite, lithium iron zinc oxide, lithium iron oxide and hematite crystals were found in the produced aventurine glazes.

Key Words
"Aventurine, ceramic glaze, iron oxide, waste reusing, characterization"

***Sorumlu Yazar: acakir@kastamonu.edu.tr**

1. Giriş

Aventurin sırlarının adı, parıltılı bir etki veren çok ince kalıntılara sahip bir kuvars formu olan doğal mineral aventurinden gelir. Bu dekoratif sırlar, kullanılan oksitlerin (krom, demir, vb.) doğasına bağlı olarak farklı renklere (yeşil, turuncu, kahverengi, ve sarı) sahiptir. Bu grubun ana temsilcisi demir-aventurini sırlardır ve camsı matris içinde dağılmış ince hematit (α-Fe_2O_3) kristallerinden oluşur (Dvornichenko ve Matsenko, 2000).

Aventurin sırlarında demir oksit içeriği % 10-30 arasında değişmekte ve renkleri demir oksit içeriğine bağlı olarak açık ile koyu kırmızımsı kahverengi arasında değişmektedir. Aventurin sırların dekoratif etkisi, sır tabakasının içinde ortaya çıkan ve güçlü bir parlaklık kazandıran altıgen hematit kristallerinin oranı ve büyüklüğünden etkilenir (Gozalbo ve diğerleri, 2006).

Aventürin sırlardaki hematit kristalleşmesi, ergime sırasında aşırı doygun Fe^{+3} katyonlarının, soğuma sırasında hematit kristallerine ayrılmasıyla oluşur (Gozalbo ve diğerleri, 2006). Hematit kristallerinin oluşum mekanizması, camsı matrisin α-Fe_2O_3 ile doygunluğuna dayanır ve eriyiğin oksit bileşiminden (cam oluşturan oksitler ve bazik oksitler arasındaki oran) ve özellikle hematit oranını ve gelişen kristallerin büyüklüğünü belirleyen eriğin viskozitesinden etkilenir (Lazău, Borcănescu, Păcurariu ve Vancea, 2013).

Bu kristalleşme mekanizması, eriyikteki oksit bileşiminden (asidik oksitler ve bazik oksitler arasındaki oran) ve özellikle hematit oranını ve gelişen kristallerin boyutunu belirleyen eriyik viskozitesinden kuvvetli bir şekilde etkilenir (Gozalbo ve diğerleri, 2006). Bu sırları elde etmek için kullanılan termal döngü genellikle iki aşamadan oluşur: ilk aşama metalik oksidin eriyik içinde çözünmesi, bunu takiben ikinci aşama ise laminar kristallerin oluşmasına izin veren yavaş kontrollü soğutma veya kristalin büyüme hızının yüksek olduğu daha düşük bir sıcaklıkta belirli bir bekleme süresidir (Gozalbo ve diğerleri, 2006).

Pişirme rejiminde, sır erime sıcaklığından gerekli sıcaklık seviyelerine yavaşça soğutulur. Kristaller kontrollü çekirdeklenme ve büyüme süreçleri sırasında üretilir. Sırın soğutma sırasında uygulanan ısıl işlem, hematitin kristalleşme derecesini (kristallerin şekli ve boyutu) ve dolayısıyla elde edilen sırın dekoratif etkisini güçlü bir şekilde etkiler (Păcurariu, Lazău ve Lazău, 2011).

Ülkemizde hızlı bir gelişim gösteren seramik sektörü gerek yerel gerekse yurt dışından pek çok hammadde kullanılmaktadır. Saflığı yüksek hammaddelerin her geçen gün rezervlerinin azalıyor olması alternatif malzeme arayışlarını da beraberinde getirmektedir. Ayrıca yaşanılan çevrenin korunması hususnda gelişen bilincinde etkisiyle artık çeşitli endüstri dallarının atık malzeme olarak adlandırılan yan ürünlerinin değerlendirme imkânlarının araştırılması zorunluluğu da ortaya çıkmaktadır (Karasu, Çaki ve Yeşılbaş, 2000).

Gün geçtikçe daralan rezervler nedeniyle seramik endüstrisinde yüksek kaliteli hammaddelerin temini ve dolayısıyla kullanımı giderek zorlaşmaktadır veya kalitesiz hammaddeler kullanılmaktadır. Kalitesiz hammadde kullanımı yerine, üretim sonucunda elde edilen atık malzemeleri ya da diğer endüstri kollarından gelen ikincil hammadde olarak adlandırılan hammaddelerin yeniden kullanılabileceği yeni yöntemlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar durmadan artmaktadır (Kaya ve Turan, 2004).

Seramik sırlarında kullanılan hammaddeler yüksek maliyetli teknolojik işlemlerden geçirilerek hazırlanmakta ve genel olarak ithal edilmektedir. Değişen dünya, devleşen sanayileşmenin getirdiği çevre kirliliği, bunlarla birlikte hammadde kaynaklarının azalmasının getirdiği pahalılık pek çok araştırmacıyı farklı arayışlara sevk etmektedir (Kılınç Mirdalı ve İşler, 2008; Tığlı Boya, Zennur. & Arıanpour, 2023).

Çevresel sorunlar ve doğal kaynakların sınırlı olduğundan dolayı atık değerlendirme çalışmaları son on yılda artan ivme kazanmıştır. Bir atığın değerli hammaddeye dönüşümü, arkasındaki "yeşil" kavramının yanı sıra, potansiyel bir ekonomik kazancı da içerir. Şirketler, çoğu durumda, atık bertarafı ile ilgili önemli maliyetlere sahiptir fakat bu atık bir kaynağa dönüştüğü zaman gelire dönüştürülebilir. Depolama alanlarında toplanan atıkların uygulama ya da planlanan yasak ile birlikte depolama ücretlerinin artan değerleri, atık yönetiminin Avrupa'da meydana geldiği acil sorunların göstergesidir (Tuna, Celebi ve Guldas, 2018).

Metal endüstrisinde, büyük ölçüde atık üretimi gerçekleşir. Bu nedenle, bu endüstri kolu, atık malzemelerin diğer süreçlerdeki uygulamalar için kullanılmasını araştıran, atık değerlendirilmesine olanak sağlayan ve değer katan araştırmalara artan bir destek göstermektedir (Prim, Folgueras, de Lima ve Hotza, 2011).

Demir çelik sektörü ülkemizde her geçen yıl üretim hacmini artırmaktadır. Gelişmiş ülkelerde kişi başına demir çelik tüketimi 400-500 kg civarında iken bu rakam Türkiye'de 2015 yılı sonu itibariyle 437 kg düzeyindedir. Türkiye'de 2011 yılında 2010 yılına göre %17 oranında bir artış ile 34,1 milyon ton ham çelik üretimi yapılmış ve bu üretim miktarı ile Türkiye çelik üretiminde dünyadaki ilk 10 ülke içerisinde yer almıştır. Bu durum Türkiye'de demir çelik sektörünün ne denli büyük olduğunu, üretilen demir çelik hacmine paralel olarak artacak olan demir çelik sektörü üretim atıklarının da habercisidir.(Tuna ve diğerleri, 2018). Bu değerler, çevresel ve ekonomik sorun teşkil eden bir malzemenin gelecek için değerli bir varlığa dönüştürülmesi ihtiyacına aciliyet duygusu verir.

Literatürde, endüstriyel atıkların renklendirici madde üretimi örneklerine rastlanmaktadır. Örneğin, çelik atığı, deri çamuru, Al anotlama, Cr / Ni kaplama ve mermer testeresi tozu gibi endüstriyel uygulamalardan çıkan atıkların, işlenmesi ve depolanması gereken yüksek miktarda atık açığa çıkar (Carneiro, Tobaldi, ve diğerleri, 2018). Geleneksel olarak, bu tür atık ürünler toprak düzenleyiciler olarak veya toprak dolgu olarak bertaraf edilir. Ayrıca alüminyum üretiminde kullanılan kırmızı çamurda çeşitli uygulamalarda renklendirici madde olarak kullanılmıştır: seramik sırlar, ağır kil seramikler ve cam seramikler gibi (Carneiro, Capela, ve diğerleri, 2018). Literatürde yapılan çalışmalara göre aventurin sırlarında yüksek B_2O_3 içeriği ve düşük Al_2O_3, MgO ve CaO içeriği kullanıldığında iyi sonuçlar verdiği rapor edilmiştir. Aynı zamanda, eriyik viskozitesini düşürmek ve böylece kristalleşme sürecini arttırmak için Na_2O, kısmen Li_2O ile değiştirilir (Păcurariu ve diğerleri, 2011). Na_2O ve K_2O eklenmesi sır viskozitesini azaltır ve kristal oluşumunu kolaylaştırır (Silakate, Wannagon ve Nuntiya, 2015). Literatürde yapılan çalışmalarda Fe_2O_3 oranının 0,15-0,30 mol arasında bulunduğu durumda 1000-1200 °C'de demir aventurin oluşumu gözlenmeye başlanmıştır. Silikate ve ark. (Silakate ve diğerleri, 2015), Li_2O ve ZnO sistem düşük sıcaklık seramik sırında Fe_2O_3 içeriğinin bir sonucu olarak lityum çinko ferrit ($LiZnFe_2O_4$) anortit ($CaAl_2Si_2O_8$) ve hematitin (α-Fe_2O_3) kristallenme mekanizmasını ve özelliklerini incelemişlerdir. $LiZnFe_2O_4$, anortit ve hematit oluşumlarının sırdaki Fe_2O_3 içeriğine bağlı olduğu bildirilmiştir. Wannagon ve ark. (Wannagon, Prasanphan ve Sanguanpak, 2013), da Li_2O ve ZnO içeren seramik sırını 1100 ºC'da hazırlamışlar, ağırlıkça % 0-30 demir oksit içeriğinin 980-1080 ºC'de bekletilme sonucu kristallenmeyle metal ışıltılı kahverengin geliştiğini bildirmişlerdir. En iyi metal ışıltılı etkiye ağırlıkça % 10 demir oksit içeren sırın lityum çinko ferrit fazıyla ulaşılmıştır.

Bu çalışmada atık demir oksit (ADO) ticari demir oksit alternatif olarak aventurin seramik sırlarında kullanılabilirliği araştırılımıştır. Bu amaç kapsamında aventurine sır kompozisyonunda bulunan Fe_2O_3 yerine aynı oranlarda, atık demir oksit (ADO) ilave edilerek sırların mineralojik özellikleri üzerine olan etkileri tespit edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu araştırmada atık demir oksit Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş.'den (Zonguldak, Türkiye) temin edilmiştir. Temin edilen atık malzeme, kırmızımsı-kahverengimsi tozlar ve sert aglomeraların karışımından oluşmaktadır. Fiziksel gözlem sonucunda, karışımın büyük miktarda metalik demir, taşlar ve çöpler içerdiğini görülmüştür. Bu safsızlıkların büyük olasılıkla proses depolama sahasından geldiği düşünülmektedir. Sır üretimi için homojen bir toz elde etmek için, alınan karışım havanda hafif öğütülmüş ve büyük parçaları çıkarmak 250 µm elekten elenmiştir. Elde edilen karışım daha sonra 1:1 oranında saf su ile karıştırılmış ve homojen bir çamur hazırlamak için mekanik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Daha sonra kalan küçük metal parçaların ve çöpleri çıkarmak için 90 µm'lik bir elekten geçirilmiştir. Suyu uzaklaştırmak için etüvde 80°C'de bir gece boyunca kurutulmuştur. Kurutulmuş aglomeratlar daha sonra hafifçe öğütülmüş ve son olarak analizler ve aventurin sırlarında kullanılmak üzere 63 µm elekten geçirilmiştir. Demir oksit normalde çelik yapım prosesinin yan ürünlerinde ince bir toz olarak göründüğünden, bu teknik ile temin edilen çelik imalat atıklarından Fe_2O_3 açısından zengin bir toza ulaşılmasına yardımcı olmaktadır. Şekil 1, çelik yapımı yan ürünlerinden nihai olarak hazırlanmış atık demir oksit tozunu (ADO) göstermektedir. Standart sır bileşiminde hammamadde olarak potasyum feldspat, kuvars, kaolen, üleksit, ZnO ve Li_2CO_3 kullanılmıştır. Potasyum feldispat, kuvars ve kaolen Eczacıbaşı Yapı Ürünleri Grubu (Bilecik, Türkiye), ZnO ve Li_2CO_3 Gizem Frit - Gizem Seramik Frit ve Glazür San. ve Tic. A.Ş'den (Sakarya, Türkiye), üleksit ve Fe_2O_3 Kalaçlar Endüstri Malzemeleri A.Ş'den (Ankara, Türkiye) temin edilmiştir. Kullanılan ticari/endüstriyel seramik sır hammaddelerin kimyasal analizleri Tablo 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Hazırlanan atık demir oksit tozu.

Tablo 1. Aventürin sırlar hazırlarken kullanılan hammaddelerin kimyasal analizi (% ağ).

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	B_2O_3	ZnO	Li_2O	A.Z.
K-Feldispat	67,51	17,67	0,127	0,026	0,18	0,05	3,21	10,91	-	-	-	0,31

Kaolen	47,69	36,81	0,912	0,069	0,03	0,26	0,01	2,3	-	-	-	11,88
Kuvars	92,33	4,49	0,247	0,058	0,05	0,01	0,07	1,59	-	-	-	1,12
Üleksit	4,21	0,05	1,24	-	23,46	2,55	9,67	-	33,53	-	-	-
ZnO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99,2	-	-
Li_2CO_3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	60

Hazırlanan ana reçetenin seger formülü Tablo 2'de sunulmuştur. Fe_2O_3 kaynağı olarak ana reçeteye % 15, 20, 25 ve 30 oranlarında ticari Fe_2O_3 ve ADO ilave edilmiştir. Atık demir oksit tozu kullanılan aventurin sırlar A15, A20, A25, A30, ticari Fe_2O_3 F ve bundan hazırlanan aventurin sırlar A15F, A20F, A25F, A30F olarak kodlanmıştır. Her sır reçetesi için Tablo 1'de verilen ve ilave edilen F ve ADO için 500 gr olarak hassas biçimde tartılan hammaddeler jet değirmenlerde başlangıç malzemelerinin ağırlıkça % 50 su ve ağırlıkça % 0.3 sodyum tripolifosfat (STTP) ile 30 dakika boyunca 300 rpm/dak hızla öğütülmüştür. Öğütme sonrası 90 µm elekten geçirildikten sonra litre ağırlığı 1,4 gr/cm^3 ayarlanmıştır. Hazırlanan sırlar bisküvi pişirimi yapılmış stoneware bünyeler üzerine (10*10 cm) akıtma yöntemiyle uygulanmıştır. Sırlanan numuneler 24 saat 110 ºC etüvde kurutulmuştur. Sırlı örnekler 1100 °C'de 30 dakika bekleme ile oksidasyon atmosferinde pişirilmiştir. Isıtma işlemi 5 ºC/dak gerçekleştirilmiş ve soğutma işlemi 1 ºC/dak ile 1020 ºC'ye kadar gerçekleştirilerek burada 3 saat beklenmiştir. Oda sıcaklığına 10 ºC/dak ile soğuma gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Aventurin sır için seçilen başlangıç seger formülü.

Mol	Oksit	Mol	Oksit	Mol	Oksit
0,11	Na_2O	0,07	Al_2O_3	0,69	SiO_2
0,02	K_2O			0,55	B_2O_3
0,13	Li_2O				
0,13	MgO				
0,49	CaO				
0,12	ZnO				

Atık demir oksit tozuna (ADO) ait numune oda sıcaklığından 1100 ºC'ye 10 ºC/dak.'lık ısıtma hızı ile hava atmosferinde difransiyel termal analizi (DTA) ve termo-gravimetrik analizi (TG) (STA 449-F3, Netzsch, Germany) gerçekleştirilmiştir. ADO toz numune ve sinterleme sonrası sırlardaki atık miktarına bağlı olarak oluşan kristal fazlar, Cu-Kα radyasyonu (λ= 1,5406 Ao) kullanılarak X-ışını difraksiyon analizi (XRD D8 Advance diffractometer, Bruker, USA) ile tanımlanmış. XRD desenleri oda sıcaklığında, 10-70°, 2θ aralığın da 2° büyüklüğü ile kaydedilmiştir. Üretilen aventurin sırlarda oluşan kristaller optik mikroskop (OLYMPUS BX 51) ile görüntülenmiştir. Hammaddelerin kimyasal analizleri X-ışını floresans spektometresi (XRF Xepos III Spectro, Germany) kullanılarak belirlenmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Atık Demir Oksit (ADO) Karakterizasyonu

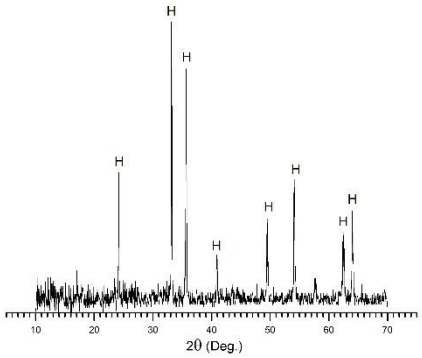
Tablo 3'de ADO'ya yapılan XRF kimyasal analiz sonucu verilmiştir. Tablo 3'de ADO'ya yapılan XRF kimyasal analiz sonucu verilmiştir. ADO tozunun XRF ile karakterizasyonu sonucunda ağırlıkça %95'ten fazla Fe_2O_3 içerdiği ve hematit bazlı uygulamalar için hammadde olarak kullanılabilecektir. Ana safsızlık, seramik sır uygulaması için zararlı olmayan SiO_2 (ağırlıkça <%1,5) olarak tespit edilmiştir. SiO_2 genellikle çelik yapım sürecinden başlatılır ve atık demir oksidin bileşiminde farklı silikat fazları olarak görülebilir. ADO'nun diğer safsızlıkları depolama ortamından kaynaklandığı düşünülen carbonat ve sülfatlardan gelen CaO ve Na_2O'dur (ağırlıkça %0.8 ve 0.84). ADO'nun manganez ve alüminyum oksit içeriği esas olarak çelik yapım sürecinden gelmektedir. ADO için ölçülen ateş zaiyatı değeri, 1050 ºC'ye kadar ısıtmada ağırlıkça %0,4'tür.

Atık Demir Oksit (ADO)'nın XRD analizi Şekil 2'de görülmektedir. Yapılan analiz sonucunda ADO'da ana fazın, kırımızı demir (III) oksit (hematit, Fe_2O_3, ICDD, 73-0603) olduğu tespit edilmiştir. Yüksek Fe_2O_3 içeriği nedeniyle (>%95 ağ.), hematitin çelik imalat endüstrisinin atık demir oksit ürünlerinden hazırlanan ADO tozunun ana yapısını oluşturduğu düşünülmektedir. Çelik endüstrisi için ana demir kaynağı FeO veya Fe_3O_4 yerine hematit minerali olarak bilinen Fe_2O_3'tür (Demir(III) oksit veya ferrik oksit). Fe_2O_3'ün çeşitli polimorfları mevcuttur. Başlıcası α-Fe_2O_3 olan, β-Fe_2O_3, γ-Fe_2O_3, δ-Fe_2O_3 polimorfları bulunmaktadır. α-Fe_2O_3 rhombohedral, korundum (α-Al_2O_3) yapısına sahip ve en yaygın şeklidir. Demir ve çeliğin yüksek sıcaklıkta üretilmesi nedeniyle atık demir oksit tozunun ana fazının α-Fe_2O_3 olması beklenmektedir. Yapılan XRD analizi ile de bu sonuç doğrulanmıştır. ADO'da silikat, sülfat veya demir, sodyum veya kalsiyum karbonat gibi safsızlıkların varlığı da mümkündür. Bununla beraber, düşük miktarları (ağırlıkça <%3) bu fazların düşük pik şiddetleri nedeniyle ADO'nun XRD analizinde tespit edilememiştir. XRD sonuçlarının görüldüğü gibi, ADO ürününün mineral bileşiminde metalik demir fazının önemli pikleri yoktur. ADO tozunun hazırlanması için uygulanan fiziksel işlemlerin, genellikle çelik yapım yan ürünlerinden oluşan serbest metalik demir içeriğinin çoğunu çıkarmakta başarılı olduğunu ortaya çıkarmıştır.

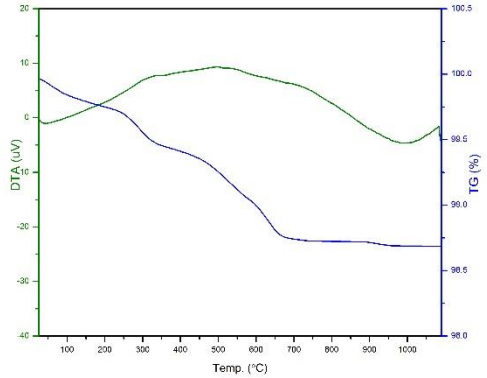
Atık demir oksit (ADO) yapılan termal analizi (TG/DTA) Şekil 3'de görülmektedir. TG eğrisi incelendiğinde 1100 ºC'ye kadar ağırlık kaybının toplamda % 1.5 olduğu tespit edilmiştir. 400 °C'den önceki kütle kayıpları, nemin ortamdan uzaklaştırılması ve bazı organik maddelerin yanmasından kaynaklanmaktadır. 400-650 °C arasındaki kütle kayıpları, sülfat veya karbonatların ayrışmasından kaynaklandığı belirlenmiştir. Fe_2O_3 fazları arasında, α-Fe_2O_3 fazı termodinamik açıdan en kararlı fazdır ve 1000 °C'ye kadar kararlıdır (Ovčačíková, Vlček, Klárová ve Topinková, 2017). Demir oksitler arasında Fe_2O_3, düşük maliyeti, sentez kolaylığı ve çevre dostu davranışı nedeniyle son on yılda kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bu, farklı uygulamalarda kullanılmak üzere yüksek saflıkta Fe_2O_3 elde etmek için atık demir oksit ve çelik yapım yan ürünlerinin işlenmesi için ana potensiyel faktörü oluşturmaktadır.

Tablo 3. Atık demir oksit (ADO)'nın XRF kimyasal analizi (%ağ).

Oksitler	**%**
Fe_2O_3	95.68
SiO_2	1,37
Na_2O	0.84
CaO	0.8
MnO	0.42
Al_2O_3	0.41
MgO	0.08
A.Z.	0,40
Toplam	100



Şekil 2. Atık demir oksit (ADO)'nın XRD analizi (H: Hematit).

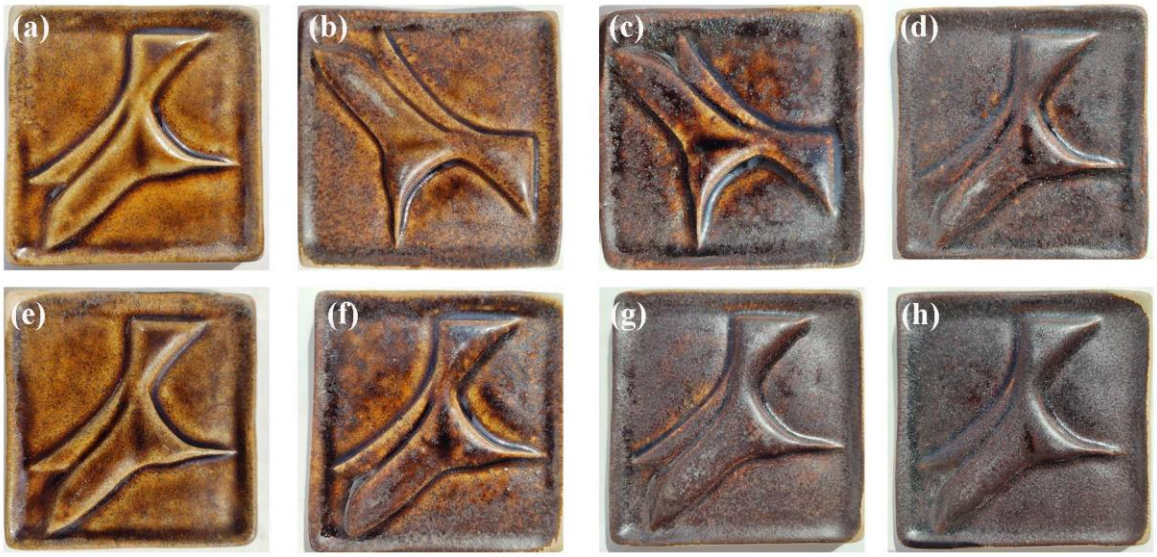


Şekil 3. Atık demir oksit (ADO)'nın termal analiz (TG-DTA) sonucu.

3.2. Üretilen Sırların Karakterizasyonu

Demir atığı ve Fe_2O_3 ile hazırlanan aventurin sırların temsili fotografları Şekil 4'de görülmektedir. Her iki sır çeşidinde de demir oksit içeriğindeki artışla beraber kahverengimsi ve koyu kahverengi renk oluşmuştur. Hazırlanan aventurin sırların görsel olarak incelenmesi sonucunda, pürüzsüz yüzeylerin oluştuğu tespit edilmiştir. Pişmiş sırlar veya seramik bünyeler üzerinde herhangi bir sır/bünye hatasına rastlanmamıştır. Genellikle iğne deliği, pullanma, çatlama gibi farklı sır hataları meydana gelmektedir. yüksek oranda atık madde ilavesi ile sırların yüzeylerinde reaksiyona girmemiş/erimemiş bölgeler oluşur. Bu tür hataların oluşmasındaki ana sebep, yüksek refrakterlik veya uygun olmayan tane şekli veya tane boyutu dağılımlarıdır. % 25 atık demir oksit tozu ilavesi gibi yüksek oranlarda bile aventurin sırlarının yüzey özellikleri üzerinde önemli bir yan etkisinin olmadığını ortaya koymaktadır. Demir oksit içeriği ağırlıkça % 15 (A15 ve A15F) olduğunda sırda küçük bir kristalin etki vardı. Demir oksit içeriği ağırlıkça % 20 ve 25 olduğunda (A20, A20F,

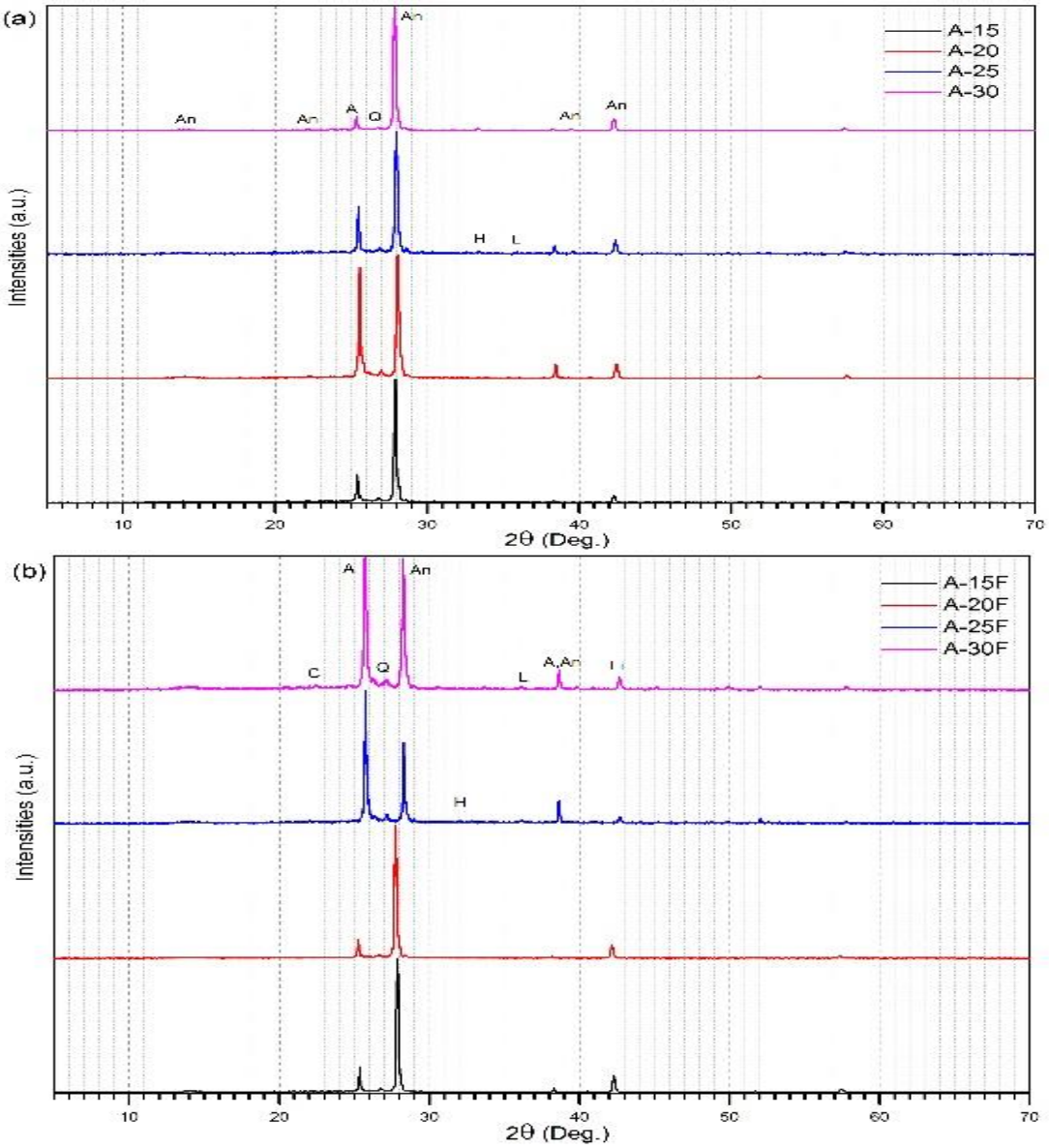
A25, ve A25F) göze çarpan bir metalik etki ile artmıştır. Bununla birlikte, demir oksit içeriği ağırlıkça % 30 olduğunda bu etki azalmıştır (A30 ve A30F). % 30 Fe_2O_3 ve ADO içerikli sırlarda aventurin etki gözlensede matlaşmanın yüksek olduğu görülmektedir. Bu yüzden bu miktarın yüksek olduğu düşünülmektedir. Şekil 4'de, koyu kahverengi ve pürüzsüz sır yüzeyi üzerinde metalik kraterler gösteren, % 25 Fe_2O_3 tozu ve atık demir oksit (ADO) sırlarının dokularını göstermektedir. Her iki sırda da kristal kümeleri çok düzgün dağılmadığı görülmektedir. Fakat % 20 ticari Fe_2O_3 içeren sırda demir kristallerinin değirmen ölçeğinden elde edilen demir kümelerine kıyasla daha küçük ve daha düzenli olduğu tespit edilmiştir. Dokudaki bu farklılıklar muhtemelen iki malzemenin tane boyutu büyüklüğünden kaynaklanmaktadır. Kimyasal bileşimleri çok benzer olmasına rağmen, ticari bir Fe_2O_3 pigment tozu başlangıçta demir sülfat veya hidroksitin termal ayrışmasından sonra ince öğütülmüş veya demir tuzlarının çökelmesinden üretilir ve bunun sonucunda atık Fe_2O_3 ile karşılaştırdığımızda daha ince taneli Fe_2O_3 tozu oluşur (Tawwuttanakidkul, Phermpoonboon, Jiemsirilers, Buggakupta ve Tianthong, 2018).



Şekil 4. Üretilen aventurin sırların yüzey fotoğrafları: **(a)** A15; **(b)** A20; **(c)** A25; **(d)** A30; **(e)** A15F; **(f)** A20F; **(g)** A25F; ve **(h)** A30F.

Sırların yüzeylerinden yapılan XRD analiz sonuçları Şekil 5'de görülmektedir. XRD karakterizasyonu esas olarak, sinterleme işlemi sırasında sırdaki kristal fazın türünü ve içeriğini belirlemek için kullanılır. Daha önce belirtildiği gibi, ADO'nun analizinde belirtildiği gibi ana faz hematit fazıdır (Şekil 2). Şekil 5'de, 1100 °C'de ısıl işlemden sonra ağırlıkça % 15-25 Fe_2O_3 ve ADO X-ışını kırınımı analizlerine göre ana fazın anortit ve lityum alüminyum silikat olduğu görülmektedir. Demir oksit içeriği ağırlıkça % 20'den (A25F ve A30F) fazla olduğunda ise lityum çinko ferrit ($Li_xZn_{1-2x}Fe_{2+x}O_4$, x=0.05-0.20) fazının görüldüğü tespit edilmiştir.

ADO kullanılan aventurin A25 ve A30 kodlu sırlarda hematit kristallerinin varlığı tespit edilmiştir. Ticari Fe_2O_3 kullanılan A30F kodlu aventurin sırda hematit kristali görülmüş diğer aventurin sırlarda tespit edilmemiştir. Yüksek oranda demir oksit içeren sırlarda, franklinitin kristalleştirilmesinden sonra, hematit veya lityum çinko ferrit içinde bir miktar aşırı Fe^{3+} bulunduğu ve sıcaklık arttığında Fe_2O_3 eriyikte kısmen çözünebildiği belirtilmiştir. 1040 ºC'de ortaya çıkan, aşırı doymuş Fe^{3+} iyonundan hematitin kristalleşmesine yol açtığı düşünülmektedir. Bununla birlikte, demir oksit içeriği çok yüksek olmamalıdır, çünkü sıcaklık arttığında fazlalık hematit olarak kristalleşebilir veya sır içinde çözülebilir. Sonrasında, anortitin kristalleşmesini hızlandırır, ancak lityum çinko ferrit oluşumunu engeller. Literatürde Li_2O içeren sırların farklı kristalleşme davranışları olduğu belirtilmiştir. Li_2O güçlü ergitici olduğundan ve sır içindeki Fe_2O_3'ün oksidasyon aşamalarındaki davranışını etkiliyebilmektedir. Az miktarda Li_2O ilavesi β-kuvars katı çözelti içinde çökmesi ile kristalleşme yolunu değiştirir ve düşük sıcaklıkta willemit kritalleri oluşumu (800-900 ºC) gerçekleştirir. Li_2O ile katkılama, Fe_2O_3-ZnO katı-katı etkileşiminde franklinit oluşumu gerçekleşir (Wannagon ve diğerleri, 2013). Ancak, Li_2O ve ZnO içeren sırlara Fe_2O_3 eklendiğinde hangi fazların oluşacağı hala net değildir.

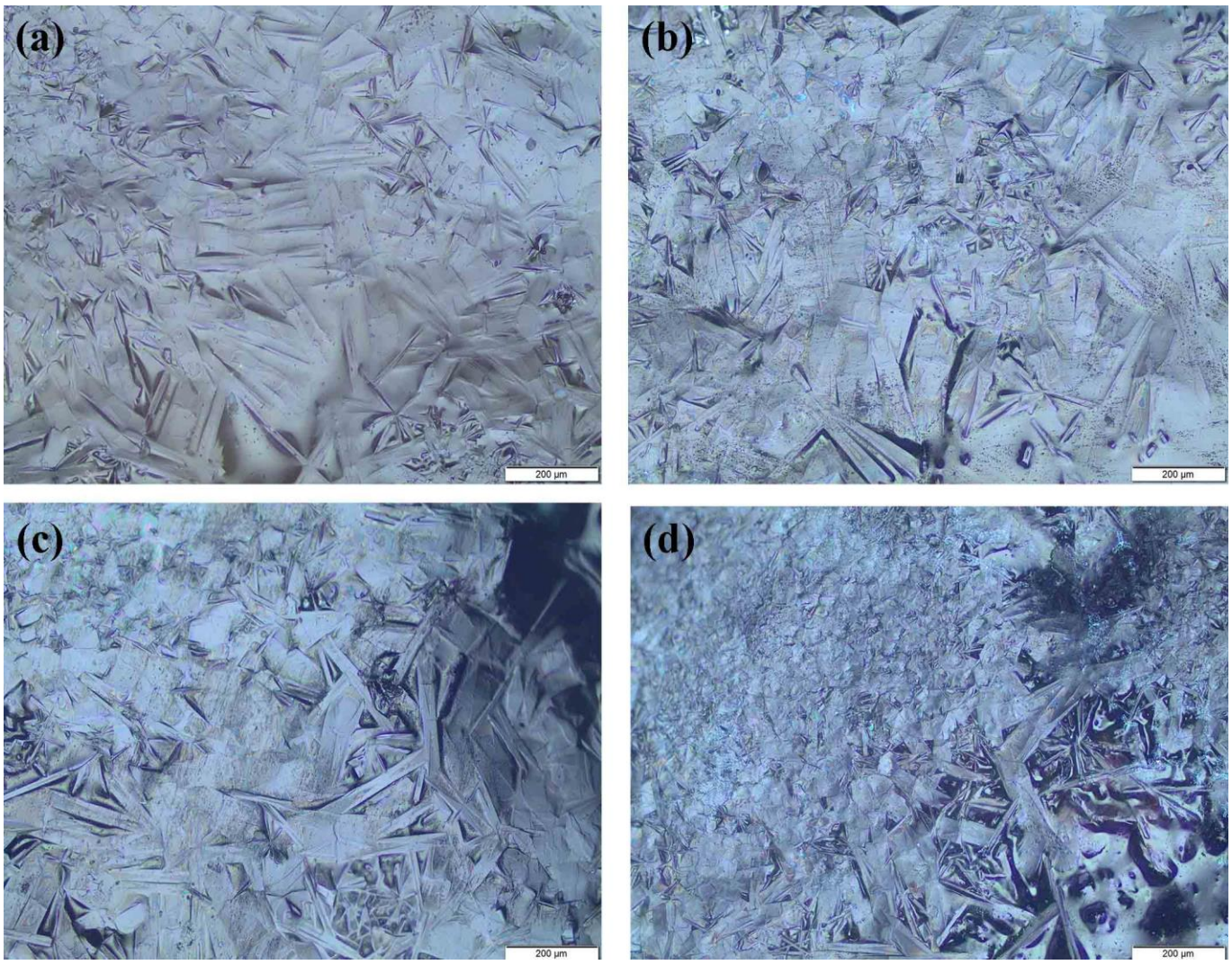


Şekil 5. (a) ADO ve (b) Ticari Fe_2O_3 kullanılan aventurin sırların XRD paternleri (An: Anortit , A: Lityum alüminyum silikat, Q: Kuvars, C: Kristobalit, L: Lityum demir çinko oksit, Li: Lityum demir oksit, H:Hematit).

Optik mikroskop görüntülerinde çok şekilli kristal gruplarının ve çubuk şekilli kristallerin varlığı görülmektedir (Şekil 6). Optik mikroskopi (Şekil 6) görüldüğü gibi ADO ve ticari Fe_2O_3 elde edilenler sırların görüntüleri arasında önemli farklar olmadığı belirlenmiştir. Kristallerin boyutu ayrıca sırın kalınlığına dayandırılır, yani daha kalın sır kalınlığı daha büyük kristaller verir. Sırın sinterleme sıcaklığında demir atomları erimiş cam boyunca hareket edebilir. Ancak düşük viskoziteli sırlarda, Fe_2O_3'ten FeO'ya geçiş işlemi sırasında oksijen salınımından kabarcıkların sır dış yüzeyine kolayca geçmesine ve çukurlar bırakarak patlamasına izin verir. Eriyikteki yüksek akışkanlığın, demir kristalleşmeden önce çukurları düzeltmesi muhtemeldir (Tawwuttanakidkul ve diğerleri, 2018). Bir aventurin sır elde etmenin ilk şartı, kristal fazın camda çözülmelidir, böylece soğutma sırasında büyük boyutlu laminar kristaller şeklinde kristalleşebilir (Gozalbo ve diğerleri, 2006). Daha kalın sır tabakasında alan başına daha fazla demir konsantrasyonu düştüğü için demir atomlarının kabarcıklar ile erimiş yüzeye sürüklenmesi daha kuvvetli bir şekilde gerçekleşir ve daha büyük kristallere yol açar.

Faz ayrımı, alümina içeriği açısından zengin anortit kristal kümeleri oluşmakta bu oluşumu takiben küme kenarlarında hematit kristal fazının oluşumu gerçekleşmektedir. Bu mekanizma, lityum çinko ferrit fazının kristalleşmesini engelleyerek ışıltılı etkinin azalmasına neden olur (Wannagon ve diğerleri, 2013). Yüksek sıcaklıkta düşük viskoziteli ariyik içinde kütle taşınımı daha yüksek olduğu için böylece anorthitin büyümesi kolaylaşır. Düşük sıcaklıktaki kristal sırın, sır içine lityum, çinko ve ferrik oksit ilavelerinin ortak etkileri nedeniyle elde edildiğini bildirmişlerdir. Uygun bileşim, ergitici içeriği ve yüksek sıcaklıkta bekleme süreci, çinko ve ferrik oksidin kristalleşmesinde etkilidir. Lityum (I) iyonunun Franklinitin Zn-Fe yapısında ki kısmen çinko (II) iyonunun kısmen çökelmesi ile sırdaki lityum çinko ferrit kristal fazına dönüşür (Silakate ve diğerleri, 2015). % 20-25'lik Fe_2O_3 kullanılan aventurin sırlarda çubuk

şeklindeki anorthit kristalleri, baskındır ve oktahedral şekilli hematit kristalleri ile çevrelenmiştir. Ferrik oksit miktarı arttıkça hematit kristallerinin miktarı artış göstermiştir. (Wannagon ve diğerleri, 2013)



Şekil 6. Aventurin sırların optik mikroskop görüntüleri: (a) A-20; (b) A-25; (c) A-20F; ve (d) A-25F.

4. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada, atık demir oksidin artistik seramik aventurin sırlarının oluşumu ve özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla Türkiye'nin önemli bir demir-çelik üreticisinden çelik üretim prosesinin bir yan ürünü olan atık demir oksit temin edilmiştir.

Aventurin sırlarda kullanılmadan önce temin edilen yan ürün, serbest metalik parçaları, taşları ve çöpleri uzaklaştırmak için hafif öğütme, yaş eleme ve kurutma gibi fiziksel işlemlerden geçirilmiştir. Nihai malzeme homojen mikron altı toz olarak elde edilmiş ve karakterizasyonları (XRF, XRD ve DTA/TG) gerçekleştirildikten sonra sır hazırlama için kullanılmıştır. Kimyasal analizinde %95'ten fazla Fe_2O_3 içerdiğini, oksit bileşiminde ana safsızlık olarak SiO_2 (ağırlıkça <%1.5) tespit edilmiştir. Mineralojik faz analizinde hematit (α-Fe_2O_3) fazı haricinde herhangi bir safsızlık fazına rastlanmamıştır. Termal analiz sonucuna göre nem kaybı ve az miktarda olan safsızlık fazlarından kaynaklanan düşük bir ağırlık kaybı tespit edilmiştir. Aventurin sırlarına ağırlıkça %10-30 oranında atık demir oksit ve ticari bir Fe_2O_3 ürünü eklenerek hazırlanmış ve pişirim sonuçlarında herhangi bir sır hatasına rastlanmamıştır.

Çalışmanın genel sonuçları göz önüne alındığında, incelenen Fe_2O_3 bakımından zengin atıkların artistik aventurin sırlarının hazırlanmasında ticari demir oksitler yerine bir alternatif olarak uygun olabileceği düşünülmektedir. Düşük maliyetli, atık malzemenin kullanılmasının, sıradan hematit bazlı pigmentlerin yerini alarak sır üretim maliyetlerini azaltabileceği tahmin edilmektedir. Ayrıca bu atığın kullanılmasının, çelik üreten fabrikaların atıkların çevrede açıkta depolanmasının yan etkilerinin bir miktar azaltılmasının yolunu açabileceği beklenmektedir.

Teşekkür

Demir oksit atığı temininden dolayı Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T. A. Ş.'ye (Zonguldak, Türkiye) ve hammadde temininden dolayı Eczacıbaşı Yapı Ürünleri Grubuna (Bilecik, Türkiye) ve Gizem Frit - Gizem Seramik Frit ve Glazür San. A. Ş.'ye (Sakarya, Türkiye) teşekkür ederiz. Bu çalışma Kastamonu Üniversitesi tarafından KÜ-BAP01/2020-57 kodlu bilimsel araştırma proje fonu ile desteklenmiştir.

Referanslar

Carneiro, J., Capela, M. N., Tobaldi, D. M., Novais, R. M., Seabra, M. P. ve Labrincha, J. A. (2018). Red mud and electroplating sludge as coloring agents of distinct glazes: The influence of heat treatment. *Materials Letters*, *223*, 166–169. doi:10.1016/j.matlet.2018.04.013

Carneiro, J., Tobaldi, D. M., Hajjaji, W., Capela, M. N., Novais, R. M., Seabra, M. P. ve Labrincha, J. A. (2018). Red mud as a substitute coloring agent for the hematite pigment. *Ceramics International*, *44*(4), 4211–4219. doi:10.1016/j.ceramint.2017.11.225

Dvornichenko, I.N., Matsenko, S.V. (2000). Production of iron-containing crystalline glazes.*Glass Ceram* **57**, 67–68. https://doi.org/10.1007/BF02681489

Gozalbo, A., Orts, M. J., Mestre, S., Agut, P., Lucas, F., Belda, A. ve Blanco, C. (2006). Ceramic Glazes With Aventurine Effect. *QUALICER 2006: IX World Congress on Ceramic Tile Quality*, (1), 189–202.

Karasu, B., Çaki, M. ve Yeşılbaş, Y. G. (2000). Albit triyaj atığının yumuşak porselen kristal sırlarında değerlendirilmesi. 10.Metalürji ve Malzeme Kongresi, 1465-1472.

Kaya, G. ve Turan, S. (2004). Yüksek fırın curufunun seramik sektöründe katma degeri yüksek ürünlerin eldesinde degerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, *45*(536), 48–60.

Kılınç Mirdalı, N. ve İşler, F. (2008). Kromit Atığının Duvar Karosu Sırlarında Renklendirici Olarak Değerlendirilmesi. *Ç.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü*, *17*(1), 11–21.

Lazău, I., Borcănescu, S., Păcurariu, C. ve Vancea, C. (2013). Kinetic study of the non-isothermal crystallization process of hematite in ceramic glazes obtained from CRT wastes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *112*(1), 345–351. doi:10.1007/s10973-012-2736-1

Ovčačíková, H., Vlček, J., Klárová, M. ve Topinková, M. (2017). Metallurgy dusts as a pigment for glazes and engobes. *Ceramics International*, *43*(10), 7789–7796. doi:10.1016/j.ceramint.2017.03.091

Păcurariu, C., Lazău, R. ve Lazău, I. (2011). Aventurine decorative glazes - kinetic study of α-Fe2O3 crystallization. *Revista Română de Materiale / Romanian Journal of Materials*, *41*(4), 346–351.

Prim, S. R., Folgueras, M. V., de Lima, M. A. ve Hotza, D. (2011). Synthesis and characterization of hematite pigment obtained from a steel waste industry. *Journal of Hazardous Materials*, *192*(3), 1307–1313. doi:10.1016/j.jhazmat.2011.06.034

Silakate, S., Wannagon, A. ve Nuntiya, A. (2015). Influence of ferric oxide on the crystallization of Li-Zn ferrite anorthite and hematite phases at low temperature ceramic glaze. *Journal of the European Ceramic Society*, *35*(7), 2183–2188. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2015.01.029

Tawwuttanakidkul, J., Phermpoonboon, P., Jiemsirilers, S., Buggakupta, W. ve Tianthong, C. (2018). When EAF Dust and Mill Scale from Steelmaking Process Turn to Raw Materials for Tenmoku Oil Spot Glaze. *Materials Today: Proceedings*, *5*(10), 22262–22274. doi:10.1016/j.matpr.2018.06.592

Tığlı Boya, Zennur. & Arıanpour, A. Ç. (2023). Sanatsal Aventurin Seramik Sırlarının Geliştirilmesi İçin Demi r Bakımından Zengin Bakır Cürufunun Uygulanabileceği Üzerine. *International Social Sciences Studies Journal*, *9*(110), 6387–6396.

Tuna, M., Celebi, G. ve Guldas, A. (2018). Recovery of Wastes of Iron-Steel and Plastic Industries for Sustainable Construction Material Sürdürülebilir Yapı Malzemesi Hedefiyle Demir Çelik ve Plastik Endüstrisi Atıklarının Geri Kazanımı Recovery of Wastes of Iron-Steel and Plastic Industries for S, (June).

Wannagon, A., Prasanphan, S. ve Sanguanpak, S. (2013). Characterization of Li-Zn-Fe crystalline phases in low temperature ceramic

glaze. *Journal of the European Ceramic Society*, *33*(4), 653–660. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2012.10.027

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

UMAGD, (2023) 15(3), s153-s165.

10.29137/umagd.1318413

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:3 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue

Araştırma Makalesi / Research Article

Faz Değişim Malzemelerinde Kullanılan İnorganik Nanomalzemelerin MULTIMOORA Yöntemiyle Önceliklendirilmesi

Prioritization of Inorganic Nanomaterials Used in Phase Change Materials by MULTIMOORA Method

Hasret Akgün[1], Ece Turan [1], Aysun Özkan[1], Zerrin Günkaya[1], Müfide Banar*[1]

[1]Eskişehir Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü 26555, Eskişehir, Türkiye

***Başvuru/Received**: 26/06/2023 **Kabul / Accepted**: 22/09/2023 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Öz

Faz değişim malzemeleri (Phase Change Materials (PCM)), özellikle devamlı ulaşılamayan enerji kaynaklarını depolayarak ve talep edildiğinde kullanılmasını sağlayarak yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji sağlarlar. PCM'ler termal enerji depolamada istenilen termodinamik, kinetik, kimyasal ve ekonomik özellikleri bir arada tek başına karşılayamamalarından dolayı farklı nanomalzemeler ile desteklenmektedirler. PCM'in özelliklerini geliştirmek için kullanılan nanomalzemelerin seçimi için kritik parametreler mevcut olup, bu çalışmada inorganik nanomalzemelerin önceliklendirilmesi amaçlanmıştır. Bu noktada Çok Kriterli Karar Verme (Multi Criteria Decision Making (MCDM)) metodolojisi oldukça kullanışlıdır. Bu çalışmada, PCM'lerde kullanılabilecek 5 farklı inorganik nanomalzeme (bakır oksit, aluminyum oksit, gümüş, titanyum oksit ve bor nitrürün) önceliklendirilmesi için Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon Yöntemi (MULTIMOORA) kullanılmıştır. Erime noktası değişimi, gizli ısı değişimi, termal iletkenlik değişimi, ön işlem gereksinimi, toksisite ve maliyet olmak üzere 6 değerlendirme kriteri belirlenmiştir. Kriter ağırlıklarının belirlenmesinde ise sırasıyla entropi (objektif yöntem) ve sıralama (subjektif) yöntemleri kullanılmıştır. Her iki kriter ağırlıklandırma yöntemine göre de erime noktası değişiminin en önemli kriter olduğu görülmüştür. MULTIMOORA sonuçlarına göre PCM'lere eklenecek en uygun inorganik nanomalzemenin ise bor nitrür (BN) olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

"Mcdm, multımoora, pcm, tes"

Abstract

Phase Change Materials (PCM) provide renewable and sustainable energy, especially by storing renewable energy sources that are not always available and enabling them to be used when demanded. Since PCMs cannot meet the desired thermodynamic, kinetic, chemical and economic properties in thermal energy storage alone, they are supported by different nanomaterials. There are critical parameters for the selection of nanomaterials used to improve the properties of PCM, and in this study, it is aimed to prioritize inorganic nanomaterials. At this point, the Multi Criteria Decision Making (MCDM) methodology is very useful. In this study, Multi-Objective Optimization Method Based on Ratio Analysis (MULTIMOORA) was used to prioritize 5 different inorganic nanomaterials (copper oxide, aluminum oxide, silver, titanium oxide and boron nitride) that can be used in PCMs. Six evaluation criteria were determined as melting point change, latent heat change, thermal conductivity change, pretreatment requirement, toxicity and cost. The criteria weights were determined by entropy (objective method) and ranking (subjective) methods, respectively. According to the weighting method of both criteria, the melting point change was determined as the most important criterion. According to MULTIMOORA results, boron nitride (BN) was found to be the most suitable inorganic nanomaterial to be added to PCMs.

Key Words

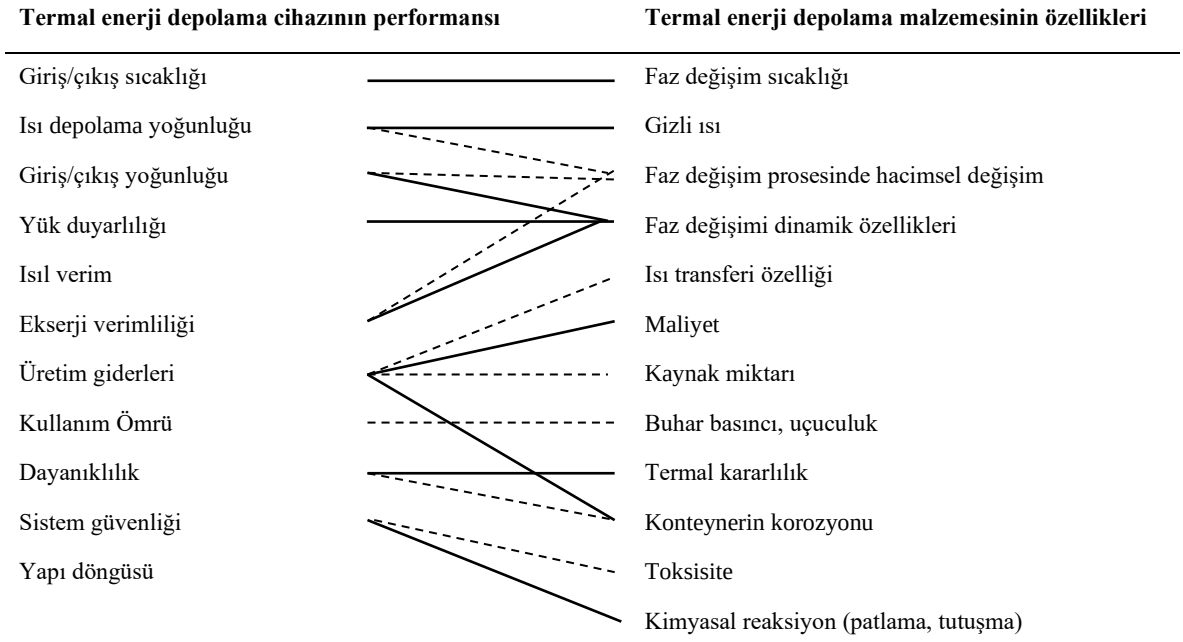
"Mcdm, multımoora, pcm, tes"

***Sorumlu Yazar: mbanar@eskisehir.edu.tr**

1. Giriş

Günümüzde kaynakların korunumunun sağlanması ve çevre üzerindeki olumsuzluklar nedeniyle, fosil yakıtların yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Güneş, dalga ve rüzgâr enerjileri yenilenebilir enerji kaynaklarının en yaygın türleridir ve temiz ve sürdürülebilir olarak nitelendirilmektedirler. Gerçekte, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha fazla uygulanmasıyla ilgili en büyük darboğazı, talebin yoğun olduğu dönemlerde ulaşılabilirlik sorunu oluşturmuştur (Al Ghossein vd., 2017). Bu noktada, termal enerji depolama (TES), enerji tüketiminin zaman kaymasına izin verir. Ulaşılabilirlik sorununa çözüm olarak TES'ler ile enerji, düşük talep veya düşük maliyetli üretim dönemlerinde depolanabilir ve daha sonra yüksek talep veya yüksek maliyetli üretim dönemlerinde kullanılabilir. Bu, enerjinin arz ve talebini dengelemeye yardımcı olur ve hem tüketiciler hem de enerji sağlayıcıları için maliyet tasarrufu sağlayabilir. TES enerji tasarrufunu artırarak çevre kirliliğini azaltmak, depolama sonrası çalışma ortamında termal konfor sağlamak, elektroniklerin çalışma ömrünü iyileştirmek vb. için potansiyel bir teknolojidir (Luo vd., 2021). Termal enerji, duyulur ısı depolama (sensible heat storage (SHS)), gizli ısı depolama (latent heat storage (LHS)) ve kimyasal ısı depolama (chemical heat storage (CHS)) yöntemleri kullanılarak depolanabilir (Aydın, 2010). Üç termal enerji depolama formundan gizli ısı depolama, faz değiştirme işlemi sırasında sıcaklık ve hacimde çok az değişim olurken, büyük depolama kapasitesi nedeniyle daha çok tercih edilmektedir (George vd., 2020). Gizli ısı, maddenin faz değişimi esnasında çevreden aldığı veya çevreye verdiği ısıdır. Malzeme faz değişim sıcaklığına ulaştığında, duruma bağlı olarak füzyon veya buharlaşma gizli ısısı olarak bilinen dönüşümü gerçekleştirmek için büyük miktarda ısıyı emer ve bu şekilde enerji depolanır. Genel olarak, gizli ısı depolama sistemleri depolama ortamının katı ve sıvı fazları arasındaki gizli ısıyı kullanır (Cárdenas ve León, 2013).

TES sistemleri için PCM seçilirken çok sayıda faktör dikkate alınmalıdır. Seçilen malzemelerin çeşitli yönlerden performansı, ısı depolama kapasitesini ve termal depolama/salım verimliliğini doğrudan etkileyecektir. Herhangi bir PCM'nin termodinamik, kinetik, kimyasal ve ekonomik kriterler temelinde uygun TES kullanımına yönelik seçimi ile ilişkisi Şekil 1' de gösterilmiştir (Wei vd., 2018). Diğer yönden PCM'ler istenilen termodinamik, kinetik, kimyasal ve ekonomik özellikleri tek başına karşılayamamaktadırlar (Shahid ve Abdala, 2021).



Şekil 1. Isı Depolama Sistemi Performansı ile Isı Depolama Malzemesi Özellikleri Arasındaki İlişki (Wei vd., 2018)

Cihazların boyutlarını küçültme, verimliliği artırma ve malzemelerin özelliklerini geliştirmede ilgi gören nanoteknolojik uygulamalar son yıllarda düşük termal iletkenliğe sahip malzemelerin ısı transferini iyileştirebilme kabiliyeti ile odak noktası olmaktadır. Nanomalzeme (NM)'lerin yüksek termal iletkenliğe sahip olmaları, PCM'lerin iletkenliğini geliştirmede önemli bir rol oynar. Mevcut literatür çalışmalarında farklı NM türlerinin eklenmesi ile PCM'lerin özelliklerinin geliştirildiği görülmektedir. Malzemelerin termofiziksel özellikleri bileşenlerinin özelliklerine bağlı olduğundan, ısı transferini arttırma açısından daha yüksek termal iletkenliğe sahip nanoyapılar tercih edilmektedir; bununla birlikte, bu iletken malzemelerin bazılarının maliyetleri yüksektir. Çoğu durumda, metaller ve karbonlu malzemeler gibi iletken NM'lerin dahil edilmesi, kompozit PCM'nin özgül ısısında azalmaya yol açmıştır. NM'lerin eklenmesiyle PCM'lerin ısı transferinde artış ve alev geciktirmede iyileştirme gibi bazı özellikler değişmiştir. PCM'lerin ısı transfer kapasitesi, esas olarak faz dönüşümü olarak ortaya çıkan şarj/deşarj oranına göre değerlendirilir. NM'lerin varlığı, dinamik viskozitedeki artış veya gizli ısı kapasitesindeki azalma nedeniyle bazı sorunlara neden olabilir (Nazari vd., 2021). Grafen, karbon nanotüpler (CNT) ve karbon nanofiberler (CNF), gibi karbon bazlı nanomalzemeler, yüksek termal iletkenlik ve mekanik dayanıma sahiptirler (Ulus, 2021; Kaviarasu ve Prakash, 2016). PCM'lere dahil edildiğinde, bu nanomalzemeler kompozitin hem ısı transferini

hem de yapısal özelliklerini geliştirerek daha verimli termal enerji depolaması sağlar. Titanyum dioksit (TiO_2), çinko oksit (ZnO) ve alümina (Al_2O_3) gibi metal oksit nanoparçacıkları, PCM geliştirmesi için faydalı olabilecek çeşitli özelliklere sahiptir. Küçük miktarlarda dağıtıldıklarında PCM'lerin termal iletkenliğini, kararlılığını ve faz değiştirme davranışını geliştirebilirler.

Kibria vd. (2015), termal enerji depolama sistemleri için nanomalzeme ile geliştirilmiş PCM'lere ait çalışmalarında, karbon nanotüpleri, karbon nanofiberleri, grafit ve grafen nanopartikülleri, metal ve metal oksit nanopartikülleri gibi nanomalzemelerin eklenmesiyle geliştirilmiş yağ asidi ve parafin bazlı PCM'lere odaklanmıştır. CNT ve CNF ile geliştirilmiş yüzey işlemine sahip PCM'ler, termal iletkenlikte daha iyi bir artış göstermiştir. Metal ve metal oksit PCM'ler için termal iletkenlik artışı boyut, şekil ve konsantrasyona bağlı olduğunu gözlemlemiştir. PCM'de nanopartiküllerin aşırı eklenmesi, kütle/hacim konsantrasyonunda bir artışa neden olmuştur ve bu da olumsuz bir etkiye (dinamik viskozite artışları) neden olmuştur.

Huang vd. (2021), parafinin termal iletkenliğini arttırmak için, katkı maddesi olarak çok katmanlı grafen kullanarak hazırladıkları kompozit faz değişim malzemesindeki (Composite Phase Change Material (CPCM)) çok katmanlı grafenin kütle oranı ağırlıkça %15,1'e ulaştığında, CPCM'nin termal iletkenliğinin saf parafinin (0,22 W/(m·K)) 4 katı bir değere (0,88 W/(m·K)) ulaştığını belirlemişlerdir. Ayrıca, CPCM'nin erime gizli ısısını 114,2 kJ/kg olarak saptamışlar ve CPCM'nin iyi bir ısı depolama özelliğine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Sızıntı deneyleri sonucunda katmanlı grafenin parafine karşı iyi bir adsorpsiyona sahip olarak sızıntıyı önlediği gözlenmiştir. Termal döngü deneyleri ise CPCM'nin iyi termal stabilite sağladığını göstermiştir.

Kuziel vd. (2021), CPCM'leri yapmak için PCM olarak parafin ve termal iletkenlik katkı maddesi olarak farklı türde karbon nanotüpler kullanmışlardır. Çok duvarlı karbon nanotüple (Multi-walled carbon nanotube - MWCNT) geliştirilmiş CPCM'lerdeki MWCNT içeriği ağırlıkça %2 olduğunda, CPCM'lerin termal iletkenliğinin %161 arttığı gözlenmiştir.

Sheng vd. (2019), parafinin termal iletkenliğini arttırmak için karbon fiber kullanarak sentezledikleri CPCM'ler için farklı yoğunluklarda (sırasıyla 0,097 g/cm^3 ve 0,172 g/cm^3) karbon fiber kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, CPCM'lerin termal iletkenliğinin karbon fiberin yoğunluğuyla ilişkili olduğu ve CPCM'lerin ısıl iletkenlik açısından anizotropi sunduğu (eksenel ısıl iletkenliğin radyal termal iletkenlikten daha yüksek olduğu) bulunmuştur. Deneysel çalışma sonucunda yüksek yoğunluklu karbon lif ile hazırlanmış CPCM'in en yüksek eksenel termal iletkenliğe (saf parafinin termal iletkenliğinin yaklaşık 6,92 katı) sahip olduğu görülmüştür.

Zhao vd. (2021), termal iletkenlik katkı maddesi olarak Al_2O_3 ve PCM olarak parafin kullanarak hazırladıkları CPCM'lerin termal iletkenliğini 1,27 W/(m·K) olarak bulmuşlardır; bu da saf parafininkinin yaklaşık 5 katıdır. CPCM'lerin termal iletkenliğinin iyileştirilmesi, alüminanın çok sayıda gözenekli yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Alümina, CPCM'lerin termal iletkenliğini artırabilen ve PCM'nin sızıntısını önleyebilen büyük bir adsorpsiyon kapasitesine sahiptir. Bununla birlikte, alüminanın kütle oranının artmasıyla birlikte CPCM'lerin gizli ısısı da buna bağlı olarak azalmış, alüminanın kütle oranı %50 olduğunda CPCM'lerin erime gizli ısısı 101,5 kJ/kg olarak bulunmuştur.

Wang vd. (2021) yapmış oldukları çalışmada, parafin vaks ve farklı nanomalzemeler (CuO, Al_2O_3 ve Fe_3O_4) ile CPCM hazırlamışlardır. CPCM'lerin faz değişimi gizli ısısı, viskozitesi ve termal iletkenliği analiz edilmiştir. Sonuçlar, saf parafin vaks ile karşılaştırıldığında, ağırlıkça %1,2 CuO/parafin kompozit PCM'lerin termal iletkenliğinin 25°C'de %24,9 arttığını, buna karşın 70 °C'de termal iletkenliğin %20,6 arttığını göstermiştir. Saf parafin vaks ile karşılaştırıldığında, nanokompozit PCM'lerin gizli ısısı 70°C erime sıcaklığında %1,5 azalmış, viskozitesi %10,1 artmıştır.

Nanomalzemelerin eklenmesi ile değişen termal özelliklerin yanı sıra oluşan kompozitlerde fiziksel ve kimyasal değişimler de söz konusu olabilmektedir. Eklenen altıgensel bor nitrür (Hexagonal boron nitride (hBN)) nanomalzemelerin kompozit içindeki dağılımını görselleştirmek ve şekil, boyut ve kalınlığının belirlenmesi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ya da geçirimli elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak görsel olarak incelenmektedir. Parafin içine dağıtılan hBN aglomerasyonlar oluşturduğundan, bunu ortadan kaldırmak için ultrasonikasyon kullanılmaktadır. Kompozitlerin X-Işını Kırınım analizi (XRD) eğrileri incelendiğinde, oluşan tepeler kompozitin yapısındaki safsızlıkların göstergesidir (Fang vd., 2014).

TiO_2 nanomalzemelerin parafine eklenmesi ile nanomalzemenin kompozit içinde miktarının ağırlıkça artması ile aglomerasyon eğilimi artmaktadır. Düşük konsantrasyonlu sıvı haldeki bir kompozitte, çözünme, "Brown" hareketleri ve elektrostatik itme ile nanopartiküllerin ayrılmasına neden olur. Nanopartiküller arasındaki çarpışma olasılığı, artan konsantrasyonla artar ve Van der Waals kuvveti kısa mesafede daha güçlüdür. Bu nedenle nanopartiküller yüksek konsantrasyonda gruplar oluşturma eğilimindedir. Kompozitin mikro yapısı katı hal ile sıvı hal arasında farklıdır çünkü katı haldeki parafin vaks molekülleri TiO_2'yi gruplara itebilir (Wang vd., 2014). Cu ve parafin vaks ile hazırlanan kompozitlerin kimyasal yapıları fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizi yardımı ile incelendiğinde FT-IR absorpsiyon spektrumları, bakır nanomalzemenin parafin vaks ile fiziksel olarak bağlandığını, kimyasal stabilite için kimyasal yapı etkileşimini bozmadığını göstermiştir. SEM ve TEM görüntüleri incelendiğinde Cu nanoparçacıkların aglomerasyon eğiliminde olduğu görülmektedir (Lin ve Al-Kayiem, 2016).

TES uygulamaları için, PCM'lerin özelliklerinin, PCM'lere inorganik NM eklenerek geliştirilmesine ilişkin (NM-PCM) literatür çalışmaları Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. İnorganik NM Eklenmesiyle Geliştirilen Kompozit PCM'lere Ait Literatür Çalışmaları

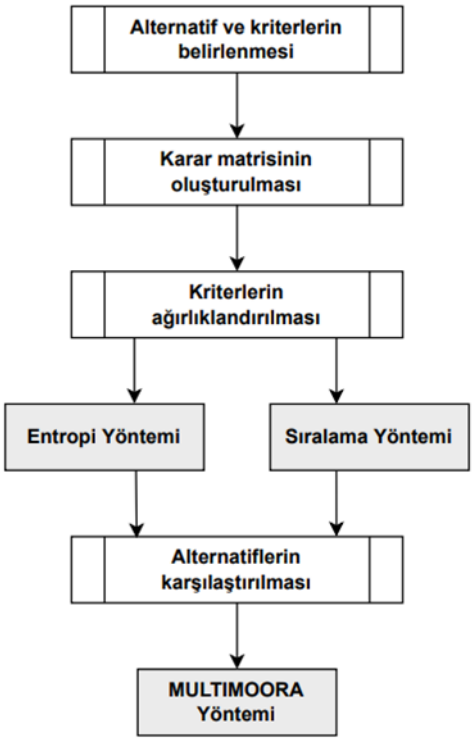
Nanomalzeme / Değişen özellik	CuO	Al_2O_3	Ag	TiO_2	BN
Parafin erime noktası, °C	60,42	54	37	48	58
Kompozit erime noktası, °C	57,81	52	36,5	46	58,7
Parafin gizli ısı, kJ/kg	184,2	159,5	241	168	200
Kompozit gizli ısı, kJ/kg	157,3	211	208	165	191
Termal iletkenlik artışı, %	46,3	62,3	34,1	5,9	6%
Ön işlem Gereksinimi	Yok	Var	Var	Var	Yok
Toksisite	Çok	Orta	Çok	Orta	Orta
Maliyet, $	33,00	14,00	150,00	1,20	106
Karıştırma Yöntemi	Karıştırıcı-Ultrasonikasyon	Karıştırıcı-Ultrasonikasyon	Kontrollü sıcaklık banyosu	Karıştırıcı-Sonikasyon	Manyetik karıştırıcı-Ultrasonikasyon
Referans	Fang, 2014; Wang vd., 2014; Lin ve Al Kayiem, 2016; Al Ghossein, 2017; Mohamed vd., 2017, Tony 2021				

NM'lerin özellikleri büyük ölçüde boyut, şekil ve yüzey kaplaması gibi spesifik özelliklerine bağlı olmasının yanı sıra tablodan da anlaşıldığı üzere NM'lerin farklı açılardan birbirlerine göre üstünlükleri bulunmaktadır. Bu noktada NM seçiminde, bir problemin çeşitli kriterlere dayalı bir dizi alternatif arasından en iyi çözümünü bulmak için kullanılan MCDM yaklaşımı faydalı bir araçtır. MCDM, literatürde yer aldığı 1950-1970'li yıllar arasındaki gelişmesinden bu yana birçok karar verme probleminde yaygın olarak uygulanan önemli bir araç olmuştur (Demir ve Arslan, 2022). MCDM, karar verme konusunun değerlendirilmesine, ağırlıkların belirlenmesine ve her bir kritere göre her seçeneğin performansının hesaplanmasına vurgu yapar (Zavadskas ve Podvesko, 2016). Özellikle son yıllarda karar problemini oluşturan kriter ağırlıklarını belirlemek için birçok araştırmacı farklı yöntemler geliştirmiş ve bu yöntemler birleştirilerek hibrit modeller de oluşturulmuştur (Pamučar ve Ćirović, 2015). Yang vd. (2018), tarafından yapılan bir çalışmada, PCM seçimi için MCDM yöntemleri kullanılmıştır. Kriterlerin subjektif ve objektif ağırlıkları sırasıyla Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve entropi yöntemi ile belirlenmiştir. İkinci olarak, ağırlık kombinasyonunu elde etmek için optimize edilmiş kombinasyon ağırlığı yöntemi kullanılmıştır. Daha sonra PCM'ler, uygun PCM seçimi için İdeal Çözüme Benzerlik (TOPSIS) yöntemi kullanılarak sıralanmıştır. Başka bir çalışmada, Das vd. (2021), bir otomobil kabininde pasif termal yönetim için uygun PCM 'yi seçmek üzere Çok Amaçlı Karar Verme (MODM) ve Çok Nitelikli Karar Verme (MADM) yöntemleri kullanmıştır. Çalışmada farklı seçim yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. MODM, Ashby yöntemiyle PCM'lerin özelliklerini öznel olarak değerlendirmek için kullanılmıştır. AHP ve TOPSIS, entropi tabanlı ağırlıklarla birlikte kullanılmıştır.

Bu çalışmanın amacı her geçen gün daha fazla ihtiyaç duyulan PCM'lerin özelliklerini geliştirmek için uygun inorganik nanomalzemenin belirlenmesidir. Literatür çalışmaları incelendiğinde PCM'leri geliştirmek için kullanılan NM'nin yoğunluğu, miktarı, moleküler yapısı ve moleküller arası etkileşimlerin CPCM'nin özelliklerini etkilediği görülmüştür. Ayrıca inorganik NM'ler, özel uygulama ve gereksinimlere bağlı olarak sonikasyon, kimyasal çökeltme veya elektrospinleme gibi çeşitli yöntemlerle PCM'ler içinde sentezlenebilir ve dağıtılabilir. Bu NM'lerin seçimi, TES sisteminin istenen özelliklerine ve gereksinimlerine bağlıdır. Bu katkı maddelerinin farklı kombinasyonları ve konsantrasyonları, belirli sıcaklık aralıklarını, ısı transfer gereksinimlerini ve kararlılık hususlarını karşılamak için uygulanabilir. PCM'ler bağlamında MCDM ile ilgili mevcut literatür, öncelikle belirli uygulamalar için PCM seçimine odaklanmaktadır. PCM gelişimi için hem organik hem de inorganik katkı maddelerinin seçimine ilişkin önemli oranda bir araştırma ihtiyacı vardır. Daha önce yapılan çalışmalar öncelikle termal iletkenlik ve erime noktası gibi termal özellikleri karşılaştırmakta iken bu çalışma, PCM seçimi için, uygulama aralığını genişletmede önemli olan temel faktörleri kapsayan, niceliksel ve niteliksel kriterlerin karşılaştırılmasını sağlayan kriterleri ele alan, alternatif inorganik nanomalzemelerin karşılaştırılması ve uygun katkı malzemesinin seçimi için farklı kriterleri değerlendirerek optimum bir alternatifin ortaya konulmasını sağlayan bir çalışmadır. Malzeme seçimi için itici güç genellikle performansın iyileştirilmesi ve maliyetin en aza indirilmesidir. Bu çalışmada literatürden elde edilen verilere göre, PCM'lerin özelliklerini geliştirmek için en uygun inorganik NM'yi seçmek amacıyla kriter ağırlıkları entropi (entropy) ve sıralama (ranking) yoluyla belirlenirken, alternatiflerin sıralamasında Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon (MULTIMOORA)- (Multi-Objective Optimization on the basis of a Ratio Analysis plus the full MULTIplicative form) kullanılmıştır. Karar matrisi inorganik malzemelerin PCM'lerin özelliklerine etkisini konu alan çalışmalar baz alınarak oluşturulmuştur. PCM'leri geliştirmek için beş alternatif, bakır oksit (CuO), aluminyum oksit (Al_2O_3), gümüş (Ag), titanyum oksit (TiO_2) ve bor nitrür (BN); erime noktası değişimi (c1), gizli ısı değişimi (c2), termal iletkenlik değişimi (c3), ön işlem gereksinimi (c4), toksisite (c5) ve maliyet (c6) olarak belirlenen 6 kriter açısından karşılaştırılmıştır.

2. Yöntem

Bu çalışmada, kriterlerin ağırlıklandırılmasında objektif yöntemlerden entropi yöntemi, subjektif yöntemlerden ise sıralama yöntemi kullanılmıştır. Alternatifler, literatür çalışmaları doğrultusunda, PCM geliştirilmesinde en çok kullanılan inorganik malzemelerden seçilmiştir. Kriter ağırlıklarının belirlenmesinin ardından MCDM tekniklerinden MULTIMOORA yöntemi ile alternatifler karşılaştırılmıştır. Çalışmanın akış şeması Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Çalışmanın Akış Şeması

2.1. Alternatif ve Kriterlerin Belirlenmesi

PCM'lerin belirli uygulamalarda kullanılabilmesi için uygun termal, fiziksel, kinetik, kimyasal ve ekonomik özellikleri sağlaması gereklidir. PCM'ler, iyi termal iletkenlik ve gizli ısı kapasitesi gibi termal özellikler; iyi kimyasal stabilizasyon, toksik olmama, yanıcı olmama ve aşındırıcı olmama gibi kimyasal özellikler; düşük/sıfır aşırı soğutma gibi kinetik özellikler; faz değişimi sırasında minimum hacim değişimi ve uyumlu erime noktası gibi fiziksel özellikler gerektirmektedir. Nanomalzeme toksikolojisi alanı sürekli gelişmekte ve potansiyel sağlık etkileri sürekli iyileştirilmektedir. Sürdürülebilir kullanımlarını sağlamak için PCM'lerin maliyeti düşük olmalıdır. Ancak PCM'ler her zaman bu özellikleri karşılayamayabilir ve bu PCM'lerin özelliklerinin geliştirilebilmesi için katkı malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada PCM'lerin özelliklerini geliştirmek için sıklıkla kullanılan 5 farklı inorganik katkı malzemesi alternatif olarak belirlenmiştir. Bu katkı malzemelerinin PCM'de aranan özelliklerin geliştirilmesine yönelik de aşağıdaki kriterler belirlenmiştir;

Erime noktası sıcaklık değişimi (c1): Faz değişim malzemeleri, uygulama alanına göre belirlenen çalışma sıcaklığına uygun bir erime noktasına sahip olmalıdır. PCM'ler, erime boyunca endotermik bir süreçte ısıyı emer ve PCM soğuduğunda, ısıyı ekzotermik sürece geri verir (Javadi vd., 2020). Düşük erime noktası, karıştırma sırasında daha az enerji kullanıldığı anlamına gelir.

Gizli ısı değişimi (c2): Nanomalzemeler eklenerek geliştirilen kompozit PCM'nin gizli ısısındaki değişim, termal döngülere maruz kaldıktan sonra PCM'nin termal ve fiziksel kararlılığı hakkında bilgi sağlayabilir. Nanomalzemeler optimum oranda kullanılmazsa, kullanımları kompozitin gizli ısısını düşürebilir. Bu, PCM'nin emebileceği ve salabileceği termal enerji miktarını azaltır ve termal enerji depolama verimliliğini düşürür. Gizli ısı kapasitesi, çoğu uygulama için bir PCM'nin önemli bir termofiziksel özelliğidir (Jiang vd., 2016).

Termal iletkenlik geliştirme (c3): Bir sıcaklık gradyanında bir malzemeden geçen ısı akış hızı, termal iletkenlik (Javadi vd., 2020) tarafından belirlenir. Termal iletkenlik, yükleme ve boşaltma hızı olarak da bilinen malzemenin eriyik katılaşma hızını etkiler. Nano

boyutlu katkı maddelerinin eklenmesi, doğal taşınımı bastırarak bir malzemenin veya sıvının termal iletkenliğini değiştirmektedir (Coetzee vd., 2020).

Ön işlem gereksinimi (c4): İnorganik malzemelerin katkı malzemesi olarak kullanıldığı bazı kompozit PCM'lerin hazırlanması sırasında bazı durumlarda inorganik malzemeler doğrudan kullanılamamaktadır. Ön işlem gereksinimini karşılaştırmak için literatür çalışmaları incelenmiş ve ön işlem gereksinimleri 1 ile 9 arasında ölçeklendirilmiştir. Bu değerler, inorganik malzeme katkı maddesi olarak kullanılmadan önce ön işlem uygulanması gerekiyorsa puan 9 olarak verilmiştir. Ön işlem gereksinimine ait çalışma sayısına göre puan düşürüldüğünden, bu çalışmada ön işlemin gerekmediği durumlar için 1 puan verilmiştir.

Toksisite (c5): Nanomalzemelerin büyük yüzey alanı, küçük boyut, morfoloji, reaktivite ve kimyasal bileşim gibi fiziko-kimyasal özellikleri toksik etkilerine katkıda bulunan temel faktörlerdir (Khanna vd, 2015). Bu çalışmada, literatürde yer alan nanotoksisite çalışmaları incelenerek bu nanomalzemeler için 1 ile 9 arasında ölçeklendirme yapılmıştır. Ölçeklendirme yapılırken tanecik boyutunun özelliklere etkisi göz önünde tutularak 20-100 nm aralığı esas alınmıştır.

Jeng ve Swanson (2006)'ın, 30 ila 45 nm arasında değişen parçacık boyutlarına sahip TiO_2, ZnO, Fe_3O_4, Al_2O_3 metal oksit nanoparçacıkları için yapmış oldukları çalışmada, ZnO düşük konsantrasyonlarda dahi toksik etki gösterirken, daha yüksek konsantrasyonlara çıkıldığında toksisite değerlerinin sırasıyla ZnO, Al_2O_3, TiO_2 ve Fe_3O_4 şeklinde azaldığı görülmüştür. Benzer bir çalışmada aynı konsantrasyonlara sahip nanopartiküllerin toksisiteleri sırasıyla Zn, Ni, TiO_2, Al, Ag olarak azalmaktadır (Park vd., 2007). Zhang vd. (2011)'nin, yapmış oldukları çalışmada, aynı konsantrasyondaki ZnO, TiO_2, SiO ve Al_2O_3 toksisiteleri sırasıyla azalmaktadır.

Çeşitli endüstrilerden çevreye NM'lerin deşarjının, toprak mikrobiyotasının bileşimini ve fizyolojik fonksiyonlarını değiştirmesi beklenmektedir. Bu beklentinin toprak mikrobiyatası üzerinde oluşturduğu belirsizlik dikkate alınarak, boyut ve morfoloji bakımından farklılık gösteren beş NP'nin (Ag, ZnO, CuO, Al_2O_3 ve TiO_2) Azotobacter chroococcum, Bacillus thuringiensis, Pseudomonas mosselii ve Sinorhizobium meliloti'nin büyüme davranışı ve fizyolojik aktivitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İlginç bir şekilde, tüm bakteri suşları Ag-NP'lere ve ZnO-NP'lere duyarlı bulunmuş ancak CuO, Al_2O_3 ve TiO_2 NP'lere karşı tolerans göstermiştir. Aynı konsantrasyonlardaki Ag ve ZnO karşılaştırıldığında Ag'nin toksisitesinin ZnO'ya göre yüksek olduğu görülmüştür (Ahmed vd., 2020).

BN'ün nanopartikül formları, elektronik, kaplamalar ve biyomedikal kullanımlar dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için incelenmiştir. Mevcut yaklaşım, nanoparçacık şeklindeki BN'ün genellikle düşük toksisiteye sahip olduğunun kabul edildiğini göstermektedir. Çalışmalar, BN nanoparçacıklarının insan sağlığı veya çevre üzerinde önemli olumsuz etkilere neden olmadığını göstermiştir.

Maliyet (c6): Faz değişim malzemelerinin maliyeti, TES sistemlerinin teknolojik ve ekonomik fizibilitesini etkileyen önemli faktörlerdir. Nanomalzemelerin her birinin maliyeti üretim tekniklerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Ancak maliyet kriteri, nanomalzeme ile geliştirilmiş bir PCM hazırlanırken en çok kullanılan nanomalzemelerin satış maliyetlerine göre belirlenmiştir. Nanomalzemenin PCM katkı malzemesi olarak kullanımı aşaması maliyet kalemi sınırlarına dahil edilmemiştir.

2.2. Karar Matrisinin Oluşturulması

MCDM yöntemi ile karar vermek için kriterler belirlendikten ve uygun veriler toplandıktan sonra karar matrisi oluşturulmuştur. Literatür taraması sonucunda elde edilen bazı kriterler için değişimler hesaplanmış ve c1 ve c3 kriterleri için negatif değerler elde edilmiştir. Entropi yöntemi bir logaritma fonksiyonu içerdiğinden, verilerde negatif sayıların ve sıfırların bulunması sorun teşkil etmektedir. Bu sorunu aşmak için literatürde bazı dönüşümler önerilmiştir. Bu çalışmada negatif değerlerin ortalama ve standart sapmaları kullanılarak pozitifleştirme yapılmıştır. c1 ve c3 kriterlerinin değer aralığı ve yönü belirlenerek değişimlerden kaynaklı negatif xij değerlerine denklem (1)'e göre pozitifleştirme uygulanmıştır.

$$x_{ij}^{l} = \frac{x_{ij} - min_{ij}}{maxx_{ij} - minx_{ij}} \quad (1)$$

Bu aşamada pozitifleştirme sonrası yeni c1 ve c3 değerleri ile karar matrisi yeniden oluşturulmuştur.

2.3. Kriterlerin Ağırlıklandırılması

MCDM problemlerinde kriter ağırlıklarını belirlemek için araştırmacılar tarafından farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada, objektif yöntem olarak Entropi yöntemi, subjektif olarak ise sıralama yöntemi tercih edilmiştir. Entropi kavramı, 1865 yılında Clausius tarafından termodinamikte düzensizlik ve dağılımın bir ölçütü olarak ortaya atılmıştır. Bu kavram, Shannon (1948) tarafından ayrık olasılık dağılımı ile açıklanan belirsizliğin bir ölçüsü olarak bilgi teorisi açısından farklı bir şekilde tanımlanmıştır (Zhang vd., 2021).

Entropi yönteminde, karar matrisindeki veriler, karar problemindeki kriterlerin ağırlıklarını hesaplamak için kullanılır (Ayçin ve Çakın, 2019; Lescauskiene vd., 2020). Basit bir ağırlıklandırma yöntemi olarak bilinen sıralama yöntemi, subjektif kriter ağırlıklandırma yöntemidir. Sıralama yöntemi, sıra toplamı, sıra üssü ve karşılıklı sıra kullanılarak ağırlıkları belirlemek için kullanılan üç yaklaşımda, kriterler en iyiden en kötüye doğru sıralanır (Odu, 2019).

2.3.1. Objektif ağırlıklandırma: entropi yöntemi

Entropi, veri kümeleri arasındaki karşıtlıkları ölçtüğü ve karar vericiye aktarılan ortalama içsel bilgileri netleştirdiği için önceden tanımlanmış bir karar matrisine göre işlev görür.

Shannon entropisi ile objektif ağırlığı belirlemek için kullanılan prosedür şu şekildedir:

Adım 1 p_{ij} denklem (2) sonuçlarını elde etmek için karar matrisinin normalleştirilmesi.

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}} \tag{2}$$

Adım 2 Entropi hesaplanması

$$E_j = -k \sum_{i=1}^{m} p_{ij} \ln p_{ij}, \tag{3}$$

Burada, k=1/ln(m)

Adım 3 Entropi kavramına dayalı olarak objektif ağırlığın tanımlanması

$$w_j = \frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^{n}(1-E_j)}, \tag{4}$$

Adım 4 Karar verici sübjektif ağırlık atarsa, entropi ağırlığının genel formunun hesaplanması

$$w_j^* = \frac{s_j w_j}{\sum_{j=1}^{n} s_j w_j}, \tag{5}$$

Genel Shannon entropi ağırlığı w_j^* denklemi, öznel ve nesnel ağırlıkların ($s_j \; and \; w_j$) birleştirilmesiyle elde edilir.

2.3.2. Subjektif ağırlıklandırma: Sıralama yöntemi

Sıralama yönteminde, kriterler en iyiden en kötüye doğru sıralanır. Sıralama yöntemini kullanarak ağırlıkları belirlemeye yönelik üç yaklaşım vardır: sıra toplamı (rank-sum (RS)), sıra üssü (the rank exponent (RE)) ve karşılıklı sıra (reciprocal rank (RR)).

RS yöntemi, ağırlık satırlarının, satırların toplamına bölünmesiyle normalize edilerek hesaplanır.

$$w_j(RS) = \frac{n-p_j+1}{\sum_{k=1}^{n} n-p_k+1} \tag{6}$$

Burada $p_j, j.$ kriterin sıralamasıdır $j = 1,2,..,n$

RE yöntemi, değerin, en önemli kriterin bir sonucu olarak bir karar verici tarafından tahmin edilebilen bir parametrenin üstel değerine yükseltilmesi dışında sıra toplamı yöntemine benzer.

$$\mathrm{w_j(RE)} = \frac{(\mathrm{n-p_j+1})^{\mathrm{p}}}{\sum_{\mathrm{k=1}}^{\mathrm{n}}(\mathrm{n-p_k+1})^{\mathrm{p}}} \tag{7}$$

Burada p_j j'nin derecesidir ve p, ağırlıkları tanımlayan parametredir, j = 1, 2, ..., n.
RR yöntemi, ölçüt sıralamasının normalleştirilmiş karşılığını kullanır. Denklem (8) ile ifade edilebilir.

$$w_j(RR) = \frac{1/p_j}{\sum_{k=1}^{n}(1/k)} \tag{8}$$

Burada p_j j. kriterin sıralamasıdır, j=1, 2, .., n.

2.3.3. Alternatiflerin önceliklendirilmesi

Alternatiflerin değerlendirilmesinde MULTIMOORA yöntemi kullanılmıştır. MULTIMOORA 2010 yılında Brauers, Zavasdkas tarafından ortaya konulmuş olup, "Moora oran", "Moora referans noktası", "Moora tam çarpım formu" yaklaşımlarının bütünleşik bir değerlendirmesidir. Yöntem birbirinden farklı ölçüm birimleri olan kriterleri bir arada değerlendirerek en iyi alternatifi seçmeye imkân sağlamaktadır (Maghsoodi vd., 2018; Odu vd., 2019; Hafezalkotob ve Hafezalkotob, 2016; Hafezalkotob vd., 2019).

MULTIMOORA yönteminde ilk olarak i= 1, 2, … m alternatif sayısı, j= 1, 2, … n kriter sayısı ile karar matrisi oluşturulmaktır.

$$\begin{matrix} x_1(1) & \cdots & x_1(n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_m(1) & \cdots & x_m(n) \end{matrix}$$

İzleyen adımda karar matrisi normalleştirilirir. Normalizasyon matrisi, kriterlerin her bir alternatifin karelerinin toplamının karekökünе bölünmesiyle elde edilir. Bu işlem Denklem (9) ile elde edilir. X_{ij}^{*}; i. alternatif, j. kriter değerinin normalleştirilmiş halidir.

$$X_{ij}^{*} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij^2}}} \tag{9}$$

Normalizasyon işleminden sonra sütundaki kriterler değerlendirilerek maksimum veya minimum olmalarına göre toplanır ve toplanan minimum kriter değerleri toplanan maksimum kriter değerlerinden çıkarılır. Özetle, Denklem (10)'daki gibi ifade edilebilir; j=1, 2, 3, …, g maksimize edilen kriterler ve i=1, 2, 3, …, n minimize edilen kriterlerdir.

$$y_i^{*} = j = 1gx_{ij}^{*} - j = g + 1nx_{ij}^{*} \tag{10}$$

Önemlilik katsayısı veya niteliklerin önem ağırlıkları oran sistemine eklenebilir. Denklem (10), (11) ve (12) gibi Genişletilmiş Oran Sistemine uyarlanabilir.

$$y_i^{w} = \sum_{j=1}^{g} s_j x_{ij}^{*} - \sum_{j=g+1}^{n} s_j x_{ij}^{*} \tag{11}$$

$$y_i^{ew} = \sum_{j=1}^{g} w_j^{*} x_{ij}^{*} - \sum_{j=g+1}^{n} w_j^{*} x_{ij}^{*} \tag{12}$$

y_i^{w} ve y_i^{ew} sırasıyla ağırlıklı ve entropi ağırlıklı oran sistemleri için tüm özniteliklerle ilgili olarak i. alternatifin belirlenen değerlerini ifade eder.

Optimal alternatif değerleri Denklem (13) ve (14)'e göre tanımlanabilir.

$$A_{WRS}^{*} = \{A_i | max_i y_i^{w}\} \tag{13}$$

$$A_{EWRS}^{*} = \{A_i | max_i y_i^{ew}\} \tag{14}$$

Alternatiflerin optimizasyon değerleri büyükten küçüğe sıralanır ve en iyi alternatife karar verilir. En yüksek puana sahip alternatif en iyi alternatif, en düşük puana sahip alternatif ise en kötü alternatif olarak kabul edilir.

Genişletilmiş referans noktası yaklaşımı, Denklem (15-16)'da verilen subjektif ve genel Shannon entropi ağırlıkları aracılığıyla geliştirilebilir.

$$z_i^{w} = max_j \left| s_j r_j - s_j x_{ij}^{*} \right| \tag{15}$$

$$z_i^{ew} = max_j \left| w_j r_j - w_j x_{ij}^{*} \right| \tag{16}$$

Ağırlıklı ve entropi ağırlıklı referans noktası yaklaşımlarının optimal alternatiflerini belirlemek için alternatifler Denklem (17-18)'de gösterildiği gibi küçükten büyüğe sıralanır.

$$A_{WRP}^{*} = \{A_i | min_i z_i^{w}\} \tag{17}$$

$$A_{EWRP}^{*} = \{A_i | min_i z_i^{ew}\} \tag{18}$$

Genişletilmiş tam çarpım formu, MULTIMOORA yönteminin üçüncü kısmı Denklem (19)'a göre belirlenebilir; burada g maksimize edilecek kriteri ve (n-g) minimize edilecek kriteri gösterir.

$$u_i^w = \frac{\prod_{j=1}^{g}\left(x_{ij}^*\right)^{s_j}}{\prod_{j=g+1}^{n}\left(x_{ij}^*\right)^{s_j}} \quad (19)$$

Normalleştirilmiş karar matrisi kullanılarak $u_i^{w\prime}nin$ eşdeğer bir formu Denklem (20)'ye göre hesaplanabilir.

$$u_i^{ew} = \frac{\prod_{j=1}^{g} {x_{ij}}^{w_j^*}}{\prod_{j=g+1}^{n} {x_{ij}^*}^{w_j^*}} \quad (20)$$

Her iki tekniğe dayalı en uygun alternatifler Denklem (21-22)'de verilmiştir.

$$A_{WMF}^* = \{A_i | max_i u_i^w\} \quad (21)$$

$$A_{EWMF}^* = \{A_i | max_i u_i^{ew}\} \quad (22)$$

Duyarlılık analizi, çözümleme sürecinde meydana gelen tercihlerdeki küçük değişikliklere veya parametreler için alınan değerlerdeki küçük değişikliklere karşı çözümün kararlılığı veya davranışı olarak tanımlanmaktadır (Mukhametzyanov ve Pamucar, 2018). Kriter ağırlıklarının değişimine dayalı duyarlılık analizi, farklı sıralama yöntemlerinden elde edilen sonuçların MULTIMOORA'da yeniden hesaplanması ile gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular

Literatür taramasına dayalı olarak (Tablo 1), c1 ve c3 kriterlerinin pozitifleştirilmesi sürecinden sonra karar matrisi (Tablo 2) elde edilmiştir.

Tablo 2. Karar Matrisi

İnorganik malzeme	Erime Noktası Değişimi (%)	Gizli Isı Değişimi (%)	Termal İletkenlik Değişimi (%)	Ön İşlem Gereksinimi	Toksisite	Maliyet ($)
CuO	0,00	68,62	0,01	5	7	33,00
Al_2O_3	0,27	67,40	2,49	7	6	14,00
Ag	1,28	84,85	0,08	8	9	150,00
TiO2	0,07	72,62	0,92	9	5	1,20
BN	2,32	70,65	0,75	9	2	106,00

Karar matrisi kullanılarak objektif ve subjektif yöntemlerle belirlenen kriter ağırlıklarının sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Objektif ve Subjektif Ağırlıklandırma Sonuçları (%)

Kriterler / Ağırlıklandırma yöntemi		Erime Noktası Değişimi	Gizli Isı Değişimi	Termal İletkenlik Değişimi	Ön İşlem Gereksinimi	Toksisite	Maliyet
Entropi		33,6	0,2	28,5	1,1	12,2	24,5
Sıralama	Sıra Toplamı	28,6	4,8	9,5	23,8	14,3	19,0

Tablo 3 (Devam). Objektif ve Subjektif Ağırlıklandırma Sonuçları (%)

Kriterler / Ağırlıklandırma yöntemi		Erime Noktası Değişimi	Gizli Isı Değişimi	Termal İletkenlik Değişimi	Ön İşlem Gereksinimi	Toksisite	Maliyet
Sıralama	Sıra Üssü	39,6	1,1	4,4	27,5	9,9	17,6
	Karşılıklı Sıra	6,8	40,8	20,4	8,2	13,6	10,2

Tablo 3'te gösterilen entropi ile ağırlıklandırma sonuçlarına göre en önemli kriter %33,6 ile erime noktası değişimi (c1) olarak belirlenmiştir. Sıralama yönteminde, sıra toplamı ve sıra üssü yöntemlerinin her ikisi için de c1 en önemli kriter iken, karşılıklı sıralama yöntemi için gizli ısı değişimi (c2) en önemli kriterdir. Kriter ağırlıklarının karar verme yöntemine etkisinin belirlenmesi objektif ve subjektif karşılaştırma yapılabilmesi için sırasıyla entropi ve sıralama yöntemine ait sonuçlar MULTIMOORA karar verme yönteminde kullanılmıştır.

MULTIMOORA (objektif ve subjektif ağırlıklar) yaklaşımıyla elde edilen alternatiflerin nihai sıralaması Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Ağırlıklı MULTIMOORA (Objektif Ve Subjektif Ağırlıklar) İçin Değerlendirme Sonuçları

Alternatif	Ağırlıklandırma Yöntemi	Oran Sistemi	Referans Noktası Yaklaşımı	Tam Çarpımsal Form	Nihai Sıralama
CuO		4	5	5	5
Al_2O_3		1	3	1	2
Ag	Entropi	5	2	4	4
TiO_2		3	4	3	3
BN		2	1	2	**1**
CuO		4	5	5	5
Al_2O_3		2	3	2	2
Ag	Sıra Toplamı	5	2	4	4
TiO_2		3	4	3	3
BN		1	1	1	**1**
CuO	Sıra üssü	5	5	5	5

Tablo 4 (Devam). Ağırlıklı MULTIMOORA (Objektif Ve Subjektif Ağırlıklar) İçin Değerlendirme Sonuçları

Alternatif	Ağırlıklandırma Yöntemi	Oran Sistemi	Referans Noktası Yaklaşımı	Tam Çarpımsal Form	Nihai Sıralama
Al_2O_3		2	3	2	2
Ag		3	2	4	3
TiO_2		4	4	3	4
BN		1	1	1	**1**

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, PCM özelliklerini ve performanslarını iyileştirmek için kullanılan inorganik bazlı nanomalzemeler ile yapılan mevcut çalışmalar ve MCDM yöntemleri kullanılarak yapılan çalışmalar incelenmiştir. Objektif ağırlıklandırma yöntemi olan entropi ve subjektif yöntem olarak sıralamaya göre belirlenen kriter ağırlıklandırma sonuçlarına göre "erime noktası"nın en önemli kriter olduğu görülmüştür. Subjektif ağırlık, doğrudan karar vericilerin yorumlarına ve mühendislik deneyimlerine dayalı olarak elde edilmiştir. Bunu takiben, bu iki kriter ağırlıklandırma yönteminin MULTIMOORA sıralama yöntemi üzerindeki etkisi incelenmiş ve entropi, sıra toplamı ve sıra üssü kriter ağırlıklandırmasını içeren MULTIMOORA uygulamasında "BN" en iyi alternatif olmuştur. Karşılıklı sıralama sonuçlarında ise, Al_2O_3 ilk sırada yer almıştır. Bu sonucun, ikinci yüksek ağırlık değerine sahip termal iletkenlik değişimi değerinin Al_2O_3 için yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan tüm uygulamalarda CuO en son tercih edilen alternatif olmuştur. MULTIMOORA yöntemi ile entropi ve sıralama kavramına dayanan bu çalışma, PCM'leri geliştirmek için uygun inorganik nanomalzemelerin seçilmesi alanında karar vermenin etkili bir yolunu sunar.

Katkı malzemelerinin PCM özellikleri üzerindeki etkileri, katkı malzemelerinin türü ve konsantrasyonu, amaçlanan uygulama ve istenen performans özellikleri dahil olmak üzere çok çeşitli faktörlere bağlıdır. Katkı malzemelerinin seçimi ve test edilmesi farklı konsantrasyonlar, farklı çalışma süreleri, farklı ön işlem gereksinimlerinde çalışmalara ihtiyaç duyar. Ayrıca bu nanomalzemelerin PCM tabanlı enerji depolama sistemlerini belirli sıcaklık aralıkları ve hacim değişikliği gereksinimlerine göre optimize etmek gereklidir. Bu çalışmanın amacı çok geniş bir kullanım alanına sahip PCM olarak kullanılan parafin vaksların inorganik nanomalzemeler ile geliştirilmesine yönelik genel bir görüş ortaya koymaktır. Elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışmaların sayısının azaltılması da hedeflenmektedir. MCDM çalışmasının sonunda 1. alternatif olarak BN en iyi sonuç iken, 2. Sırada Al_2O_3'in en iyi katkı malzemesi olduğu görülmesi, deneysel çalışmaların planlanması sürecinde sırasıyla bu iki malzemenin katkı malzemesi olarak öncelikli kullanım potansiyelini ortaya koymaktadır. Çalışmanın sınırları, bu makalede tartışılan kriterler ve alternatiflerle orantılıdır ve bunların daha da geliştirilme potansiyeli vardır. Gelecekteki araştırmalarda, inorganik ve organiklerin birlikte değerlendirilmesinin yanı sıra farklı MCDM yöntemlerinin uygulanması da ele alınabilir.

Teşekkür

Bu çalışma Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından 22ADP097 ve numaralı projeler kapsamında desteklenmiştir.

Referanslar

Al Ghossein, R. M., Hossain, M. S., & Khodadadi, J. M. (2017). Experimental determination of temperature-dependent thermal conductivity of solid eicosane-based silver nanostructure-enhanced phase change materials for thermal energy storage. International Journal of Heat and Mass Transfer, 107, 697-711. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.059

Aydın, A. A. (2010). The synthesis and thermal properties of novel organic phase change materials (PhD thesis). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Cárdenas, B., & León, N. (2013). High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. Renewable and sustainable energy reviews, 27, 724-737. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.028

Coetzee, D., Venkataraman, M., Militky, J., & Petru, M. (2020). Influence of nanoparticles on thermal and electrical conductivity of composites. Polymers, 12(4), 742. https://doi:10.3390/polym12040742

Das, D., Sharma, R. K., Saikia, P., & Rakshit, D. (2021). An integrated entropy-based multi-attribute decision-making model for phase change material selection and passive thermal management. Decision Analytics Journal, 1, 100011. https://doi.org/10.1016/j.dajour.2021.100011

Demir, G., & Arslan, R. (2022) Sensitivity Analysis in Multi-Criterion Decision-Making Problems. Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 24(3), 1025-1056. https://doi.org/10.1016/j.dajour.2021.100011

Fang, X., Fan, L. W., Ding, Q., Yao, X. L., Wu, Y. Y., Hou, J. F., ... & Hu, Y. C. (2014). Thermal energy storage performance of paraffin-based composite phase change materials filled with hexagonal boron nitride nanosheets. Energy conversion and management, 80, 103-109. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.016

George, M., Pandey, A. K., Abd Rahim, N., Tyagi, V. V., Shahabuddin, S., & Saidur, R. (2020). A novel polyaniline (PANI)/paraffin wax nano composite phase change material: Superior transition heat storage capacity, thermal conductivity and thermal reliability. Solar Energy, 204, 448-458. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.087

Huang, Z., Wang, C., Zhou, L., & Wu, C. (2021). Thermal conductivity enhancement and shape stability of phase-change materials using high-strength 3D graphene skeleton. Surfaces and Interfaces, 26, 101338. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101338

Javadi, F. S., Metselaar, H. S. C., & Ganesan, P. (2020). Performance improvement of solar thermal systems integrated with phase change materials (PCM), a review. Solar Energy, 206, 330-352. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.106

Jeng, H. A., & Swanson, J. (2006). Toxicity of metal oxide nanoparticles in mammalian cells. Journal of Environmental Science and Health Part A, 41(12), 2699-2711. https://doi.org/10.1080/10934520600966177

Jiang, G., Huang, J., Fu, Y., Cao, M., & Liu, M. (2016). Thermal optimization of composite phase change material/expanded graphite for Li-ion battery thermal management. Applied Thermal Engineering, 108, 1119-1125. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.197

Kaviarasu, C., & Prakash, D. (2016). Review on Phase Change Materials with Nanoparticle in Engineering Applications. Journal of Engineering Science & Technology Review, 9(4).

Kibria, M. A., Anisur, M. R., Mahfuz, M. H., Saidur, R., & Metselaar, I. H. S. C. (2015). A review on thermophysical properties of nanoparticle dispersed phase change materials. Energy conversion and management, 95, 69-89. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.028

Kuziel, A. W., Dzido, G., Turczyn, R., Jędrysiak, R. G., Kolanowska, A., Tracz, A., ... & Boncel, S. (2021). Ultra-long carbon nanotube-paraffin composites of record thermal conductivity and high phase change enthalpy among paraffin-based heat storage materials. Journal of Energy Storage, 36, 102396. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102396

Lin, S. C., & Al-Kayiem, H. H. (2016). Evaluation of copper nanoparticles–Paraffin wax compositions for solar thermal energy storage. Solar Energy, 132, 267-278. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.004

Luo, Y., Xiong, S., Huang, J., Zhang, F., Li, C., Min, Y., ... & Liu, Y. (2021). Preparation, characterization and performance of paraffin/sepiolite composites as novel shape-stabilized phase change materials for thermal energy storage. Solar Energy Materials and Solar Cells, 231, 111300. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111300

Mohamed, N. H., Soliman, F. S., El Maghraby, H., & Moustfa, Y. M. (2017). Thermal conductivity enhancement of treated petroleum waxes, as phase change material, by α nano alumina: Energy storage. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 70, 1052-1058. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.009

Nazari, M. A., Maleki, A., Assad, M. E. H., Rosen, M. A., Haghighi, A., Sharabaty, H., & Chen, L. (2021). A review of nanomaterial incorporated phase change materials for solar thermal energy storage. Solar Energy, 228, 725-743. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.051

Pamučar, D., & Ćirović, G. (2015). The selection of transport and handling resources in logistics centers using Multi-Attributive Border Approximation area Comparison (MABAC). Expert systems with applications, 42(6), 3016-3028. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.057

Park, S., Lee, Y. K., Jung, M., Kim, K. H., Chung, N., Ahn, E. K., ... & Lee, K. H. (2007). Cellular toxicity of various inhalable metal nanoparticles on human alveolar epithelial cells. Inhalation toxicology, 19(sup1), 59-65. https://doi.org/10.1080/08958370701493282

Shahid, U. B., & Abdala, A. (2021). A critical review of phase change material composite performance through Figure-of-Merit analysis: Graphene vs Boron Nitride. Energy Storage Materials, 34, 365-387. https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.10.004

Sheng, N., Zhu, R., Dong, K., Nomura, T., Zhu, C., Aoki, Y., ... & Akiyama, T. (2019). Vertically aligned carbon fibers as supporting scaffolds for phase change composites with anisotropic thermal conductivity and good shape stability. Journal of Materials Chemistry A, 7(9), 4934-4940.6 https://doi.org/10.1039/C8TA11329G

Tony, M. A. (2021). Recent frontiers in solar energy storage via nanoparticles enhanced phase change materials: Succinct review on basics, applications, and their environmental aspects. Energy Storage, 3(4), e238. https://doi.org/10.1002/est2.238

Ulus, H. (2021). The impact of seawater aging on basalt/graphene nanoplatelet-epoxy composites: performance evaluating by Dynamic Mechanical Analysis (DMA) and short beam shear (sbs) tests. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(1), 412-419. https://doi: 10.28948/ngumuh.791161

Wang, J., Xie, H., Guo, Z., Guan, L., & Li, Y. (2014). Improved thermal properties of paraffin wax by the addition of TiO2 nanoparticles. Applied Thermal Engineering, 73(2), 1541-1547. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.078

Wang, J., Li, Y., Zheng, D., Mikulčić, H., Vujanović, M., & Sundén, B. (2021). Preparation and thermophysical property analysis of nanocomposite phase change materials for energy storage. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 151, 111541. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111541

Wei, G., Wang, G., Xu, C., Ju, X., Xing, L., Du, X., & Yang, Y. (2018). Selection principles and thermophysical properties of high temperature phase change materials for thermal energy storage: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81, 1771-1786. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.271

Yang, K., Zhu, N., Chang, C., Wang, D., Yang, S., & Ma, S. (2018). A methodological concept for phase change material selection based on multi-criteria decision making (MCDM): A case study. Energy, 165, 1085-1096. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.022

Zavadskas, E. K., & Podvezko, V. (2016). Integrated determination of objective criteria weights in MCDM. International Journal of Information Technology & Decision Making, 15(02), 267-283. https://doi.org/10.1142/S0219622016500036

Zhao, B., Wang, Y., Wang, C., Zhu, R., Sheng, N., Zhu, C., & Rao, Z. (2021). Thermal conductivity enhancement and shape stabilization of phase change thermal storage material reinforced by combustion synthesized porous Al2O3. Journal of Energy Storage, 42, 103028. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103028

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development
UMAGD, (2023) 15(3), s166-s178.
10.29137/umagd.1340206
Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:3 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue
Araştırma Makalesi / Research Article

Farklı Beton ve Çelik Sınıfı Kullanımının Yapıların Zaman Tanım Alanında Analiz Sonuçlarına Etkilerinin İncelenmesi (Ocak 2020 Elazığ Depremi Örneği)

Analysis of the Effects of Utilizing Different Concrete and Steel Grades on the Temporal Response of Structures: A Case Study of the January 2020 Elazığ Earthquake

Nazan Yeniçelik[1], Şule Bakırcı Er*[1], Eda Avanoğlu Sıcacık[2]

[1]Kirikkale Unv. Muh. ve Mim, Fak. Insaat Muh. Bolumu, 71450, Yahsihan/Kirikkale, TURKIYE
[2]Gazi Unv. Teknoloji Fak. Insaat Muh. Bolumu, 06500 Teknikokullar Yenimahalle Ankara, TURKIYE

***Başvuru/Received**: 15/08/2022* ***Kabul / Accepted**: 22/09/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Öz

Ülkemiz aktif fayların bulunduğu bir deprem ülkesidir. Deprem bir doğa olayıdır ancak depremden kaynaklanan yapısal hasarları azaltmak veya ortadan kaldırmak mümkündür. Ülkemizde ağır maddi, manevi kayıpların yaşandığı depremler olmuştur. Acı tecrübeler neticesinde yapısal anlamda pek çok iyileşme olmasına rağmen projelendirme, uygulama noktalarında hala eksiklikler mevcuttur. Elazığ Sivrice'de 24 Ocak 2020'de 6.8 aletsel büyüklüklü bir deprem yaşanmıştır. Deprem sonrası yapılar incelendiğinde beton dayanımlarının düşük olduğu, sargılama donatılarının yetersizliği, düz donatı kullanımı ve yetersiz bindirme boyu dikkat çekicidir. Binalar arasında yeterli miktarda derz bırakılmamış ve giriş katlarda yeterince dolgu duvar olmaması nedeniyle yumuşak katlar oluşmuştur.

Bu çalışmada betonarme çerçeve sistemli bir bina modeli incelenmiş, farklı beton dayanımı ve donatı sınıfları ile 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği kullanılarak analizler yapılmıştır. SAP 2000 sonlu elemanlar programı yardımıyla Zaman Tanım Alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Seçilen ana parametreler; beton sınıfı ve donatı sınıfıdır. Yapının taban kesme kuvvetleri, tepe noktası yer değiştirmeleri elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler

"Elazığ depremi, dinamik analiz, türkiye bina deprem yönetmeliği, zaman tanım alanında analiz"

Abstract

Our country is an earthquake country with active faults. Earthquake is a natural event, but it is possible to reduce or eliminate structural damage caused by an earthquake. There have been earthquakes in our country where heavy pecuniary and moral losses have been experienced. Although there are many structural improvements as a result of bitter experiences, there are still deficiencies in project design and applications. On January 24 in 2020, an instrumental magnitude of 6.8 earthquake was experienced in Elazig Sivrice. When the post-earthquake structures are examined, it is remarkable that the concrete strengths are low, the inadequacy of the wrapping reinforcement, the use of flat reinforcement and the insufficient overlap length. There were not enough gaps between the buildings and soft floors were formed due to the lack of sufficient infill walls on the ground floors.

In this study, a building model with a reinforced concrete frame system was examined, and analyzes were made using the 2018 Turkish Building Earthquake Code with different concrete strength and reinforcement classes. Analyzes were carried out in the Time History Method by the help of the SAP 2000 finite element program. Selected main parameters are concrete class and reinforcement class. Base shear forces and peak displacements were obtained and compared.

Key Words

"Elazığ earthquake, dynamic analysis, turkish building earthquake code, time history analysis "

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

1. Giriş

24 Ocak 2020'de Elazığ Sivrice'de 6.8 şiddetinde bir deprem meydana gelmiştir. Depremin odak derinliği 5 km'dir. Elazığ ili ve ilçeleri, Doğu Anadolu, Güney Doğu Anadolu, Orta Anadolu ve Karadeniz bölgelerinde deprem hissedilmiştir. Doğu Anadolu fay zonu içerisinde oluşmuştur (B.Ü. Kandilli basın bülteni, 2020). Depremin etki süresi 20.3 sn'dir. Depreme neden olan fay uzunluğu 40 km'dir. Ağır hasarlı veya yıkılan yapıların deprem göz önüne alınmadan inşa edildikleri düşünülmektedir (T.C. İçişleri Bakanlığı Sivrice Depremi Ön Değ. Rap,2020).

Bu depremde 41 kişi hayatını kaybetmiş ve 1607 kişi yaralanmıştır. Yapıların hasar durumu ise şöyledir:547 bina tamamen yıkılmış, 6270 bina ağır hasarlı, 962 bina orta hasarlı ve 10273 bina az hasarlıdır. Depremin en çok hissedildiği yerler Elazığ ve Malatya'dır (M.T.A. Sivrice Dep. Saha Göz. ve Değ. Raporu, 2020). Elazığ Sivrice 2020 depremine ait fotoğraflar Şekil 1 Şekil 2 de verilmiştir.



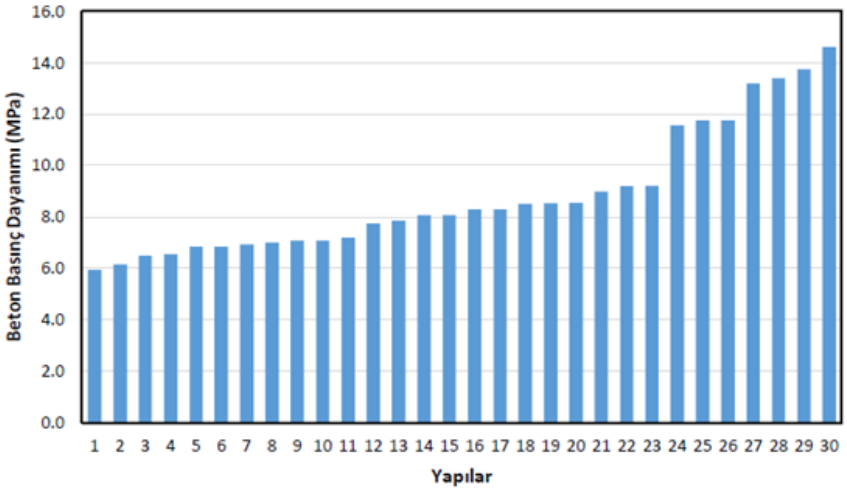
Şekil 1. Elazığ Sivrice Gezin'de yıkılan Mavigöl Apartmanı a) Depremden önce, b) Depremden sonra c) Enkaz kaldırma çalışmaları (M.T.A. Sivrice Dep. Saha Göz. ve Değ. Raporu, 2020).

Sivrice ilçesi diri fay üzerindedir. Bu nedenle de çok hasar aldığı düşünülmektedir (M.T.A. Sivrice Dep. Saha Göz. ve Değ. Raporu, 2020).



Şekil 2. Sivrice Merkez'de Hasarlı Yapılar (Hacettepe Unv Sivrice Dep. Ön İnceleme Rap, 2020)

Yapılan incelemelerde hasarların daha çok yumuşak kat düzensizliği ve yapılar arasında yetersiz boşluk bırakılmasından kaynakladığı belirlenmiştir. Bu durum daha çok giriş katları işyeri olarak kullanılan kat yüksekliği fazla dolgu duvarları olmayan kısımlarda gözlenmiştir. Bu kat kolonlarında ağır hasarlar belirlenmiştir. Yapılardaki kusurlar düşük beton kalitesi, düz donatı, yetersiz etriye sıklığı, kolonlarda yetersiz bindirme boyu olarak sayılabilir. Kolon ve kiriş birleşimlerinde etriye sıklaştırmalarının yapılmadığı, bu nedenle yapılarda yeteri kadar enerji sönümleme sağlanamadığı belirlenmiştir. Bölge eskiden beri depremlerin olduğu bir bölge olduğundan yapılarda fazla kolon ve perde kullanılmıştır. Bu durumun binalar üzerinde olumlu etkisi olmuştur. Deprem bölgesinde 30 binadan numuneler alınarak beton dayanımı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu binalar yıkılan veya ağır hasar alan yapılardır. Ortalama basınç dayanımı 8 MPa olarak belirlenmiştir (Şekil 3.) (Sakarya Uyg. Bil. Ünv. DAMER Sivrice Dep. İnce. ve Değ. Rap, 2020).



Şekil 3. Karot Alınan Yapıların Ortalama Beton Dayanım Sonuçları (Sakarya Uyg. Bil. Ünv. DAMER Sivrice Dep. İnce. ve Değ. Rap, 2020).

Bu çalışmada betonarme çerçevelerden oluşan bir yapı modeli ele alınmış, AFAD Deprem Tehlike Haritası'ndan deprem bölgesi seçilmiş ve Elazığ Ocak 2020 kayıtları ele alınarak farklı beton ve çelik sınıfları kullanılarak modeller oluşturulmuş ve Zaman Tanım Alanında Lineer Olmayan analizler yapılmıştır (Koçak, 2020)

Literatürde ülkemizdeki son iki deprem yönetmelikleri (DBYBHY 2007 ve TBDY 2018) kullanılarak/karşılaştırarak yapılan çalışmalar mevcuttur. Ancak bu çalışmaların artırılabileceği ve geliştirilebileceği düşünülmektedir.

Aydemir ve Jakayev (2019) çalışmalarında Seismostruct programını kullanarak 7 adet deprem kaydını yapıya yatay ve yatay+düşey uygulamışlardır. Düşey deprem kuvveti kolon eksenel ve kesme kuvvetini artırmış, kat ötelenmeleri ve toplam yapısal deplasmanda önemli farklılıklar belirlenmemiştir. Nemutlu ve Sarı (2019), 2018 Bina Deprem Yönetmeliği ile Amerikan IBC (İnternational Building Code) ve ASCE -16 yönetmelikleri karşılaştırmışlardır. Tünel kalıp ve perde-çerçeve sistemler üzerine modal analizler yapılmıştır. Taban kesme kuvvetlerinin 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine göre yapılan analizlerde daha büyük olduğu belirlenmiştir. Yavaş ve diğerleri (2019) çalışmalarında düşey doğrultuda olmayan kolonun bulunması durumu incelenmiştir. Deprem analizleri yapılarak kolonun düşeyden sapmasına bağlı olarak kritik normal kuvvetler ve momentler karşılaştırılmıştır. Kurt ve Tonyalı (2020), düzlem çerçeveli betonarme bir yapının performansa dayalı tasarımını artımsal statik itme analizini kullanarak incelemişlerdir. Artımsal statik itme analizi DD-2 düzeyi için uygulanmıştır. Keskin ve Bozdoğan (2018) Kırklareli il merkezi için 2007 ve 2018 Türk Deprem Yönetmeliklerini dikkate alarak farklı zemin sınıfları için Yatay Elastik tasarım spektrumları elde etmişlerdir. Farklı zemin sınıfları için 4 katlı yapının deprem analizleri bu iki yönetmelikle yapılıp karşılaştırılmıştır. Tunç ve Tanfener (2016) çalışmalarında 2007 ve 2018 Deprem Yönetmelikleri arasındaki tasarımsal farklılıklar örnek yapı üzerinde analizler yapılarak incelenmiştir. Adar'ın (2019) tez çalışmasında 13 katlı bir yapı 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerine göre analiz edilmiştir. 2018 Deprem Yönetmeliği incelenmiş ve yenilikler belirtilmiştir. Bu yönetmeliklere göre farklılıklar çizelgeleştirilerek yorumlanmıştır. Hamsici (2019) yüksek lisans tez çalışmasında 2018 Deprem Yönetmeliğine göre yapı konumu ve zemin durumu farklılıklarının en büyük göreli kat ötelenmesi ve taban kesme kuvveti değişiklikleri açısından incelemiştir. 2007 ve 2018 yönetmelikleriyle analizler yapılmıştır. Taban kesme kuvvetinin kat sayısının artmasıyla yeni yönetmelikte eskiye göre daha düşük olduğu, maksimum etkin kat ötelenmelerinin yeni yönetmelikte eski yönetmeliğe göre çok daha büyük olduğu belirlenmiştir. Erdem ve Biçke (2017) yönetmeliklerde sınırlandırılan maksimum göreli kat ötelenmelerini 2007 ve taslak yönetmelik 2016 açısından incelemişlerdir. Taslak yönetmelikte izin verilen göreli kat öteleme sınırlarının, dolgu duvar – çerçeve bağlantısının derzli durumda derzsiz durumdan iki kat fazla olduğu belirlenmiştir. Koçer ve arkadaşları (2018) çalışmalarında 2007 2018 deprem yönetmelikleriyle spektral ivme değerleri ile zemin hâkim periyotlarını incelemişlerdir. Bu değerleri risk durumunu dikkate alarak farklı il ve zemin sınıfları için incelemişlerdir. Bu bölgelerle sınırlı olan çalışma sonucunda genel olarak zayıf zemin gruplarında TBDY 2018'in TDY 2007'ye göre daha güvenli kaldığı tespit edilmiştir. Çolak ve arkadaşları (2019) çalışmalarında çok katlı yapıların periyotlarını hesaplamak amacıyla SAP 2000 programı kullanılarak yapı

modelleri üzerinde analizler yaparak elde edilen hakim periyotlarla teorik ve nümerik sonuçları değerlendirmişler ve sonuçların kabul edilebilir yakınsaklıkta olduğuna ulaşmışlardır.

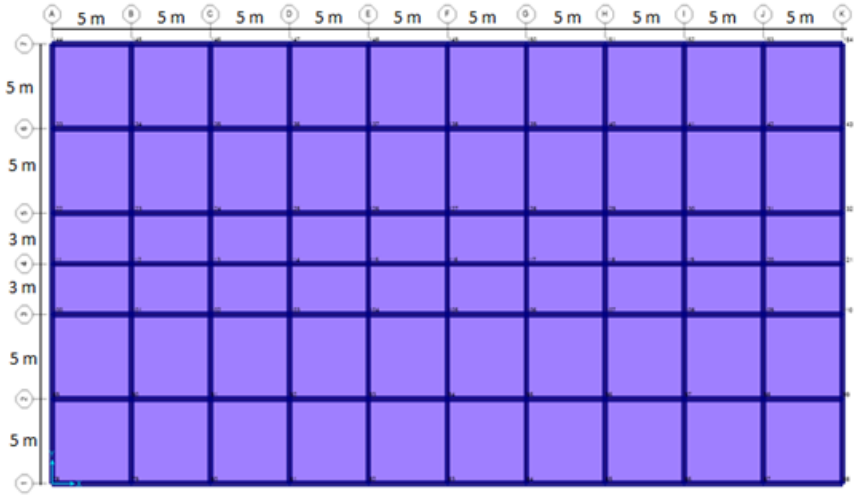
2. Materyal ve Metod

Çalışmada şekil 4'te verilen, betonarme çerçeveli 5 katlı bir bina modeli incelenmiştir. Ele alınan beton sınıfları C12, C20, C25 ve C30 dur. Donatılar S220 ve S420 sınıfıdır. Model isimlerinde ilk harf ve rakamlar beton sınıfını, ikinci harf ve rakamlar çelik sınıfını göstermektedir. Analizlerde SAP 2000 programı yardımıyla Zaman Tanım Alanında Analiz Yöntemi ile lineer olmayan analiz yapılmıştır.

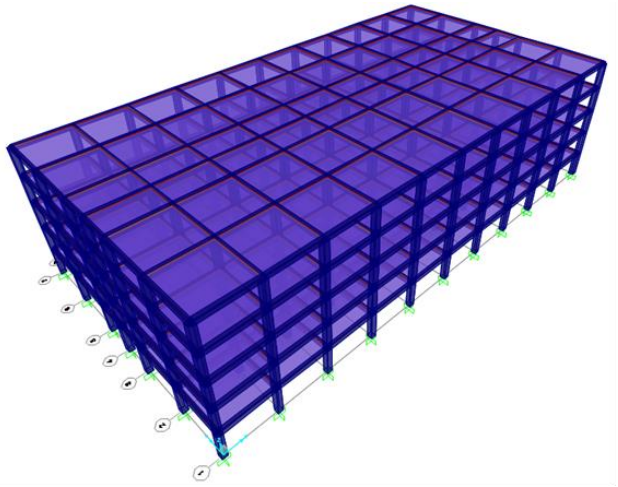
2.1. Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi

Bu yöntemde gerçek veya üretilmiş bir deprem kaydı kullanılmalıdır. Geçmiş depremlerin ivme kayıtları önemli yer tutar. World Data Center for Solid Earth Geophysics ve PEER (Pasific Erthquake Engineering Research Center) dünyada oluşan deprem kayıtlarını saklayan önemli merkezlerdir. Ülkemizde deprem kayıtları AFAD'da mevcuttur. Boyutlama için deprem kaydının esas alınması, hesapta dikkate alınan deprem büyüklüğü, merkez üssü ve odak uzaklığı, kaynak mekanizması ve zemin özelliklerinin gerçek durumla iyi bir uyuşum için tercih edilmektedir. Deprem kaydı bulunmuyorsa, deprem hareketi rastgele bir titreşim kabul edilerek yapay deprem kayıtları oluşturulur. Genellikle deprem hareketinin orta bölümü kararlı rastgele titreşim olarak alınır (Celep ve Kumbasar, 2000).

Betonarme çerçeve sistemin plan ve 3 boyutlu görünüşleri Şekil 4 ve Sekil 5.'te verilmiştir.



Şekil 4. Betonarme Çerçeve Sistemin Kalıp Planı



Şekil 5. Betonarme Çerçeve Sistemin 3 Boyutlu Görünüşü

Bu çalışmada Ocak 2020 Elazığ Sivrice depremi verileri kullanılarak analizler yapılmıştır. Analizlerde düşük ve normal beton dayanımları S220 ve S420 donatıları kullanılarak bu depremin bu yapılarda meydana getirdiği kat kesme kuvvetleri, tepe noktası yer değiştirmeleri ele alınan model için elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak Tablo ve grafikler halinde sunulmuştur.

2.2. Proje Parametreleri

İncelenen yapı 5 katlı ve bodrumsuzdur. Kat yüksekliği 3m olup toplam yapı yüksekliği 15 m'dir. Hareketli yük azaltması yapılmamıştır. Akslar x yönünde 5 m açıklıklı 10 adettir. y yönünde ise kenarlarda 5'er m lik ikişer aks ve ortada 3'er metrelik iki aks olmak üzere 6 adettir. Kolon boyutları 500x500 mm, kiriş boyuları ise 300x500 mm dir. İç duvarlar 10 cm genişlikli tuğla duvar, dış duvarlar ise 20 cm genişlikli tuğla duvardır. Döşeme kalınlığı 12 cm'dir. Her kata rijit diyafram atanmıştır. Kolon ve kirişlerin her iki ucuna plastik mafsal tanımlanmıştır. Analizlerde kullanılan zemin düşey yatak katsayısı 10000 kN/m^3 ve zemin emniyet gerilmesi 200 kN/m^2'dir. Deprem parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Deprem Parametreleri

Analiz Tipi	Doğrusal Olmayan Zaman Tanım Alanında Analiz
Kat Serbestlik Derecesi	X,Y ve Dönme
Birleşimlerdeki Rijit Bölgeler	%25 Azaltılacak
Deprem Yönetmeliği	TBDY 2018 (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği)
Bina Kullanım Amacı ve Türü	Okul
Mod Sayısı	5
Yerel Zemin Sınıfı	ZB
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD-2
Bina Kullanım Sınıfı (BKS)	1
Bina Önem Katsayısı (I)	1.5
Deprem Tasarım Sınıfı (DTS)	1a
Bina Yükseklik Sınıfı (BYS)	6
Süneklik Düzeyi	Yüksek
Taşıyıcı Sistem Tipi	A11
Taşıyıcı Sistem	Deprem Yüklerinin Tamamının Çerçevelerle Taşındığı Binalar
T.S.Davranış Katsayısı, (R)	8.0
Dayanım Fazlalığı Katsayısı (D)	3
Bina Kullanım Amacı ve Türü	Okul
Hareketli Yük Katılım Katsayısı (*n*)	0.60
Sönüm Oranı	0.05
Deprem Açısı	1-yönü 0.00 º 2-yönü 90.00 º

Tablo 2'de modellerde kullanılan beton ve çelik sınıfları verilmiştir.

Tablo 2. Modellerin Malzeme Bilgileri

	Beton Dayanım Sınıfı	Çelik Sınıfı
C12-S220	C12	S220
C20-S420	C20	S420
C25-S420	C25	S420
C30-S420	C30	S420

2.3. Elazığ-Sivrice Deprem Bilgileri

Analizlerde kullanılan aşağıda belirtilen veriler Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'ndan (AFAD) alınmıştır.

Girilen Veriler:

Yerel Zemin Sınıfı= ZB
Deprem Yer Hareketi Düzeyi = DD-2
Enlem = 38.3593
Boylam = 39.0634

Çıktılar:

S_S =1.604
S_1 =0.419
PGA =0.665
PGV =52.212

Yerel Zemin Sınıfı ZB ve S_S =1.604 için F_S =0.900
Yerel Zemin Sınıfı ZB ve S_1 =0.419 için F_1 =0.800

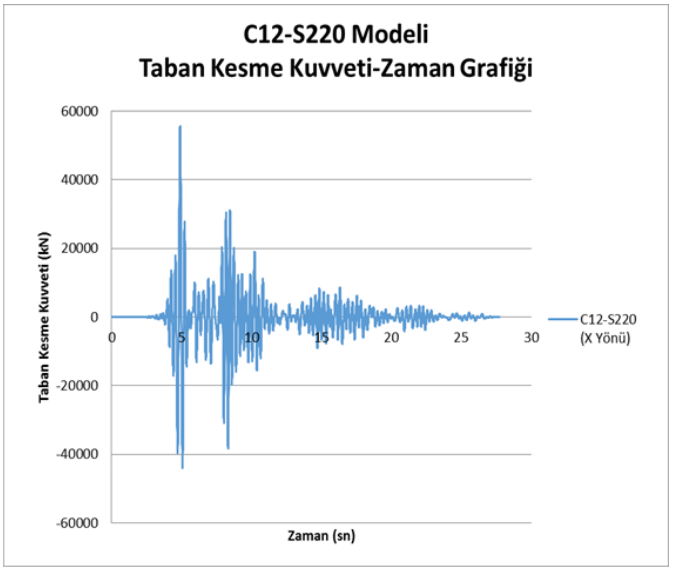
S_{DS}= S_S.F_S =1.604 x 0.900 =1.444
S_{D1}= S_1.F_1 =0.419 x 0.800 =0.335

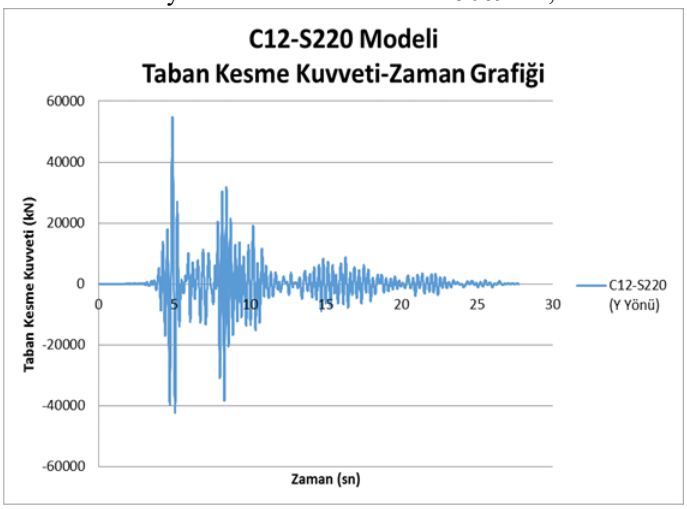
Yatay Elastik Tasarım Spektrumu
T_A =0.046 (s)
T_B =0.232 (s)
T_L =6.000 (s)

Düşey Elastik Tasarım Spektrumu
T_{AD} =0.015 (s)
T_{BD} =0.077 (s)
T_{LD} =3.000 (s)

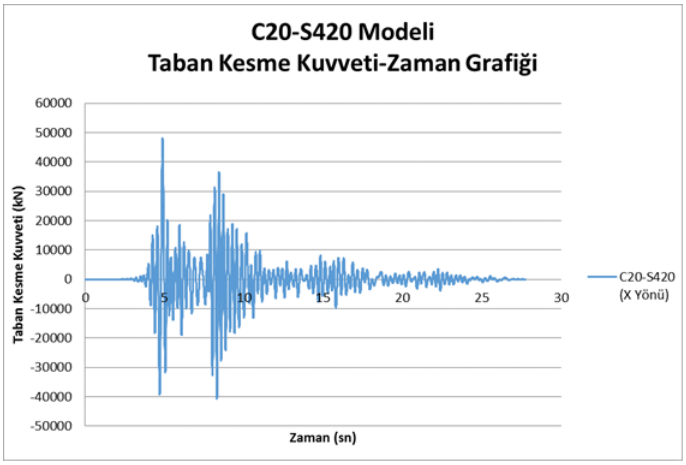
3. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

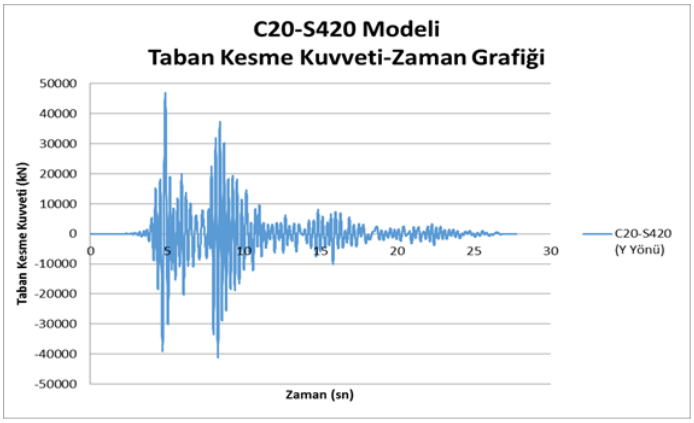
Modellerin X ve Y yönünden ayrı ayrı olmak üzere taban kesme kuvveti-zaman grafikleri elde edilmiştir. C12-S220 modeli için X doğrultusunda mutlak en büyük taban kesme kuvveti 55715.62 kN, mutlak en küçük taban kesme kuvveti 43924.2 kN, Y doğrultusu için ise mutlak en büyük taban kesme kuvveti 54762.23 kN , mutlak en küçük taban kesme kuvveti 42360.6 kN olarak elde edilmiştir. C20-S420 modeli için X doğrultusunda mutlak en büyük taban kesme kuvveti 48048.5 kN, mutlak en küçük taban kesme kuvveti 40643.6 kN, Y doğrultusu için ise mutlak en büyük taban kesme kuvveti 46917.99 kN, mutlak en küçük taban kesme kuvveti 41260.1 kN olarak elde edilmiştir. C25-S420 modeli için X doğrultusunda mutlak en büyük taban kesme kuvveti 45069 kN, mutlak en küçük taban kesme kuvveti 41964 kN, Y doğrultusu için ise mutlak en büyük taban kesme kuvveti 43852 kN, mutlak en küçük taban kesme kuvveti 42306 kN olarak elde edilmiştir. C30-S420 modeli için X doğrultusunda mutlak en büyük taban kesme kuvveti 40556.48 kN, mutlak en küçük taban kesme kuvveti 41878.6 kN, Y doğrultusu için ise mutlak en büyük taban kesme kuvveti 40680.76 kN, mutlak en küçük taban kesme kuvveti 41724.6 kN olarak elde edilmiştir. Modellere ait taban kesme kuvveti-zaman grafikleri şekil 6'da verilmiştir.

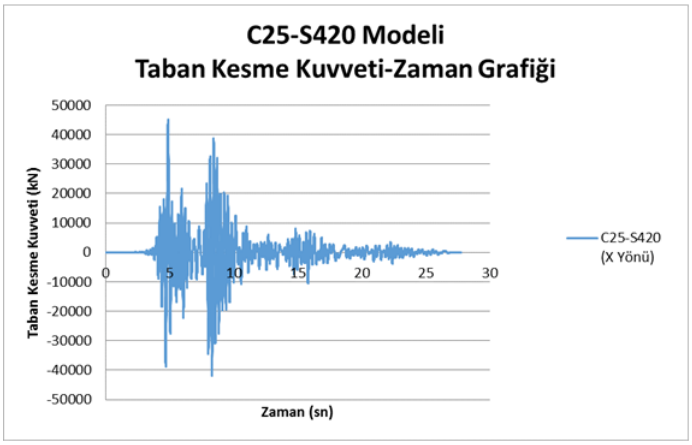


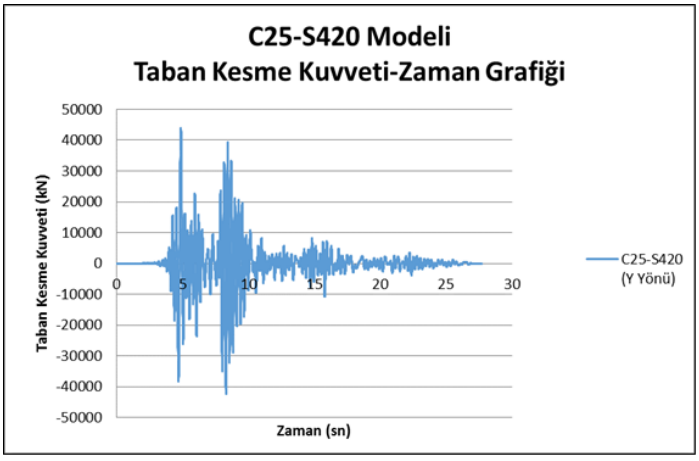


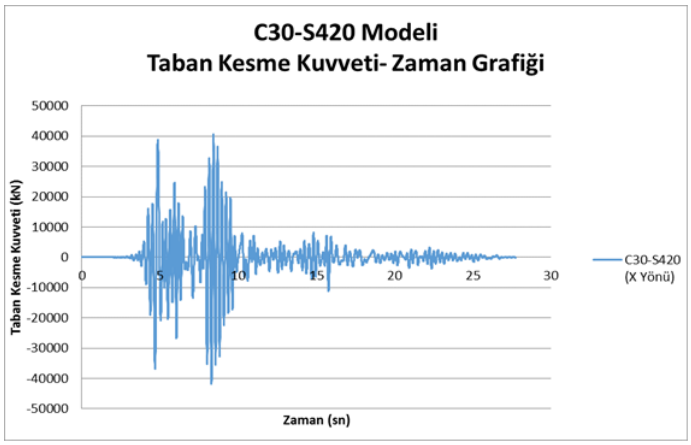
Şekil 6. Modellerin X ve Y Yönleri için Taban Kesme Kuvveti-Zaman Grafikleri

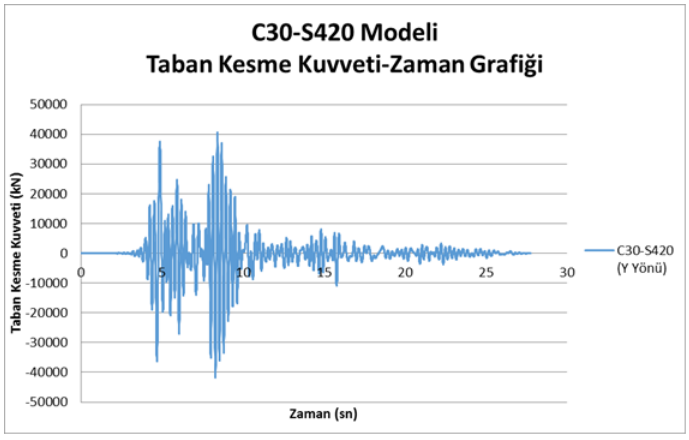












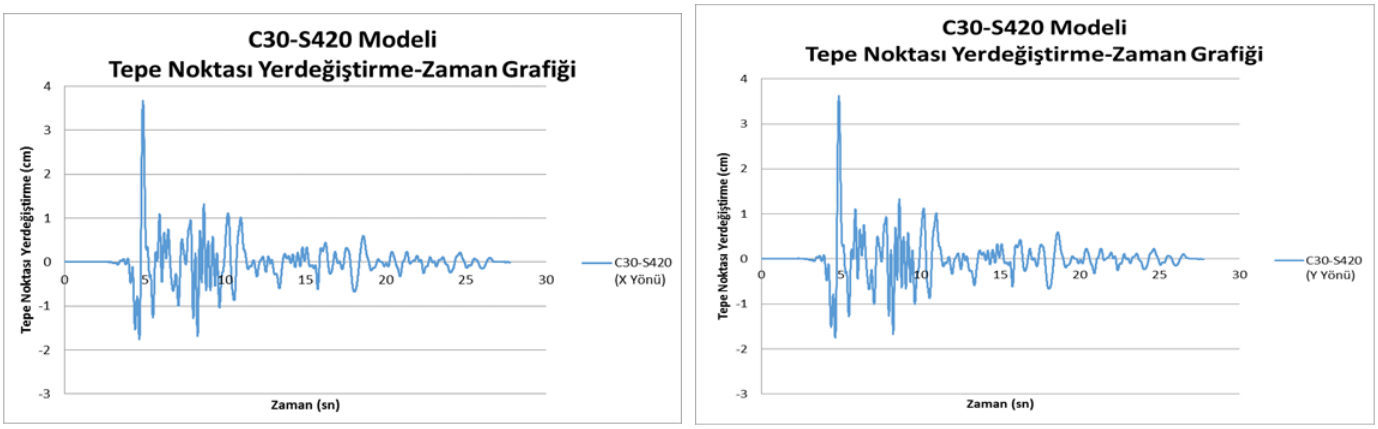
Şekil 6. Modellerin X ve Y Yönleri için Taban Kesme Kuvveti-Zaman Grafikleri (Devamı)

Modellerin tepe noktası yerdeğiştirme-zaman grafikleri elde edilmiştir. C12-S220 elemanında X doğrultusu için mutlak en büyük tepe noktası yerdeğiştirmesi 4.37 cm, mutlak en küçük tepe noktası yerdeğiştirmesi 1.64 cm belirlenmiştir. Y doğrultusu için mutlak en büyük tepe yerdeğiştirmesi 4.33 cm, mutlak en küçük tepe yerdeğiştirmesi 1.64 cm belirlenmiştir.C20-S420 elemanında X doğrultusu için mutlak en büyük tepe noktası 4.02 cm, mutlak en küçük tepe noktası yerdeğiştirmesi 1.72 cm belirlenmiştir. Y doğrultusu için mutlak en büyük tepe yerdeğiştirmesi 3.97 cm, mutlak en küçük tepe yerdeğiştirmesi 1.72 cm belirlenmiştir. C25-S420 elemanında X doğrultusu için mutlak en büyük tepe noktası 3.9 cm, mutlak en küçük tepe noktası yerdeğiştirmesi 1.74 cm belirlenmiştir. Y doğrultusu için mutlak en büyük tepe yerdeğiştirmesi 3.85 cm, mutlak en küçük tepe yerdeğiştirmesi 1.74 cm belirlenmiştir. C30-S420 elemanında X doğrultusu için mutlak en büyük tepe noktası 3.67 cm, mutlak en küçük tepe noktası yerdeğiştirmesi 1.76 cm belirlenmiştir. Y

doğrultusu için mutlak en büyük tepe yerdeğiştirmesi 3.62 cm, mutlak en küçük tepe yerdeğiştirmesi 1.76 cm belirlenmiştir. Modellere ait tepe noktası yerdeğiştirme-zaman grafikleri şekil 7 de verilmiştir.

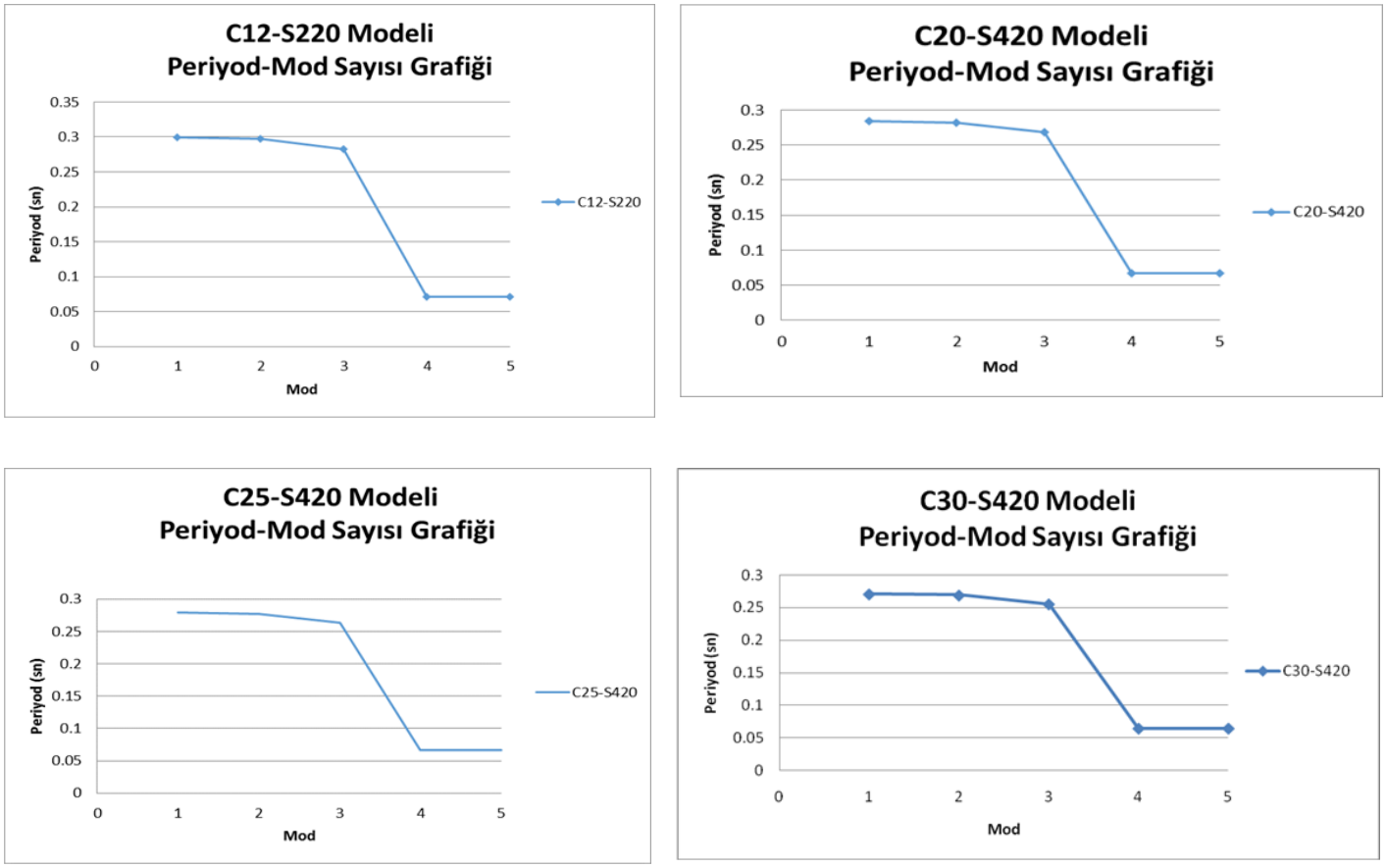


Şekil 7. Modellere Ait Tepe Noktası Yerdeğiştirme-Zaman Grafikleri



Şekil 7. Modellere Ait Tepe Noktası Yerdeğiştirme-Zaman Grafikleri (Devamı)

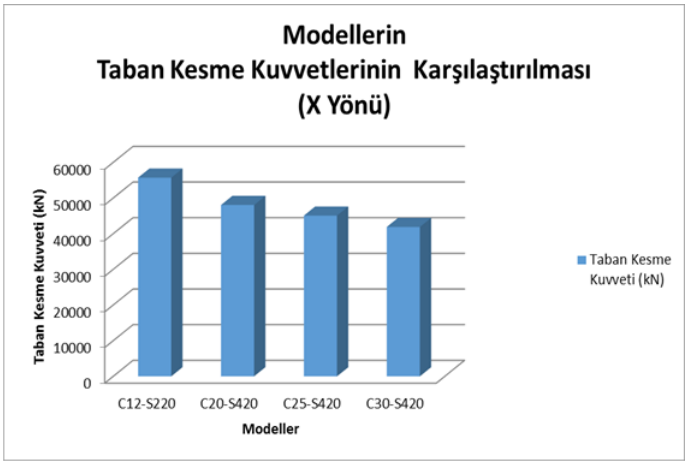
Modellerin modlara göre periyot grafikleri şekil 8'de verilmiştir.

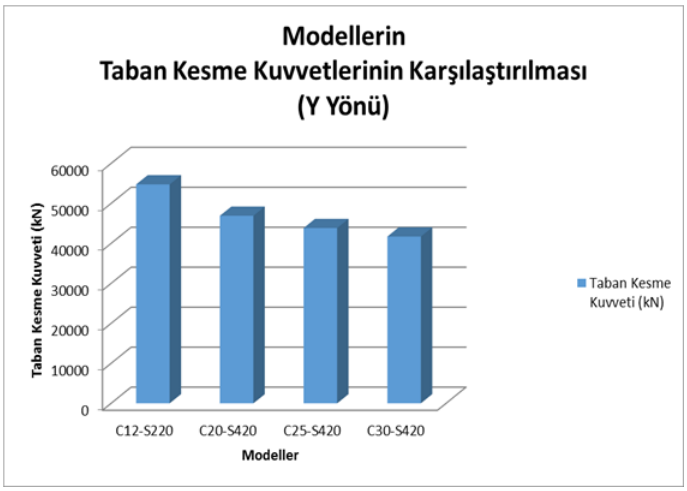


Şekil 8. Modellerin Modlara Göre Periyot Grafikleri

4. Analizlerin Değerlendirilmesi

Tüm modellerin mutlak en büyük taban kesme kuvvetleri X ve Y yönleri için Şekil 9 ve Tablo 3'te sunulmuştur . Beton dayanımı arttıkça taban kesme kuvvetinde azalmalar gözlenmiştir. C12-S220 modelinde hem beton hem donatı dayanımı diğer modellere göre daha düşüktür. Diğer üç modelde hem beton hem donatı dayanımı daha yüksektir. Beton ve donatı dayanımı arttıkça yapı daha da rijitleşmektedir. Bu nedenle taban kesme kuvveti azalmaktadır.



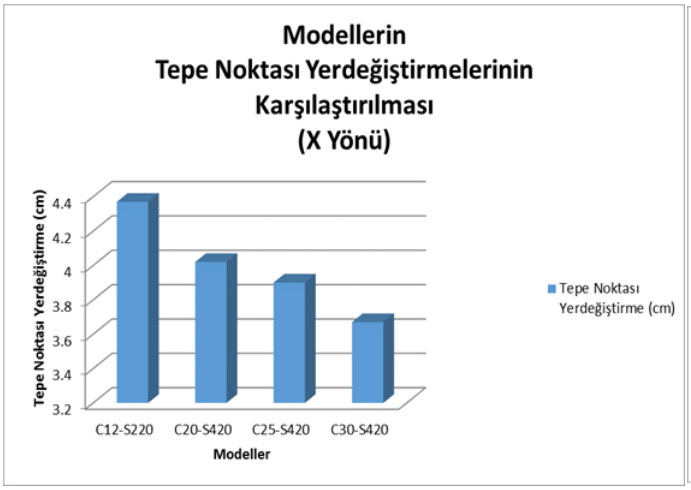


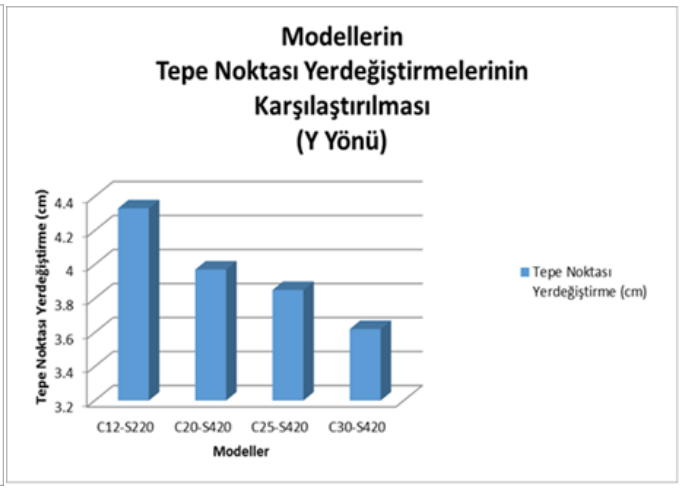
Şekil 9. Modellerin X ve Y Yönünde Mutlak En Büyük Taban Kesme Kuvvetleri

Tablo 3. Mutlak En Büyük Taban Kesme Kuvvetlerinin X ve Y Yönleri için Değişimi

Modeller	Mutlak en büyük taban kesme kuvveti (kN) X Yönü	Mutlak en büyük taban kesme kuvveti (kN) Y Yönü
C12-S220	55715.62	54762.23
C20-S420	48048.50	46917.99
C25-S420	45069.29	43852.42
C30-S420	41878.60	41724.60

Modellerin X ve Y yönünde mutlak en büyük tepe noktası yerdeğiştirmesi değerleri Şekil 10'da X ve Y yönleri için topluca verilmiştir. Beton ve donatı dayanımı arttıkça rijitlik arttığından tepe noktası yerdeğiştirmeleri azalmaktadır. Tablo 4'te de X ve Y yönü mutlak en büyük tepe noktası yerdeğiştirme değerleri incelenen her bir modele göre verilmiştir.

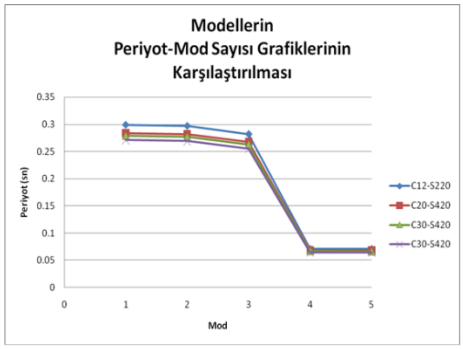




Şekil 10. Modellerin X ve Y Yönlerinde Mutlak En Büyük Tepe Noktası Yerdeğiştirmesi Grafikleri

Tablo 4. X ve Y Yönü Mutlak En Büyük Tepe Noktası Yerdeğiştirme Değerleri

Modeller	X Yönü Mutlak En Büyük Tepe Noktası Yerdeğiştirmeleri (cm)	Y Yönü Mutlak En Büyük Tepe Noktası Yerdeğiştirmeleri (cm)
C12-S220	4.37	4.33
C20-S420	4.02	3.97
C25-S420	3.90	3.85
C30-S420	3.67	3.62



Şekil 11. Mod Sayısına Karşılık Periyot Değerlerinin Karşılaştırılması

Modeller 5'er katlı oluşturulmuştur. Bu nedenle kat sayısı kadar mod sayısı seçilmiştir. Şekil 11'de bütün modellerin mod sayılarına karşı periyotları toplu olarak verilmiştir. Modellerde ilk 3 moddan sonra sonuçların birbirlerine yakın olduğu gözlenmiştir. Beton ve donatı dayanımı arttıkça başka bir ifadeyle rijitlik attıkça periyot değerleri azalmaktadır.

Tablo 5'te modlara karşı periyot değerleri sayısal olarak topluca verilmiştir. Bu tabloda beton ve çelik dayanım değerleri arttıkça periyod değerlerinin azaldığı gözlenmektedir.

Tablo 5. Modlara Karşı Periyot Değerleri

	Periyod Değerleri (sn)				
	1.Mod	2.Mod	3.Mod	4.Mod	5.Mod
C12-S220	0.299	0.297	0.282	0.071	0.071
C20-S420	0.284	0.282	0.268	0.068	0.068
C25-S420	0.279	0.277	0.263	0.067	0.066
C30-S420	0.271	0.269	0.255	0.064	0.064

5.Sonuçlar

Çalışmada Ocak 2020 yılında yaşanan Elazığ Sivrice Depremi ele alınmış ve gözlenen yapı kusurlarına dikkat çekilmiştir. Hasar gören yapılarda düşük beton dayanımı genel olarak karşılaşılan bir durumdur. Kullanılan donatılar düz yüzeylidir. Boyuna donatılarda yeterli bindirme boyu yoktur. Etriye aralıkları çok fazladır. Binaların fay hattı dikkate alınmadan inşaa edilmiş olması da hasarlardaki diğer bir etken olmuştur. Çalışmada ele alınan betonarme çerçeveli modelde SAP2000 programı kullanılarak Zaman Tanım Alanında Lineer Olmayan analiz yapılmıştır. Beton ve donatı sınıfı ele alınan başlıca parametreler olmuştur. Beton ve donatı dayanımının davranışı nasıl etkilediği belirlenmek istenmiştir. Analizlerde ele alınan beton sınıfları C12, C20, C25 ve C30 donatılar ise S220 ve S420 olarak seçilmiştir. Taban kesme kuvveti, tepe noktası yerdeğiştirmesi gibi değerlendirmeler yapılmıştır. Beton ve çelik sınıfının taban kesme kuvveti ve ötelenme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Beton basınç dayanımı ve donatı dayanımı arttıkça taban kesme kuvvetinin azaldığı gözlenmiştir. Beton basınç dayanımı 12 MPa'dan 30 MPa'a doğru artarken taban kesme kuvvetinde azalmalar olmuştur. X doğrultusundaki mutlak en büyük taban kesme kuvveti C12-S220 modelinden C30-S420 modeline gidildikçe yaklaşık %25 oranında bir azalma olduğu belirlenmiştir. Y doğrultusundaki mutlak en büyük taban kesme kuvveti ise C12-S220 modelinden C30-S420 modeline gidildikçe yaklaşık %31 oranında bir azalma gözlenmiştir
- Tepe noktası yerdeğiştirmelerinde de beton ve donatı dayanımları arttıkça, azalmalar tespit edilmiştir. X doğrultusundaki mutlak en büyük tepe yerdeğiştirmesinde C12-S220 modelinden C30-S420 modeline gidildikçe yaklaşık %19 oranında bir azalma olmuştur. Y doğrultusundaki mutlak en büyük tepe yerdeğiştirmesi ise C12-S220 modelinden C30-S420 modeline gidildikçe yaklaşık %20 oranında bir azalma belirlenmiştir. . Beton ve donatı dayanımı arttıkça kullanılan yapı malzemesinin rijitliği artmakta ve bu durum yapının rijitliğini artırarak ötelenmelerin azalmasını sağlamaktadır.
- Mod sayılarına karşılık periyot değerleri karşılaştırıldığında beton basınç dayanımı arttıkça periyot değerlerinin ilk 3 modda yaklaşık %10 azaldığı belirlenmiştir. İlk 3 modda modeller arası modlara karşı periyot değerleri farkı daha büyük iken, 3. moddan sonraki modlarda periyod değerlerinin birbirine daha yakın olduğu gözlenmiştir. Yapı rijitleştikçe periyot değerleri azalmaktadır.
- Elde edilen sonuçlar, kullanılan model üzerine olduğundan daha detaylı sonuçlar için daha farklı modeller incelenmelidir.
- Bundan sonraki çalışmalarda sadece perde ve perde+çerçeve sistemden oluşan modeller ve farklı deprem kayıtları dikkate alınarak incelemeler yapılabilir.

Referanslar

Adar K. (2019). 2007 Deprem Yönetmeliği'nin 2018 Deprem Yönetmeliği ile Karşılaştırılması ve Deprem Yükü Hesabındaki Farklar, Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi ve Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitlis, Türkiye.

Aydemir M. E., Jakayev S. (2019). Düzenli Bir Betonarme Binada Düşey Deprem Bileşeninin Yapısal Davranışa Etkisi. Afet ve Risk Dergisi, 2(1), 2019, s 1-13.

B.Ü. Kandilli Rasathanesi ve DAE (2020). Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi 24 Ocak Sivrice-Elazığ Depremi Basın Bülteni.

Çolak H., Türker H. T., Coşkun H. (2019). Az Katlı Düzenli Çerçeveli Yapıların Periyot Hesabı için Bir Yaklaşım Önerisi. Osmaniye Korkut Ata ünv. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 2, Sayı 1, s 117-125.

DBYBHY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 2007.

Erdem M. M., Biçke M. (2017). Maksimum Azaltılmış Göreli Kat Ötelemelerinin Güncel (DBYBHY2007) ve Yeni Yönetmelik Taslağına (TBDY2016) Göre Mukayesesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32(2), s. 253-262.

Hacettepe Ünv. (2020). Müh. Fak. İnşaat Müh. Bölümü 24 Ocak 2020 -Elazığ Sivrice Depremi (Mw =6.8) Ön İnceleme Raporu.

Hamsici M. (2019). Çok Katlı Betonarme Binalarda 2018 Deprem Yönetmeliği ile Tanimlanan Spektrum Eğrilerinin Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamali Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya, Türkiye.

Keskin E, Bozdoğan K. B. (2018). 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Kırklareli İli Özelinde Değerlendirilmesi, Kırklareli University Journal of Engineering and Science 4-1, s: 74-90.

Koçak N. (2020). Betonarme Bir Yapıda Farklı Malzeme Türlerinin Yapının Zaman Tanım Alanında Analizi Sonuçlarına Etkilerinin Karşılaştırılması (Ocak 2020 Elazığ Depremi Örneği), Yüksek LisansTezi, Kırıkkale ünv. Fen Bil. Ens., Kırıkkale, Türkiye.

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

Kurt, Z., Tonyalı, Z. (2020). Performance Analysis of a Reinforced Concrete Frame System According to TBEC-2018, Sciennovation, A journal of structural Science and İnnovation.

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü(2020). 24 Ocak 2020 Sivrice (Elazığ) Depremi (Mw=6,8) Saha Gözlemleri ve Değerlendirme Raporu.

Nemutlu Ö. F., Sarı, A. (2019). 2018 Yeni Türk Deprem Yönetmeliği ile Amerikan Deprem Yönetmeliklerinin Deprem Hesapları Açısından Karşılaştırılması, 5. Uluslararası Deprem Mühendısliği ve Sismoloji Konferansı, 8-11 Ekim, ODTU Ankara, Türkiye.

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi (2020). Deprem Çalışmaları Uygulama ve Araştırma Merkezi – DAMER 24 Ocak 2020 Mw 6.8 Elazığ-Sivrice Depremi İnceleme ve Değerlendirme Raporu.

TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Mayıs 2018.

T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (2020). 24 Ocak 2020 Sivrice (Elazığ) Depremi Ön Değerlendirme Raporu.

Tunç G, Tanfener T. (2016). 2007 ve 2016 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliklerinin Örneklerle Mukayesesi. 3. Ulusal Yapı Kongresi ve Sergisi Teknik Tasarım Güvenlik ve Erişilebilirlik, 24-26 Kasım, Ankara TMMOB Mimarlar Odası Ankara Şubesi.

Yavaş M. Ş., Teloğlu A. N., Celep Z.(2019). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde Binaların Taşıyıcı Sisteminde Tanımlanan Düşey Deprem Etkisi Üzerine. 5. Uluslararası Deprem Mühendısliği ve Sismoloji Konferansı, 8-11 Ekim, ODTU Ankara, Türkiye.

https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml, AFAD internet sitesı

.

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development
UMAGD, (2023) 15(3), s179-s193.
10.29137/umagd.1293684
Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:03 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue
Araştırma Makalesi / Research Article

Bir Mekanik Jiroskopun Yalpalama Tahmininde Uzun Kısa Süreli Bellek Ağı Yaklaşımı

Long-short-term memory network approach to forecast the precession of a mechanical gyroscope

İlyas KAÇAR[1]

[1]*Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Niğde, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 07/05/2023* ***Kabul / Accepted**: 29/09/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Öz
Mekanik jiroskoplar, ürettikleri jiroskopik tork sayesinde hava ve uzay araçları gibi tamamen asılı duran araçlara yön vermek için kullanılmaktadır. Kara araçlarında da tek veya iki tekerlekli araçların otonom dengesi için kullanılmaktadır. Her ne kadar uzun yıllardır regresyonlar mevcut veriyi modelleme amaçlı kullanılagelen bir yöntem olmuşsa da son yıllarda makine ve derin öğrenme yöntemlerinin sınıflama, modelleme konularında yüksek başarıya sahip oldukları görülmüştür. Bu çalışmada bir derin öğrenme yöntemi olan uzun kısa süreli bellek ağı kullanılarak mekanik bir jiroskopun yalpalama hızı tahmin edilmiştir. Elde edilen modelde RMSE 0.0055 rad/s iken ME değeri -0.0012 rad/s ve *R* ise 0.9998 olup model çıktısı ile veri seti arasında yüksek ilişki mevcuttur. Netice olarak derin öğrenme yöntemlerinin mekanik jiroskop tasarımlarında kullanılmasının mümkün olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler
"Jiroskop, Makine öğrenimi, Uzun kısa süreli hafıza, Yalpalama"

Abstract
Mechanical gyroscopes are used to orient fully suspended vehicles such as air and space vehicles, thanks to the gyroscopic torque which they produce. It is also used in land vehicles for the autonomous balance of single or two-wheeled vehicles. Although regressions have been used for modeling existing data for many years, it has been seen that machine and deep learning methods have had higher success in classification and modeling in recent years. In this study, the precession of a mechanical gyroscope was forecasted using a long-short-term memory network, a deep learning method. In the model obtained, the RMSE was 0.0055 rad/s, the ME value was -0.0012 rad/s, and the *R* was 0.9998, and there was a high correlation between the model output and the dataset. As a result, it is possible to usage of deep learning methods in mechanical gyroscope designs.

Key Words
"Gyroscope, Machine Learning, Long short-term memory, Precession"

1. Giriş

Jiroskopların mekanik, optik ve elektromekanik türleri mevcuttur. Temel kullanım alanları, yön tayini olsa da, mekanik jiroskoplar, ürettikleri "jiroskopik tork" sayesinde hava ve uzay araçları gibi tamamen asılı duran araçlara yön vermek için kullanılmaktadır. Karada ise tek veya iki tekerlekli otonom araçların dengesi için kullanılmaktadır. Tamamen endüstriye ve savunma sanayilerine yönelik özel bir araçtır. Momentum değiştiricilerdir. Bu sayede jiroskopik tork olarak adlandırılan bir tork üretebilmektedirler. Mekanik jiroskopların türleri mevcuttur. Bu çalışmada ağırlık ve yalpalama hızının sayesinde jiroskopik tork üreten jiroskoplar ele alınmaktadır. Ancak gereken jiroskopik torkun üretilebilmesi için hangi ağırlıkta hangi yalpalama hızı verilmesi gerektiğinin hesaplanması bu cihazların tasarım aşamasında önemlidir.

Literatür çalışmaları, tahmin yöntemlerinin öneminin tüm dünyada giderek arttığını göstermektedir. Araştırmacılar, gerekli jiroskopik torku üretecek yalpalama hızının tahmini için analitik formüller veya simülasyon yöntemleri kullanmaktadırlar. Ancak kompleks geometriler için analitik formüller kısıtlıdır. Formüle uyması için geometri üzerinde basitleştirme yapmak ise sonuçtaki hata miktarını artırmaktadır. Bu durumlarda dinamik simülasyonlardan faydalanıldığı görülmektedir (Osman, Sankar, & Dukkipati, 1982). Simülasyonlar belli şartlar altında, incelenen olayın çoklu fizik sonuçlarını görebilmede, güvenilir sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır (Kownacki, 2011). Kontrol moment jiroskopları (CMG) bulunan bir uzay aracının dinamik analizi yapılarak titreşimlerin, faydalı yüklerin performansı üzerindeki olumsuz etkisi incelenmiştir (Sun, Cai, Sun, & Jin, 2023). Rijit dinamik analiz sayesinde bir mobil robotun güç gereksinimi hesaplanabilmiştir (Sucuoglu, Bogrekci, Gultekin, & Demircioglu, 2018). Üzerinde 5 kg yük bulunan ve 17.5 kg kütlesindeki iki tekerlekli bir bisikletin otonom sürüşünü sağlayabilmek için dengeleme amaçlı olarak kullanılacak bir CMG'nin 30Nm'lik tork gereksinimine sahip olacağı dinamik simülasyon neticesinde bildirilmiştir (Kacar, Eroğlu, & Yalçın, 2021). 20.5 kg kütleli bir bisiklet tekerleğini dengelemek için 9.25 Nm reaktif jiroskopik tork gerekeceği analitik formüllerle hesaplanmıştır (Ahmed, Adnaik, Bhavsar, & Sargar, 2016). Modal analiz sayesinde de ortasında disk bulunan ve iki ucu yataklanmış bir milden oluşan mekanik jiroskobun kritik frekansları hesaplanabilmiştir (Fan, Ding, Li, & Li, 2018). Yapısal analiz ve optimizasyon sayesinde modelin dinamik özelliklerinin büyük ölçüde iyileştirildiği (Xiu, Yue-dong, Xin-xiao, & Er-yong, 2021), oluşan gerilmelerin izin verilen sınır altında kaldığı görülmüştür (Ahmed et al., 2016; Z. He et al., 2022; Xiu et al., 2021). CMG tasarımlarının yüksek hassasiyetli simülasyonu sayesinde karmaşık elektromekanik cihazların hızlı ve hatasız geliştirilmesi mümkün olmaktadır. Aynı zamanda optimum çalışma özellikleri elde edilebilmektedir. Tüm bu hususlar bir mekanik jiroskop tasarımının temelini oluşturmaktadır (Kostyuchenko & Indygasheva, 2018).

Arıza teşhis ve tahmin yöntemleri (Amiroh, Rahmawati, & Wicaksono, 2021), *model* ve *veri* esaslı olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır (Tobon-Mejia, Medjaher, Zerhouni, & Tripot, 2012). Model esaslı olanlar kesin fizik çıkarımlarına dayanmaktadır ve kesin çözüm vermektedirler. Tahminleri, artık (fark) kullanarak yapmaktadırlar. Bununla birlikte, gerçek sistemlerin karmaşık doğası nedeniyle bu tür matematiksel modellerin karmaşık geometrilere sahip cisimler için oluşturulabilmesi nispeten zordur, bazen imkânsızdır. Gerçek sistemlerin karmaşık yapısını, kabullerle basitleştirmek mümkün olsa da ne denli çok kabul yapılırsa sonuçlar üzerinde o denli çok hata oluşmasına yol açmaktadır. Veri esaslı yöntemler ise sistemden çıkarılan veri setini ve istatistiksel özellikleri öğrenerek tahmin gerçekleştirmektedir. Karmaşık sistemlerin tanımlanması için tercih edilmektedir. Dash ve ark. (2000) her iki yöntemin derinlemesine araştırmasını ve karşılaştırmasını yapmış ve veriye dayalı yöntemlerin daha avantajlı olduğu sonucuna varmıştır (Dash & Venkatasubramanian, 2000) ve Venkatasubramanian ve ark. (2003) (Venkatasubramanian, Rengaswamy, Kavuri, & Yin, 2003). Veriye dayalı yöntem ayrıca iki kategoriye ayrılmaktadır: Biri, sinir ağı ve bulanık mantık tarafından temsil edilen yapay zekâ yöntemleri ve diğeri ise istatistiksel öğrenme yöntemleridir (destek vektör makinesi (SVM) ve gizli Markov modeli (HMM) vs…) (Dong et al., 2020).

ARIMA, SARIMA, SARIMAX, Poisson Oto-Regresif, Doğrusal vs… gibi regresyonlar sürecin gözlemlenebilir kısmı temsil etmek için uygun modellerdir. Gözlemlenemeyen sürecin tahmini ise HMM, SVM ile mümkündür.

Seyrüsefer sisteminde yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak filtre algoritmasının doğruluğu artırılmıştır (Jamil & Kim, 2019). HMM kullanılarak jiroskop motorunun durum değerlendirmesi ve tahmini yüksek hassasiyetle gerçekleştirilmiştir (Dong et al., 2020). Tek eksenli jiroskopta tahmin yöntemi olarak SVM kullanılmıştır (Miao, Li, & Ye, 2015; Song, Hu, & Zhou, 2017; Xudong, Pengfei, Yuanping, & Xingwu, 2013). Jiroskoplarda kayma olarak adlandırılan hatanın tahmininde gri ve Box-Jenkins otoregresif hareketli ortalama (Box-Jenkins ARMA) modellerine dayanan hibrit bir modelleme ve tahmin yaklaşımının başarısı sunulmuş ve kullanılması önerilmiştir (Zhou & Hu, 2008). Sıcaklıktaki anormal değişiklikler, bir jiroskopun kararlılığını ve güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Sıcaklığın tahmin edilmesi ve anormal değişimin saptanması, jiroskopun çalışma durumunun zamanında anlaşılması için büyük önem taşımaktadır. Sıcaklık verilerini tahmin etmek için çift gizli katmanlı uzun-kısa süreli bellek (LSTM) ağı kullanılmış ve tahmin performansı da geriye yayılım (BP) ağı, SVM ile karşılaştırılmıştır (Shi, Hu, & Zhang, 2019). BP algoritması ve Gauss-Newton algoritması ile sıcaklık sapması (X. Chen, 2004) ve rasgele sapmalar modellenmiştir (X. Chen, 2003). BP ve RBF (radyal tabanlı fonksiyon) ağları sıcaklık sapma tahminlerinde sıklıkla kullanılmıştır (Zhu, Zhang, & Bo, 2000). Abbas vd. (2014), dört serbestlik dereceli bir kontrol momenti jiroskopu (CMG) için doğrusal parametre değiştiren (LPV) bir kontrol stratejisinin tasarımını ve deneysel doğrulamasını gerçekleştirmiştir. Önerilen LPV kontrolörü, literatürde bildirilen doğrusal kontrolörlerden çok daha geniş bir çalışma aralığında ve daha iyi bir performans elde etmiştir (Abbas, Ali, Hashemi, & Werner, 2014). He ve Zhao (2015) bir bisikleti dengelemek için CMG cihazının mekanik yapısını ve kontrol sistemini tasarlamışlardır. Sistemi kararlı tutmak amacıyla kutupları yapılandırmak için durum geri besleme kontrolünü kullanılmıştır. Deneysel çalışmada da geri besleme kontrol yönteminin bisikleti

dengede tutmak için kullanılabileceği gösterilmiştir (J. R. He & Zhao, 2015). Aranovskiy vd (2021) yürüyen bir robotun antropomorfik olmayan dinamik stabilizasyonu için çift kontrol momenti jiroskopu ile dengelenen 2D ters sarkaç tasarlamışlardır. Bu ters sarkaç, bir robotun makul bir modelidir. Böylece sistem dinamiklerinin basitleştirilmiş ortamlarda incelenmesine olanak tanımaktadır (Aranovskiy et al., 2021). Montoya-Chairez vd. (2019) CMG'nin hareket kontrolü yapmışlardır. İlk olarak, geri besleme doğrusallaştırma tekniği kullanılarak bir yörünge izleme kontrolörü geliştirilmiştir. İkinci olarak, uyarlanabilir bir sinir ağı algoritması ve uyarlanabilir bir model regresör şemasına karşılık gelen iki yeni uyarlanabilir algoritma tanıtılmıştır. Doğrusal PD kontrol yasası, kademeli PID-PID kontrolör ve tanıtılan şemalar arasında gerçek zamanlı deneysel bir karşılaştırma yapılmıştır. Gerçek zamanlı deneysel çalışma, kontrolörlerin performansının girişte periyodik bir bozucu varken ve yokken değerlendirildiği tanıtılan teoriyi doğrulamıştır (Montoya-Chairez, Santibanez, & Moreno-Valenzuela, 2019). Pan vd. (2019) doğrudan ultrasonik bir motor tarafından tahrik edilen, tek gimbal kontrol momenti jiroskopunu tasarlamış ve optimize etmiştir. Jiroskopun dinamik bozukluğu ve ultrasonik motorun doğrusal olmayan özellikleri göz önünde bulundurularak, gimbal servo sistemi için iki serbestlik dereceli kutup yerleştirme kontrolörünü bir model muhakeme kontrolörü ile birleştiren bir uzman kontrol algoritması tasarlanmıştır. Sunulan kontrol momenti jiroskopu ve kontrol kartı üretilmiş ve deneyler için monte edilmiştir. Deneysel sonuçlar, CMG'nin yüksek hızlarda gimbal servo sistemi üzerinde neredeyse hiç bozucu etkisi olmadığını, ancak gimbal hızındaki düşüşle birlikte etkinin kademeli olarak arttığını göstermiştir (Pan, Xu, & Zhao, 2019). Li vd. (2022) tek-gimbal CMG için hata izolasyonu ve tahmini sorununu elde etmek üzere sinir ağı tabanlı bir hasar teşhis şeması önermektedir. Bu amaçla, hasar teşhisinin doğruluğunu artırmak için aktif bozulma önleme için sinir ağına dayalı bir gözlemci geliştirilmiştir. Yörüngedeki periyodik bozulma, sinir ağının uydurma ve hafıza yeteneğine başvurularak hasar ile ayrıştırılmıştır. Daha sonra, bilgi füzyonu fikrine dayalı olarak hasar teşhis şeması oluşturulmuştur. Uyarlanabilir tahmin edici ve sinir ağı yöntemleri kullanılarak hasar izolasyonu ve tahminini uygulamak için uzay aracı tutumu ve gimbal pozisyonu verileri birleştirilmiştir. Ardından, aktif hasar toleranslı bir kontrol elde etmek için bozulma ve hasar tahmin sonuçlarını içeren uyarlanabilir bir kayan kipli kontrolör tasarlanmıştır. Önerilen şemalar ve simülasyon sonuçları, önerilen şemanın daha iyi teşhis ve kontrol sonuçları elde ettiğini göstermiştir (Li, Hu, & Shao, 2022). Hibrit derin öğrenme tekniği kullanarak çevik uydu yönelim kontrol sistemi için anomali tespiti yapılabilmiştir (Ibrahim, Badran, & Esmat, 2023).

Yazarların bilgisine göre, açık literatürde, LSTM ağı kullanarak jiroskop yalpalamasının zaman serisi tahminini içeren bir çalışma mevcut değildir. Bu çalışmada sonlu eleman simülasyonu esaslı rijit dinamik analiz ile elde edilmiş olan mekanik jiroskopun yalpalamasının zamana bağlı olarak modellenmesi için LSTM ağı kullanılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki LSTM ağı sayesinde yüksek korelasyona sahip bir tahmin modeli oluşturulabilmektedir. Bu modeli oluşturmak için kullanılan ağ parametreleri ve model ile elde edilen tahmin performansları çalışma içerisinde sunulmuştur.

2. Jiroskopik Tork

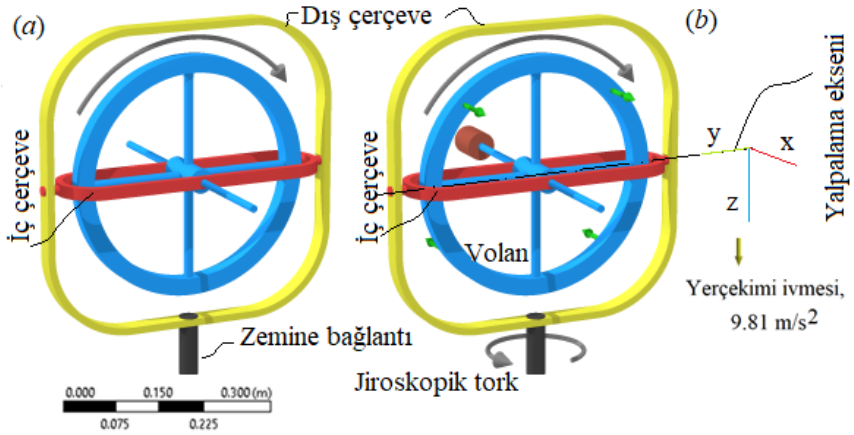
Ağırlık torkunu dengelemek suretiyle jiroskopik tork üreten bir mekanik jiroskopun cisme sabitlenmiş bir eksen takımına göre açısal momentumdaki değişimin genel denklemi, klasik (Newtonian) mekanik ile Eşitlik (1) ile hesaplanmaktadır.

$$\sum \vec{M} = \frac{d(\vec{L})_{xyz}}{dt} + \vec{\Omega} \times \vec{L} \tag{1}$$

Burada $\sum \vec{M}$ ifadesi net tork olup, yönü ise, bağıntıya göre $d\vec{L}$ veya $(\vec{\Omega} \times \vec{L})$ yönündedir. $\vec{\Omega}$, "yalpalama" olarak adlandırılan ikinci Euler açısındaki açısal hızdır (Anonimouse, 2023). $\vec{L}$ açısal momentum ve t ise zamandır. Bu eşitlik, simülasyon sonuçlarının doğrulanması için kullanılmıştır.

3. Dinamik Analiz ve Veri Toplama

Veri seti, sonlu eleman simülasyonu esaslı gerçekleştirilen bir rijit dinamik analizi neticesinde elde edilmiştir. Simülasyonlar, Ansys® yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Ansys®, 2023). Analiz, iki adımda ve toplam 5 saniye süreyi kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Toplam 415 adet veri toplanmıştır. Bu hâli ile 83 Hz frekansında veri toplanmıştır. Ultrasonik motor ile sürülen bir CMG'nin dinamik davranışı için jiroskop dönmesinin 0.35 s boyunca incelendiği görülmüştür (Pan et al., 2019). Uydu davranış kontrolü için kullanılan bir CMG'nin açısının değerlendirilmesi için 10000 s inceleme yapılmıştır (Ibrahim et al., 2023). İki serbestlik dereceli bir kontrol momenti jiroskopu (CMG) 15 saniye boyunca incelenmiştir (Montoya-Chairez et al., 2019). CMG ile kendinden dengeli bisikletlerin kontrol sistemi tasarımı esnasında 6 s çalışma süresi incelenmiştir (J. R. He & Zhao, 2015). Görülmektedir ki, uygulama alanına göre farklı süreler incelenmiştir. Bu çalışmada CMG'nin dengeleme işlemini beş saniye içerisinde gerçekleştirmek amaçlandığından dolayı CMG'nin 5 s'lik çalışma süresi analiz edilmiştir. Dinamik analizin iterasyonlarında, minimum zaman adımı 1.e-7 s ve maksimum zaman adımı 5.e-2 s olarak sınırlandırılmıştır. Her bir simülasyon, 3.40 GHz quad core CPU, 8 GB RAM özellikli bir bilgisayar ile 2.866 s sürmüştür. Volanın yataklandığı bağlantıdaki üç eksen etrafındaki ve bileşke yalpalama hızı kaydedilmiştir. Şekil 1'de bu çalışmada kullanılan ağırlık dengeleme esaslı çalışan mekanik jiroskop gösterilmiştir. Bir adet volan mevcuttur. Tasarım sayesinde volanın hem kendi ekseni etrafında hem de diğer iki eksen etrafında dönme hareketi serbesttir. Yerçekimi ivmesi uygulanmıştır. Analizde kullanılan modelin sahip olduğu ana varsayımlar şunlardır: (1) malzemede sönümleme yok, (2) yatak sürtünmeleri ihmal edilmiştir (3) yatak veya temas yüzeyleri tamamen temas halinde, (4) diğer dış koşullar dikkate alınmamaktadır (5) Bütün parçalar, rijit cisimdir. Bu nedenle esneme, kopma vb. deformasyonlar mümkün değildir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan mekanik jiroskop (Nl, 2023) **(*a*)** kavramsal tasarımı; **(*b*)** ağırlık uygulanması hali

Temas çifti kullanılmamıştır. Dolayısıyla eleman ağı oluşturulmamıştır. Veri olarak yalpalama eksenindeki açısal hızın bileşkesi ve bileşenleri kaydedilmiştir. Ağırlığa sebep olan ek kütledir. Ek kütle merkezinin, dönme merkezine uzaklığı $Tork_W = \vec{r} \times m\vec{g} = 0.03 * 1.59 * 9.8066 = 0.468\ kgm^2/s^2$ ile hesaplanan torkun oluşmasına sebep olmaktadır. Jiroskop ise bu torku dengeleyecek kadar yalpalama yapmaktadır.

Herhangi bir regresyondan önce, araştırmacılar, deneysel ham verilerdeki varyansı ve heteroskedastisiteyi ortadan kaldırmak, veri eğrisini yumuşatmak için sıklıkla veriye bazı ön işlemler uygulamaktadırlar (HosseinTabari, Kisi, Ezani, & Talaee, 2012; Shen et al., 2020; Taheri, Brodie, & Gupta, 2021). Ancak hangi şiddette uygulanırsa uygulansın, her türlü ön işlem verinin doğallığını azaltmakta bu nedenle de olayı temsil yeteneğini düşürmektedir. Bu durumdan dolayı bu çalışmada ham veriler üzerine herhangi bir ön işlem yapılmamıştır. Dolayısıyla, genel eğri formuna ek olarak tepe ve çukurlukların tahmin edilebilmesi, LSTM ağının ayırt edici özelliklerinden biri olacaktır. Ayrıca ham veriler üzerine değişen varyans testlerinden Engle's ARCH Testi uygulanmıştır. Ham verilerin değişen varyans içerdiği görülmüştür.

Bütün parçaların malzemesi yapı çeliği olup özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. CMG'ye ait geometrik özellikler ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Malzeme özellikleri

Özellik	Değer
Yoğunluk (kg/m^3)	7850
Çekmedeki akma gerilmesi (MPa)	250
Basmadaki akma gerilmesi (MPa)	250
Çekmedeki maksimum gerilme (MPa)	460
Basmadaki maksimum gerilme (MPa)	460

Tablo 2. CMG'nin geometrik özellikleri

Özellik		Değer
Dış çerçeve		
Hacim (m^3)		7.39E-05
Asal atalet momenti, Ip_1, (kg·m²)		4.23E-03
Asal atalet momenti, Ip_2, (kg·m²)		4.73E-03
Asal atalet momenti, Ip_3, (kg·m²)		8.94E-03
Kütle (kg)		0.58
İç çerçeve		
Hacim (m^3)		1.64E-04
Asal atalet momenti, Ip_1, (kg·m²)		6.23E-03
Asal atalet momenti, Ip_2, (kg·m²)		5.92E-03
Asal atalet momenti, Ip_3, (kg·m²)		1.20E-02
Kütle (kg)		1.29
Volan		

Hacim (m^3)		1.01E-04
Disk kalınlığı (mm)		5.00
Asal atalet momenti, Ip_1, (kg·m²)		1.28E-03
Asal atalet momenti, Ip_2, (kg·m²)		1.26E-03
Asal atalet momenti, Ip_3, (kg·m²)		2.53E-03
Disk yarıçapı (mm)		4.00E+02
Mil çapı (mm)		5.00E+00
Kütle (kg)		7.95E-01
Kendi ekseni etrafındaki dönme hızı, ω (rad/s)		88
Volan ağırlık merkezinin CMG merkezine olan mesafesi (mm)		30

4. Modellerin Performans Değerlendirmesi

Modellerin verimliliğini değerlendirmenin en pratik yolu mevcut veri ile modeller tarafından tahmin edilen değerler arasındaki farka bakmaktır. Bu amaçla da hata analizi yapmak, yaygın bir fark belirleme yöntemidir. En sık kullanılan hata fonksiyonları, Eşitlik 2'de verilmiştir. Birden fazla veri arasındaki ilişkiyi tespit etmek için ise korelasyon veya determinasyon katsayılarını kullanmak, yaygın bir başka yöntemdir.

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}(p(t) - o(t))^2 \quad (2.a)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (2.b)$$

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}|p(t) - o(t)| \quad (2.c)$$

$$MAPE = \frac{100}{N}\sum_{t=1}^{N}\frac{|p(t)-o(t)|}{o(t)} \quad (2.d)$$

$$R = \frac{(\sum_{t=1}^{N}[p(t)-\bar{p}][o(t)-\bar{o}])}{\left(\sqrt{\sum_{t=1}^{N}[(p(t)-\bar{p})]^2}\sqrt{\sum_{t=1}^{N}[(o(t)-\bar{o})]^2}\right)} \quad (2.e)$$

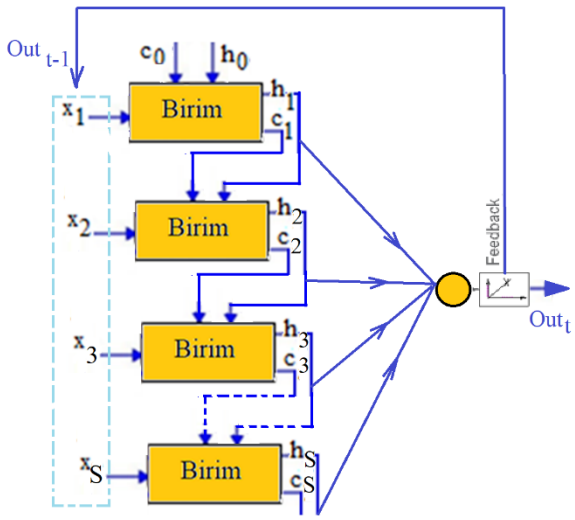
$$\text{Hata}=|p(t) - o(t)| \quad (2.f)$$

$$\text{ME}=\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}|p(t) - o(t)| \quad (2.g)$$

Burada $o(t)$ veri setindeki değerler ve $p(t)$ ise modeller tarafından tahmin edilen verilerdir. t ise zaman adımıdır. R değeri korelasyon olup -1 ile 1 arasındadır, birimi yoktur. MSE hata karelerinin ortalaması, RMSE ise MSE 'nin karekökü ve MAE mutlak hatanın ortalamasıdır. ME ise ortalama hata olup veri birimindedir. ME, MAPE, RMSE ve MAE değerlerinin sıfıra yakın olması istenir. RMSE ve MAE incelenen veri ile aynı birimdeyken MAPE ise yüzde birimindedir. MSE 'nin birimi ise birim²'dir. R veya R^2 değerlerinin pozitif 1'e yakın olması, fonksiyonun tahmin ettiği değerler ile veri noktaları arasında kuvvetli bir ilişkinin olduğunu teyit etmektedir. RMSE değerinin sıfıra yakın olması da tahmindeki ortalama hata değerlerinin azlığını göstermektedir.

5. LSTM ile modelleme

Bir LSTM ağ katmanı şematik olarak Şekil 2'de verilmiş olup; $\{x\}$ girdi değişkeni kümesi, $\{h\}$ çıktı değişkeni kümesi ve $\{c\}$ hücre durumunu içeren değişkenlerdir.



Şekil 2. (*a*) Çalışmada kullanılan LSTM ağı topolojisi

h_t, Eşitlik 3 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$h_t = o_t \odot tanh(c_t) \tag{3}$$

$\odot$ sembolü Hadamard çarpımını (Million, 2007) temsil etmektedir. o_t çıkış kapısı olup, h_t için hücre durumunu ayarlamaktadır. c_t, Eşitlik 4 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot g_t \tag{4}$$

Burada i_t giriş kapısı sayesinde, hücre durumunun güncelleme seviyesi belirlenmektedir. f_t unutma kapısı olup, hücre durumunun sıfırlama seviyesi kontrol edilebilmektedir. g_t hücre adayı olup, hücre durumuna bilgi sağlar. Bu değişkenler Eşitlik 5'te verilen bağıntılar ile hesaplanmaktadır.

$$i_t = f(W_t x_t + R_i h_{t-1} + b_i) \tag{5.a}$$

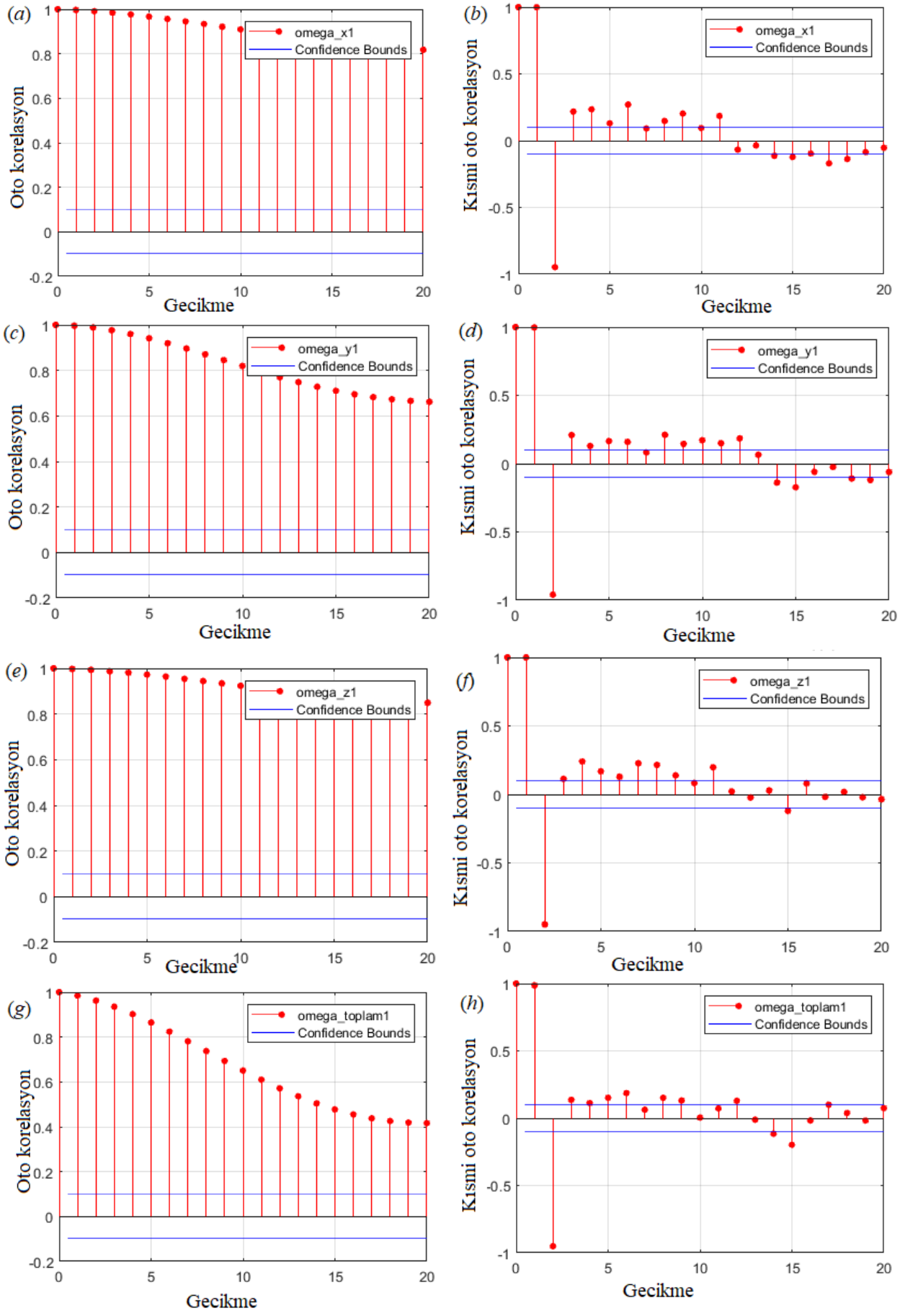
$$f_t = f\left(W_f x_t + R_f h_{t-1} + b_f\right) \tag{5.b}$$

$$o_t = f(W_o x_t + R_o h_{t-1} + b_o) \tag{5.c}$$

$$g_t = tanh\left(W_g x_t + R_g h_{t-1} + b_g\right) \tag{5.d}$$

burada $f(t)$ ile verilen fonksiyon, sigmoid aktivasyon fonksiyonudur. W ve R sırasıyla girdi ve tekrarlayan birimin ağırlıklardır. b ise bias'tır. Hücre durumu için sigmoid ve aday için aktivasyon fonksiyonu olarak sıklıkla tanjant hiperbolik fonksiyonun kullanıldığı görülmüştür (Farzad, Mashayekhi, & Hassanpour, 2019). Toplam veri setinin ilk %60'ı eğitim için, geri kalan %40'ı ise tahmin için kullanılmıştır. Veriler yazılım içerisinde başlangıçta normalleştirilmektedir. Veri normalizasyonu için, veri seti değişkenlerinin ölçüm ölçeğindeki dramatik değişiklik nedeniyle, tüm değişkenler (-1,1) aralığında Minimum-Maksimum ölçeklendirme yöntemi kullanılarak normalleştirilmiş bu da eğitim aşamasında daha iyi veri yorumu ve daha iyi model yakınsaması ve doğruluğu sağlamıştır. LSTM ağları, yazılım kodları kullanılarak oluşturulmuştur (Heris, 2015). IoT (nesnelerin interneti) kullanan herhangi bir donanım uygulaması bu çalışmanın kapsamı dışındadır.

Zaman gecikmelerini tespit etmek için korelogramlar kullanılmıştır (Şekil 3). Yalpalama verisi oto korelasyon ve kısmi oto korelasyon grafiklerinde değerlendirilmiştir. Her iki tip grafikten serideki verilerin rastgele olmadığı, kendi gecikmelerine bağlı olduğu görülmektedir. Otokorelasyon fonksiyonu (OKF) giderek azalmaktadır. OKF katsayıları sıfırdan önemli ölçüde farklıdır ve yavaş yavaş sıfıra doğru düşmektedir. Kısmi otokorelasyon fonksiyonu (KOKF) ikinci gecikmeden sonra kesilmektedir. Daha fazla gecikme sıfıra yakındır. İki standart sapma kadarlık oluşturulan güven sınırlarının hemen hemen dışında kalmaktadır. Bu durum iki gecikmenin birbirleri ile yüksek ilişkili ve ikiden sonraki ardışık değerlerin birbiriyle ilişkili olmadığı anlamına gelmektedir. Bu davranış, serinin ilk iki gecikmeye bağlı ve otomatik gerileyen bir seri, AR(2) olduğunu göstermektedir.


(a)
omega_x1
Confidence Bounds
Oto korelasyon
Gecikme
(b)
omega_x1
Confidence Bounds
Kısmi oto korelasyon
Gecikme
(c)
omega_y1
Confidence Bounds
Oto korelasyon
Gecikme
(d)
omega_y1
Confidence Bounds
Kısmi oto korelasyon
Gecikme
(e)
omega_z1
Confidence Bounds
Oto korelasyon
Gecikme
(f)
omega_z1
Confidence Bounds
Kısmi oto korelasyon
Gecikme
(g)
omega_toplam1
Confidence Bounds
Oto korelasyon
Gecikme
(h)
omega_toplam1
Confidence Bounds
Kısmi oto korelasyon
Gecikme

Şekil 3. (*a*) *x* doğrultusundaki yalpalama bileşenine ait OKF; ***(b)*** *x* doğrultusundaki yalpalama bileşenine ait KOKF; ***(c)*** *y* doğrultusundaki yalpalama bileşenine ait OKF;***(d)*** *y* doğrultusundaki yalpalama bileşenine ait KOKF; **(*e*)** *z* doğrultusundaki yalpalama bileşenine ait OKF; **(*f*)** *z* doğrultusundaki yalpalama bileşenine ait KOKF; **(*g*)** yalpalamanın bileşkesine ait OKF; **(*h*)** yalpalamanın bileşkesine ait KOKF

Ağırlıklara eğitimden önce ilk değer olarak sıfır verilmiştir. Ağın derinliği 1 LSTM katmanı olarak ayarlanmıştır. Gecikme 2 olarak ayarlanmıştır. LSTM katmanına 128 gizli birim uygulanmıştır (Huang, Li, Oh, & Kang, 2023). LSTM ağının 500 (Yuan, Chen, Lei, Yuan, & Muhammad Adnan, 2018), 200 (J. Chen, Wang, & Xu, 2022), 800 iterasyon (Z. Chen, Yang, & Qiao, 2022) ile eğitildiği görülmektedir. Bu çalışmada 500 iterasyon uygulanmıştır. Hata yakınsaması olarak RMSE gözlemlenmiştir. Regresyon katmanında kayıp fonksiyonu olarak MSE kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan LSTM ağına ilişkin parametreler Tablo 3'te verilmiştir.

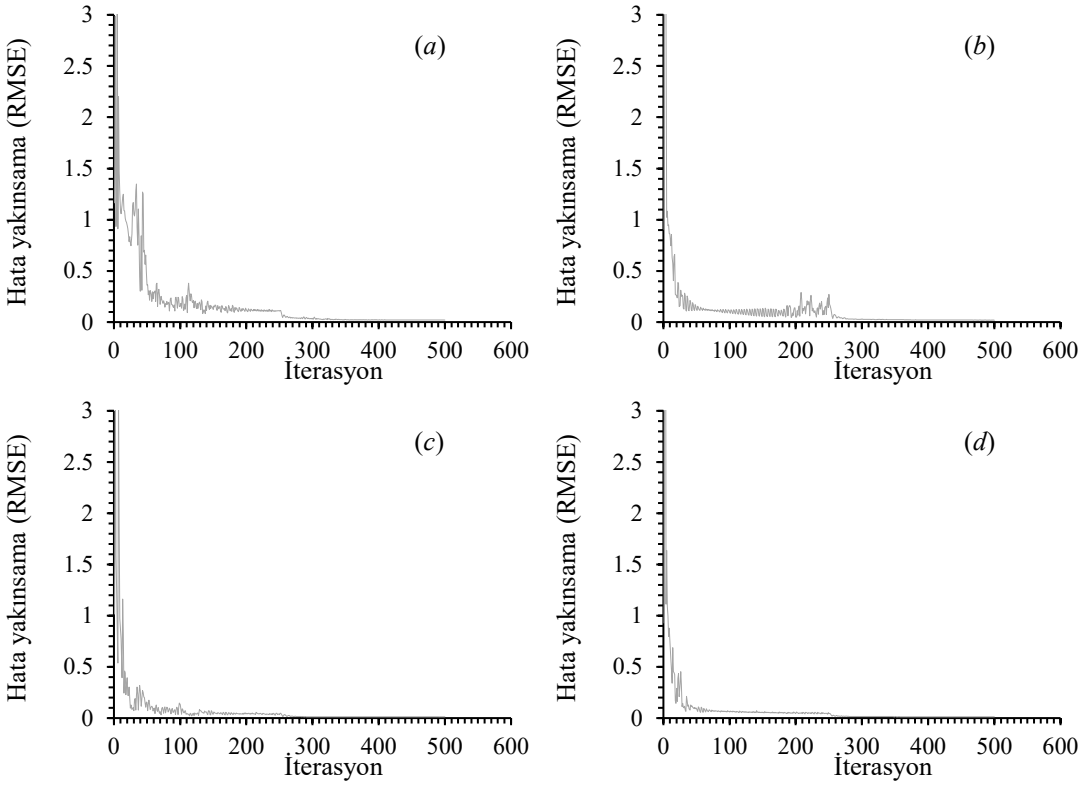
Tablo 3. LSTM ağ mimarisinin katman yapılandırması

Katman	**Yapılandırma**	**Parametre**
Dizi giriş katmanı	1 kanal	Grup boyutu = %60 eğitim, %40 tahmin. Tüm veriler normalleştirilmiştir. Karıştırma: bir kez
Gecikme		2
LSTM katman(lar)ı	1 katman 128 gizli birim	Kapılarda *sigmoid*, hücre adayında ve hücre durumunda *tanh*
Tam bağlantı katmanı	1 birim	Yanıt sayısı = 1
Çıktı	Regresyon katmanı	Kayıp fonksiyonu = MSE
Eğitim algoritması (çözücü)	ADAM	Gradyan azalma faktörü, $\beta_1 = 0.9$ Kare gradyan azalma faktörü $\beta_2 = 0.999$ Epsilon $\varepsilon = 1e-8$ İlk öğrenme oranı: 0.01. Öğrenme oranı güncellenebilir (güncelleme faktörü: 0.2, güncelleme süresi: 10 epoch) Ağırlık azaltma faktörü: 1e-04 Gradyan bozulma eşiği: 1 (nan veya Inf), norm esaslı eğim kırpma
Ağırlıklar	W, R, b	İlk değer olarak sıfır verildi.
Hesaplama âdeti	Epoch başına iterasyon=1	500 epoch

6. Sonuçlar ve Tartışma

6.1. Doğrulama

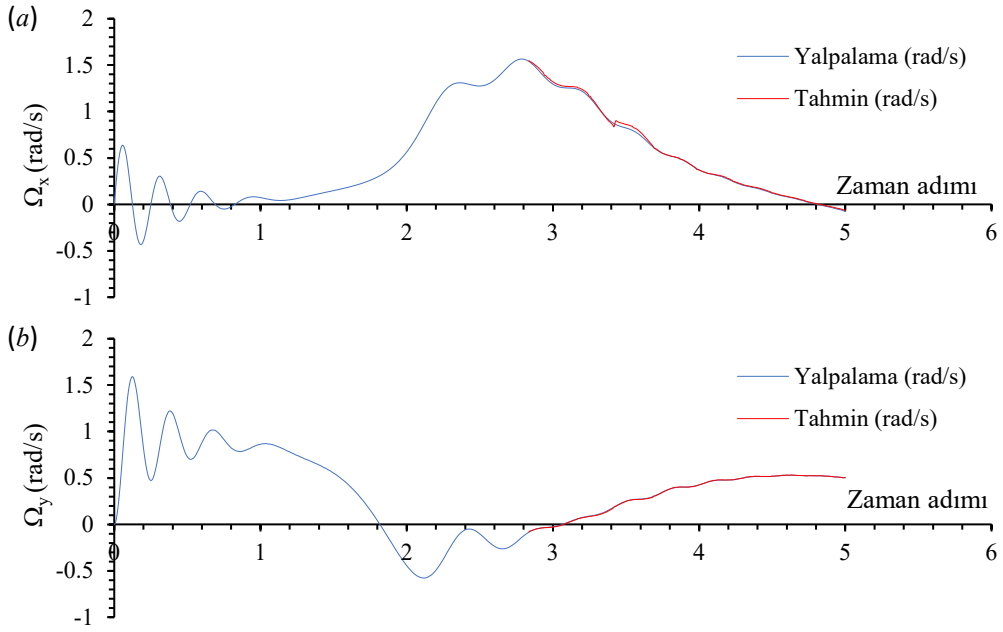
Eğitim esnasında kaydedilen RMSE hata yakınsama eğrileri Şekil 4'te verilmiştir. Hata gittikçe sıfıra yaklaşmakta daha sonra da hatanın değişiminde herhangi bir sapma görülmemektedir. Bu durum ağların eğitimleri esnasında kararlılıklarını kaybetmediği anlamına gelmektedir.

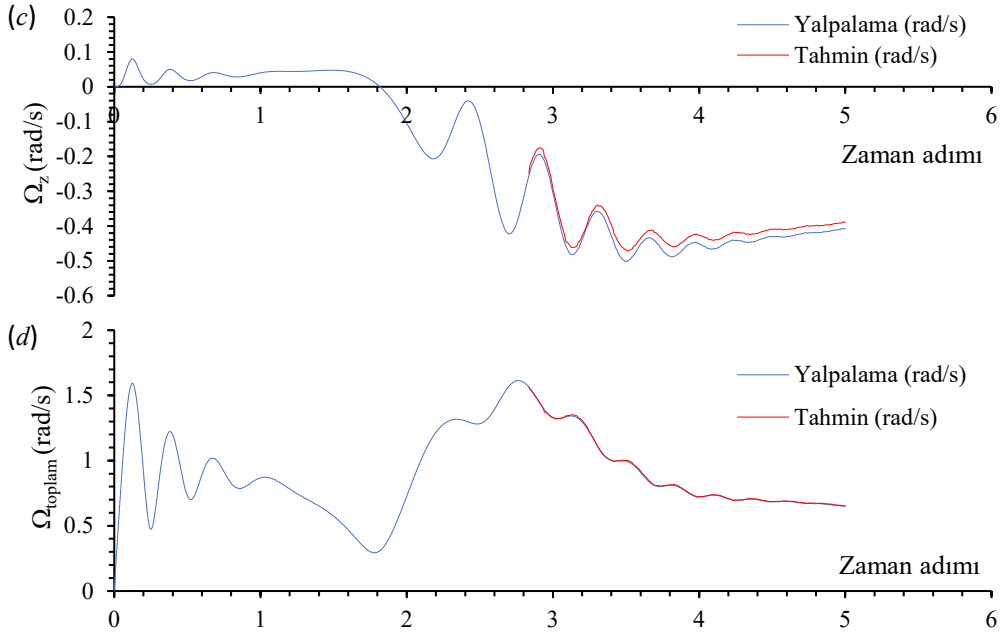


Şekil 4. Ağın eğitimi sırasında hata yakınsaması **(*a*)** *x* doğrultusundaki yalpalamayı tahmin edecek ağ; **(*b*)** *y* doğrultusundaki yalpalamayı tahmin edecek ağ; **(*c*)** *z* doğrultusundaki yalpalamayı tahmin edecek ağ; **(*d*)** bileşke yalpalamayı tahmin edecek ağ için

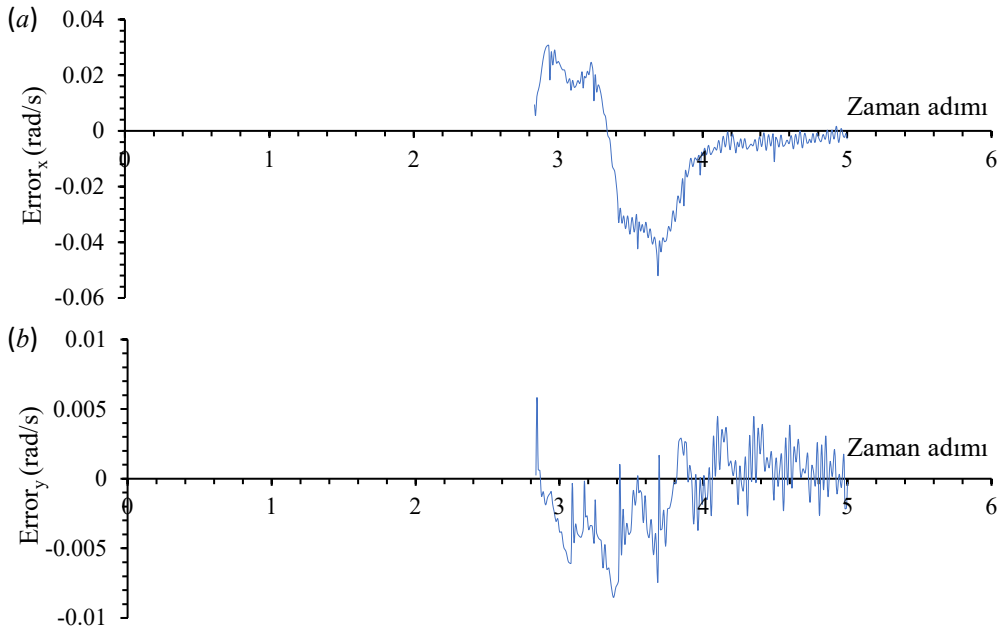
6.2. Tahmin eğrileri

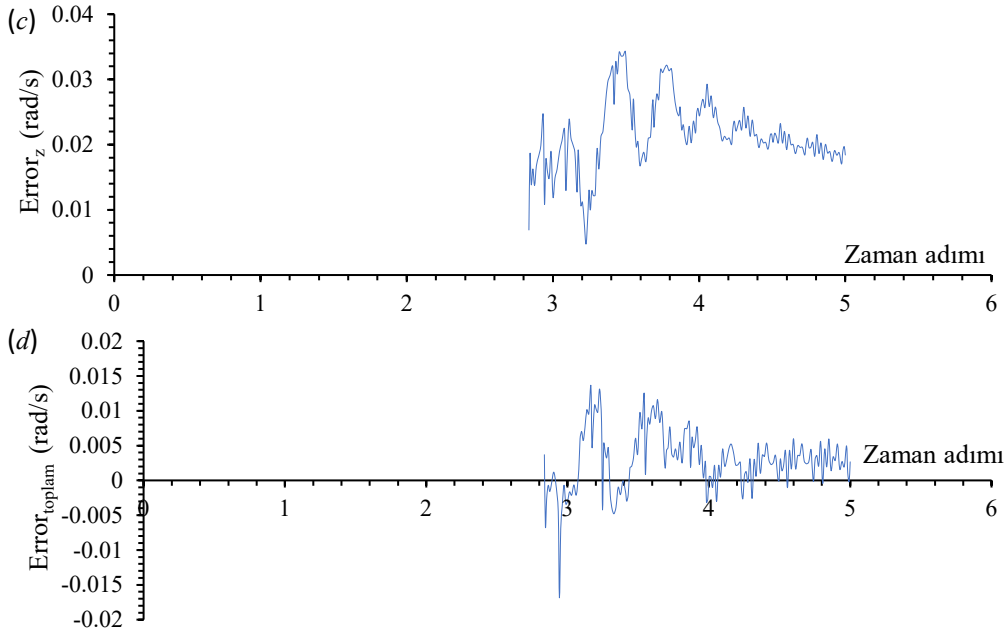
Doğrulamaya ek olarak modellerinin tahmin eğrileri sırasıyla Şekil 5'te karşılaştırılmıştır. Ağlar eğitim, test ve doğrulama sırasında tahmin verilerini bilmemekteydiler. Veri kümesinin son %40'lik kısmı, eğitime başlamadan önce tahmin için ayrılmıştı. Şekil 6'da ise veri seti ile model tahmin değerleri arasındaki fark verilmiştir. Grafiklerden LSTM ağlarının hem eğri genel şeklini hem de eğrilerin sahip olduğu tepe ve çukurlukları temsil edebilme yeteneğinin yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte Ω_z modelinin tahmin verisinin tepe ve çukurluklarla eş şablonda ancak bir miktar kaymaya sahip olduğu görülmektedir.





Şekil 5. LSTM ağının (***a***) *x* doğrultusundaki; (***b***) *y* doğrultusundaki; (***c***) *z* doğrultusundaki; (***d***) toplam yalpalama hızı





Şekil 6. LSTM ağının tahmini ile veri seti arasındaki fark **(*a*)** *x* doğrultusundaki; **(*b*)** *y* doğrultusundaki; **(*c*)** *z* doğrultusundaki; **(*d*)** toplam hata

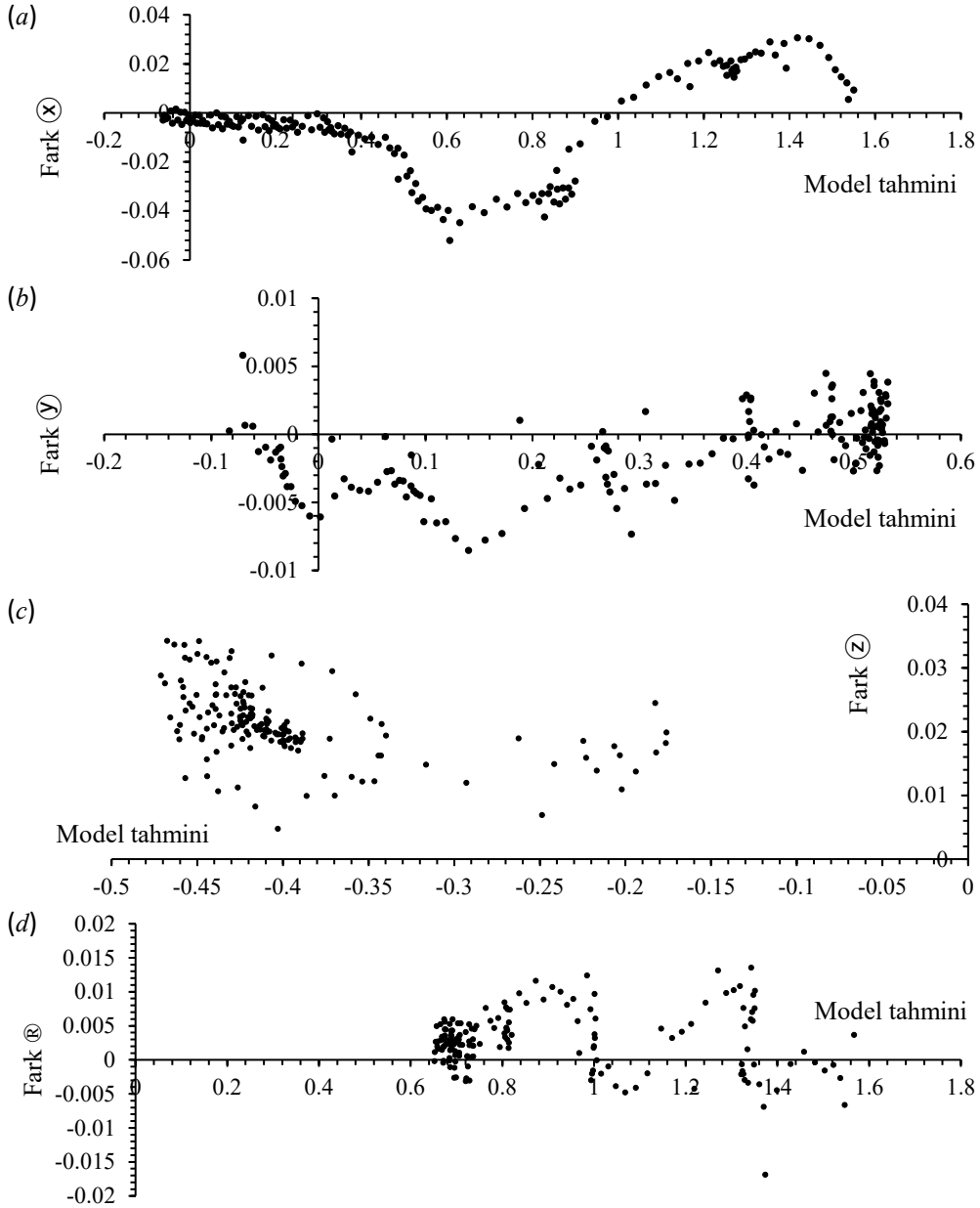
Tablo 4. LSTM ağının tahmin performans metrikleri

Yalpalama (rad/s)	**MAE (birim)***	**MAPE (%)**	**Hata (birim)**	**MSE (birim²)**	**RMSE (birim)**	**Hesaplama süresi (d:s)**	***R***
Ω_x	0.0258	1.3522	0.0175	4.0295e-04	0.0201	01:31	0.9995
Ω_y	0.0221	4.0311	0.5373	8.7878e-04	0.0296	01:23	0.9955
Ω_z	0.0180	-4.4188	0.0180	3.4928e-04	0.0187	01:12	0.9975
Ω_{toplam}	0.0041	0.4530	-0.0012	3.0245e-05	0.0055	01:18	0.9998

(*) Birimler değişkenlerin birimi (rad/s) ile aynıdır.

Tablo 4'te LSTM ağının tahmin performans metrikleri verilmiştir. Tüm veri için hesaplama süresi birbirlerine yakındır. Tüm veri için yüksek ve pozitif korelasyon görülmektedir. Bu durum, oluşturulan ağların yaptığı tahminlerin, veri seti ile yüksek uyuma sahip olduğunu göstermektedir. Ancak tek başına yüksek korelasyon, modelin yüksek performansa sahip olduğunu ispata yeterli değildir. Bu nedenle hata metrikleri de incelenmelidir. RMSE metriğinin en yüksek değeri, Ω_y verisinde ≅ % 3 rad/s olmaktadır. Bu durum MSE, MAPE, MAE metriklerinde de benzerdir. En düşük hata ise Ω_{toplam} tahminlemede oluşmaktadır.

Şekil 7'de LSTM ağının tahminine karşın ağ ile veri seti arasındaki farkı gösteren grafikler verilmiştir. Bu grafikler tahmindeki varyansı görebilmek için faydalı grafiklerdir. Şekillerde değerlerin sabit bir varyansa sahip olduğu, sıfıra yakın rastgele dağıldığı görülmektedir. Sabit ve rasgele dağılım, eş varyansa işaret etmektedir. Engle's ARCH Testine göre ham veriler değişen varyans içermekteydi. Bununla birlikte, LSTM modelinin sabit varyansa sahip olması göstermektedir ki, değişen varyansa sahip olan ham veriler üzerine herhangi bir ön işlem gerekliliği ortadan kalkmıştır.



Şekil 7. LSTM ağının tahminine karşın aradaki fark dağılımı ***(a)*** *x* doğrultusundaki; **(*b*)** *y* doğrultusundaki; **(*c*)** *z* doğrultusundaki; **(*d*)** bileşke yalpalama

6.3. Tartışma

Literatürde jiroskop modelleme çalışmalarının sıklıkla regresyon ve nadiren de destek vektör makinesi (SVM) ve gizli Markov modeli (HMM) ile temsil edilen istatistiksel öğrenme yöntemleri ile yapıldığı görülmüştür. Farklı modellere ait metriklerinin karşılaştırılması: Tablo 5'te verilmiştir. Tablodan görülmektedir ki literatürde çok farklı modeller kullanılmış bununla birlikte farklı değişkenler incelenmiştir. Bu nedenle mevcut çalışma ile doğrudan kıyaslamak yerine her çalışmadaki farklı parametrelerin kendileri içesinde değerlendirmesi yapılabilmiştir. Bunla birlikte ML yöntemlerinin, diğer yöntemlere göre daha başarılı olduğu sonucu çıkartılabilmektedir. Bu hâli ile mevcut çalışmanın yalpalama tahmini konusunda özgünlük içerdiği anlaşılmaktadır.

Tablo 5. Farklı modellere ait metrikler

Yalpalama (rad/s)	Hata (birim)	RMSE (birim)	Metot
Mevcut çalışma	-0.0012 rad/s	0.0055 rad/s	LSTM
Shi ve ark. (2019)	--	0.0112 °C	LSTM
Shi ve ark. (2019)	--	0.0151°C	SVM
Shi ve ark. (2019)	--	0.0135 °C	BP
Zhou ve Hu (2008)	−0.0111 rad/s	--	ARMA
Chairez vd. (2019)	13.25º	--	PD
Chairez vd. (2019)	1.3336º	--	PID
Chairez vd. (2019)	0.74515º	--	Adaptif
Chairez vd. (2019)	0.184º	--	YSA
Pan vd. (2019)	--	0.013 mrad/s	PID
Ibrahim vd. (2023)	--	2.013 pulse/s	LSTM

Ancak bu yöntemlerden önce ön işlem uygulanması gerekliliği, verinin doğasını bozmaktadır. LSTM yöntemi herhangi bir ön işlem gereksinimini ortadan kaldırmıştır. Shi ve ark. (2019) RMSE hatasını BP yöntemi için 0.0135 °C, SVM yönteminde 0.0151°C ve LSTM yönteminde 0.0112 °C olarak bulmuştur (Shi et al., 2019). LSTM yöntemi diğerlerine göre en az hataya sahip olmuştur. Bu çalışmada da 0.0055 rad/s olarak tespit edilen RMSE'nin bahsi geçen çalışmadan daha az olduğu görülmektedir. Zhou ve Hu (2008) ise ARMA modeli kullanmış olup tahmindeki ME değeri −0.0111 rad/s iken bu çalışmada -0.0012 rad/s olmuştur (Zhou & Hu, 2008). Çalışmamızda korelasyon değeri 0.9998 olup bire çok yakındır. Bu durum model çıktısı ile veri seti arasındaki ilişkinin yüksek olduğuna işaret etmektedir. Montota-Chairez vd. (2019), PD kontrol kullanarak 13.25º, PID kullanarak 1.3336º, adaptif kontrol kullanarak 0.74515º ve sinir ağı kullanarak 0.184º pozisyon hatası elde etmiştir. Tork hatası PD kontrol kullanılarak 0,036 Nm, PID kontrol kullanılarak 0,1484 Nm, MB kullanılarak 0,1769 Nm, adaptif kontrol kullanılarak 0,15108 Nm ve sinir ağı kullanılarak 0,14659 Nm'dir (Montoya-Chairez et al., 2019). Pan vd. (2019) ultrasonik bir motor tarafından tahrik edilen yeni bir tek-gimbal kontrol momenti jiroskobunun, teorik modeli ve parametreleri Ziegler–Nichols metodu ile belirlenmiş olan bir PID kontrolcü sayesinde hızdaki ortalama hatanın maksimum değerini 0.013 mrad/s bulmuştur. Bu değer bu çalışmada bulunan değerden çok ufaktır. Bunun nedeni ise jiroskobun modellenmesinde teorik model ve analitik formüllerin kullanılmış olmasıdır. Ancak sunulan kontrolör, kontrol momenti jiroskopunun yüksek kararlılığı ve yüksek hassasiyetinin temeli olan gimbalin 0,2 mrad/s ila 1,6 rad/s arasında bir kapalı döngü hız kontrolünü gerçekleştirmektedir. (Pan et al., 2019). Hibrit derin öğrenme tekniği kullanarak çevik uydu yönelim kontrol sistemi için anomali tespiti yapılabilmiştir (Ibrahim et al., 2023).

7. Sonuçlar

Jiroskop tasarımları esnasında veya kullanımda olan bir jiroskobun hasarının önceden tahmin edilmesinde uygun model kullanılması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında havacılık, uzay endüstrilerinde ve kara araçlarında da otonom dengeleme gerektiren alanlarda kullanılan bir mekanik jiroskopun yalpalama hızının modellenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla LSTM modellerinin performansları araştırılmıştır. İsabetli tahminler, bu alanda faaliyet gösteren firmalara hızlılık ve rekabet gücü katması açısından öneme sahiptir. Çalışma sonunda elde edilmiş olan temel çıkarımlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Bir katmanlı, 128 adet gizli hücreye sahip, regresyon esaslı bir LSTM ağı kullanılmıştır. Eğitim için ADAM çözücüsü, kapılarda *sigmoid*, hücre adayında ve hücre durumunda *tanh* aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. Eğitim için 500 iterasyon yaptırılmıştır. RMSE değeri 0.0055 rad/s iken ME değeri -0.0012 rad/s ve *R* değeri ise 0.9998 olup model çıktısı ile veri seti arasında yüksek ilişki mevcuttur.
- Jiroskop yalpalama hızının tahmini işleminde, LSTM ağı hem eğri genel şeklini hem de eğrilerin sahip olduğu tepe ve çukurlukları temsil edebilme yeteneği yüksektir.

Teşekkür

Rijit dinamik simülasyonları için kullanılan Ansys®'in eğitsel amaçlı kullanım imkânını sağlayan Karadeniz Teknik Üniversitesi'ne, Dr. Mehmet Seyhan'a teşekkür ederim.

Rekabetçi Menfaat Beyanı

Yazar(lar) rakip bir finansal çıkar beyan etmemektedir.

Finansman Kaynakları

Bu araştırma, kamu, ticari veya kâr amacı gütmeyen sektörlerdeki finansman kuruluşlarından herhangi bir özel hibe almamıştır.

Referanslar

Abbas, H. S., Ali, A., Hashemi, S. M., & Werner, H. (2014). LPV state-feedback control of a control moment gyroscope. *Control Engineering Practice, 24*, 129-137. doi: 10.1016/j.conengprac.2013.05.008

Ahmed, A., Adnaik, I., Bhavsar, D., & Sargar, T. S. (2016). Design and Analysis of Gyro Wheel for Stabilization of a Bicycle. *International Journal for Scientific Research & Development, 4*(04), 349-351.

Amiroh, K., Rahmawati, D., & Wicaksono, A. Y. (2021). Intelligent System for Fall Prediction Based on Accelerometer and Gyroscope of Fatal Injury in Geriatric. *Jurnal Nasional Teknik Elektro, 10*(3). doi: 10.25077/jnte.v10n3.936.2021

Anonimouse. (2023). Precession *Wikipedia®*. en.wikipedia.org: Wikimedia Foundation, Inc.,.

Ansys®. (2023). Academic Research Mechanical Products, 2021 R2, Help System, ANSYS Mechanical User's Guide: ANSYS, Inc.

Aranovskiy, S., Ryadchikov, I., Mikhalkov, N., Kazakov, D., Simulin, A., & Sokolov, D. (2021). *Scissored pair control moment gyroscope inverted pendulum*. Paper presented at the 14TH international symposium intelligent systems.

Chen, J., Wang, X., & Xu, X. (2022). GC-LSTM: graph convolution embedded LSTM for dynamic network link prediction. *Applied Intelligence, 52*(7), 7513-7528. doi: 10.1007/s10489-021-02518-9

Chen, X. (2003, 14-17 Dec. 2003). *Modeling random gyro drift by time series neural networks and by traditional method.* Paper presented at the International Conference on Neural Networks and Signal Processing, 2003. Proceedings of the 2003.

Chen, X. (2004, 2004//). *Modeling Temperature Drift of FOG by Improved BP Algorithm and by Gauss-Newton Algorithm.* Paper presented at the Advances in Neural Networks - ISNN 2004, Berlin, Heidelberg.

Chen, Z., Yang, C., & Qiao, J. (2022). The optimal design and application of LSTM neural network based on the hybrid coding PSO algorithm. *The Journal of Supercomputing, 78*(5), 7227-7259. doi: 10.1007/s11227-021-04142-3

Dash, S., & Venkatasubramanian, V. (2000). Challenges in the industrial applications of fault diagnostic systems. *Computers & Chemical Engineering, 24*(2-7), 785-791.

Dong, L., Wang, J., Tseng, M.-L., Yang, Z., Ma, B., & Li, L.-L. (2020). Gyro Motor State Evaluation and Prediction Using the Extended Hidden Markov Model. *Symmetry, 12*(11). doi:10.3390/sym12111750

Fan, Y., Ding, H., Li, M., & Li, J. (2018). Modal Analysis of a Thick-Disk Rotor with Interference Fit Using Finite Element Method. *Mathematical Problems in Engineering, 2018*, 5021245. doi: 10.1155/2018/5021245

Farzad, A., Mashayekhi, H., & Hassanpour, H. (2019). A comparative performance analysis of different activation functions in LSTM networks for classification. *Neural Computing and Applications, 31*, 2507-2521. doi: 10.1007/s00521-017-3210-6

He, J. R., & Zhao, M. G. (2015). *Control System Design of Self-balanced Bicycles by Control Moment Gyroscope*. Paper presented at the Proceedings of the 2015 Chinese Intelligent Automation Conference: Intelligent Technology and Systems.

He, Z., Wen, T., Zhang, X., Li, H., Chen, X., & Liu, X. (2022, 25-27 Nov. 2022). *Multi-physics Coupling and Thermal Network Analysis of MSCMG.* Paper presented at the 2022 China Automation Congress (CAC).

Heris, M. K. (2015). Time-series prediction using ANFIS. *The Yarpiz Project, Fuzzy Systems*.

HosseinTabari, Kisi, O., Ezani, A., & Talaee, P. H. (2012). SVM, ANFIS, regression and climate based models for reference evapotranspiration modeling using limited climatic data in a semi-arid highland environment. *Journal of Hydrology, 444-445*, 78-89. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.04.007

Huang, J., Li, J., Oh, J., & Kang, H. (2023). LSTM with spatiotemporal attention for IoT-based wireless sensor collected hydrological time-series forecasting. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*. doi: 10.1007/s13042-023-01836-3

Ibrahim, M., Badran, K., & Esmat, A. (2023). Anomaly Detection for Agile Satellite Attitude Control System Using Hybrid Deep-Learning Technique. *Aiaa Journal*, https://doi.org/10.2514/2511.I011280. doi: 10.2514/1.I011280

Jamil, F., & Kim, D. (2019). Improving Accuracy of the Alpha–Beta Filter Algorithm Using an ANN-Based Learning Mechanism in Indoor Navigation System. *Sensors, 19*, 3946. doi: 10.3390/s19183946

Kacar, İ., Eroğlu, M. A., & Yalçın, M. K. (2021). Design and development of an autonomous bicycle. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10*(1), 364-372. doi: 10.28948/ngumuh.628580

Kostyuchenko, T., & Indygasheva, N. (2018). Computer-aided design system for control moment gyroscope. *MATEC Web Conf., 158*, 01021.

Kownacki, C. (2011). Optimization approach to adapt Kalman filters for the real-time application of accelerometer and gyroscope signals' filtering. *Digital Signal Processing, 21*(1), 131-140. doi: 10.1016/j.dsp.2010.09.001

Li, Y., Hu, Q., & Shao, X. (2022). Neural network-based fault diagnosis for spacecraft with single-gimbal control moment gyros. *Chinese Journal of Aeronautics, 35*(7), 261-273. doi: https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.11.020

Miao, J., Li, X., & Ye, J. (2015, 21-23 Oct. 2015). *Predicting research of mechanical gyroscope life based on wavelet support vector.* Paper presented at the 2015 First International Conference on Reliability Systems Engineering (ICRSE).

Million, E. (2007). The Hadamard product. In R. A. Beezer (Ed.), *Linear Algebra* (pp. 1-7). Rob Beezer's Home Page: Buzzard.

Montoya-Chairez, J., Santibanez, V., & Moreno-Valenzuela, J. (2019). Adaptive control schemes applied to a control moment gyroscope of 2 degrees of freedom. *Mechatronics, 57*, 73-85. doi: 10.1016/j.mechatronics.2018.11.011

Nl, C. (2023). Gyroscope physics. *Cleonis, 1*(1), 1.

Osman, M. O. M., Sankar, S., & Dukkipati, R. V. (1982). Design synthesis of a gyrogrinder using direct search optimization. *Mechanism and Machine Theory, 17*(1), 33-45. doi: 10.1016/0094-114X(82)90022-2

Pan, S., Xu, Z., & Zhao, C. (2019). A novel single-gimbal control moment gyroscope driven by an ultrasonic motor. *Advances in Mechanical Engineering, 11*(4), 1687814019844382. doi: 10.1177/1687814019844382

Shen, L., Zhu, Y., Liu, C., Wang, W., Liu, H., Kamruzzaman, . . . Zheng, X. (2020). Modelling of moving drying process and analysis of drying characteristics for germinated brown rice under continuous microwave drying. *Biosystems Engineering, 195*, 64-88.

Shi, H., Hu, S., & Zhang, J. (2019). LSTM based prediction algorithm and abnormal change detection for temperature in aerospace gyroscope shell. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics, 12*(2), 274-291. doi: 10.1108/IJICC-11-2018-0152

Song, H., Hu, S.-L., & Zhou, K.-Y. (2017). Review on Development of Fault Diagnosis for Gyroscope. *ITM Web Conf., 11*, 07001. doi: 10.1051/itmconf/20171107001

Sucuoglu, H. S., Bogrekci, I., Gultekin, A., & Demircioglu, P. (2018). Design, Analysis and Development of Mobile Robot with Flip-Flop Motion Ability. *IFAC-PapersOnLine, 51*(30), 436-440. doi: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.323

Sun, J., Cai, Z., Sun, J., & Jin, D. (2023). Dynamic analysis of a rigid-flexible inflatable space structure coupled with control moment gyroscopes. *Nonlinear Dynamics, 111*(9), 8061-8081. doi: 10.1007/s11071-023-08254-8

Taheri, S., Brodie, G., & Gupta, D. (2021). Optimised ANN and SVR models for online prediction of moisture content and temperature of lentil seeds in a microwave fluidised bed dryer. *Computers and Electronics in Agriculture, 182*, 106003. doi: 10.1016/j.compag.2021.106003

Tobon-Mejia, D. A., Medjaher, K., Zerhouni, N., & Tripot, G. (2012). A Data-Driven Failure Prognostics Method Based on Mixture of Gaussians Hidden Markov Models. *IEEE Transactions on Reliability, 61*(2), 491-503. doi: 10.1109/TR.2012.2194177

Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Kavuri, S. N., & Yin, K. (2003). A review of process fault detection and diagnosis: Part III: Process history based methods. *Computers & Chemical Engineering, 27*(3), 327-346. doi: 10.1016/S0098-1354(02)00162-X

Xiu, T., Yue-dong, L., Xin-xiao, L., & Er-yong, H. (2021). Structural Engineering Analysis for a Control Moment Gyroscope Framework. *Journal of Physics: Conference Series, 1939*, 012119. doi: 10.1088/1742-6596/1939/1/012119

Xudong, Y., Pengfei, Z., Yuanping, X., & Xingwu, L. (2013). Forecasting method for axial ring laser gyroscope drifts in single-axis rotation inertial navigation system. *High Power Laser and Particle Beams, 25*(04), 847-852. doi: 10.3788/HPLPB20132504.0847

Yuan, X., Chen, C., Lei, X., Yuan, Y., & Muhammad Adnan, R. (2018). Monthly runoff forecasting based on LSTM–ALO model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 32*(8), 2199-2212. doi: 10.1007/s00477-018-1560-y

Zhou, Z.-J., & Hu, C.-H. (2008). An effective hybrid approach based on grey and ARMA for forecasting gyro drift. *Chaos, Solitons & Fractals, 35*(3), 525-529. doi: 10.1016/j.chaos.2006.05.039

Zhu, R., Zhang, Y., & Bo, Q. (2000). Identification of temperature drift for FOG using RBF neural networks. *34*, 222-225.

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

UMAGD, (2023) 15(3), s194-s208.

10.29137/umagd.1364476

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:3 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue

Araştırma Makalesi / Research Article

Ağır Silah Namlusunun Mekanik Otofretaj İşleminde Gerilme Dağılımının Sayısal Olarak İncelenmesi

Numerical Investigation of Stress Distribution in Swage Autofrettage Process for Heavy Weapon Barrel

Doğan Baran*[1], Osman Bican[1], Yahya Doğu[1]

[1]*Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 21/09/2023* ***Kabul / Accepted**: 7/10/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Öz

Otofretaj, kalın cidarlı silindirlerin basınç taşıma kapasitesini ve yorulma ömrünü artırmak için silindir et kalınlığında artık kalıcı gerilme oluşturma işlemidir. Bu artık gerilme, çalışma basıncının oluşturduğu gerilmenin bir kısmını nötr ederek, basınçlı kapların basınç taşıma kapasitesini artırır. Pratikte birçok otofretaj yöntemi olmakla beraber, özellikle ağır silah namlularında uygulanan iki otofretaj yöntemi mekanik ve hidrolik otofretaj işlemidir. Bu çalışmada, ağır silah namlusuna mekanik otofretaj uygulanması ile oluşan gerilmeler sonlu elemanlar metodu (SEM) ile sayısal olarak hesaplanmıştır. SEM modelinde iki boyutlu (2B) aksisimetrik geometri kullanılmıştır. SEM modeli literatürdeki veriler ile doğrulanmıştır. Otofretajsız namluda 670 MPa çalışma basıncı altında namlu iç çapında Von Mises eşdeğer gerilmenin değeri 1350,3 MPa olarak hesaplanmıştır. Otofretaj uygulanmış namluda ise Von Mises eşdeğer gerilmesinin maksimum değeri, namlunun et kalınlığının %63'ne karşılık gelen bölgede 1122,3 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu gerilme değerinin namlu akma mukavemeti olan 1195 MPa'ın altında olduğu görülmektedir. Sonuç olarak çalışma basıncı altında otofretaj uygulanmış namluda Von Mises eşdeğer gerilmesi, otofretaj uygulanmayan namluya göre %16,88 oranında azalmıştır. Bu sebeplerden dolayı, ağır silah namlularında otofretaj işleminin uygulanması ve oluşan gerilmelerin hesaplanması namlu ömrü ve basınç taşıma kapasitesi açısından kritik öneme sahiptir.

Anahtar Kelimeler

"Mekanik Otofretaj, Artık Gerilme, SEM Analizi"

Abstract

Autofrettage process is used to form residual stresses in order to increase the pressure carrying capacity and fatigue life of thick-walled cylinders. These residual stresses counteract some of the stresses during service pressure application and increase the pressure carrying capacity of pressure vessels. Although there are many techniques in practice, swage and hydraulic autofrettage processes have been mostly used in heavy gun barrel production process. In this study, the stresses developed at the end of the swage autofretage process on a heavy gun barrel are numerically calculated by using an FEM (Finite Element Method) program. In FEM analysis, a two-dimensional (2D) axisymmetric model has been used. The FEM model is validated with data from the literature. The Von Mises stress under working pressure for non-autofrettaged barrel is calculated as 1350.3 MPa. The Von Mises equivalent stress for the autofrettaged barrel is 1122.3 MPa at 63% barrel thickness. It is seen that this stress is below the barrel yield strength of 1195 MPa. As a result, there is 16.88% reduction of Von Mises stress for autofrettaged barrel under the working pressure. Thus, the application of autofrettage process on heavy weapon barrels and the calculation of the resulting stresses are critical for barrel life and pressure carrying capacity.

Key Words

"Swage Autofrettage, Residual Stress, FEM Analysis"

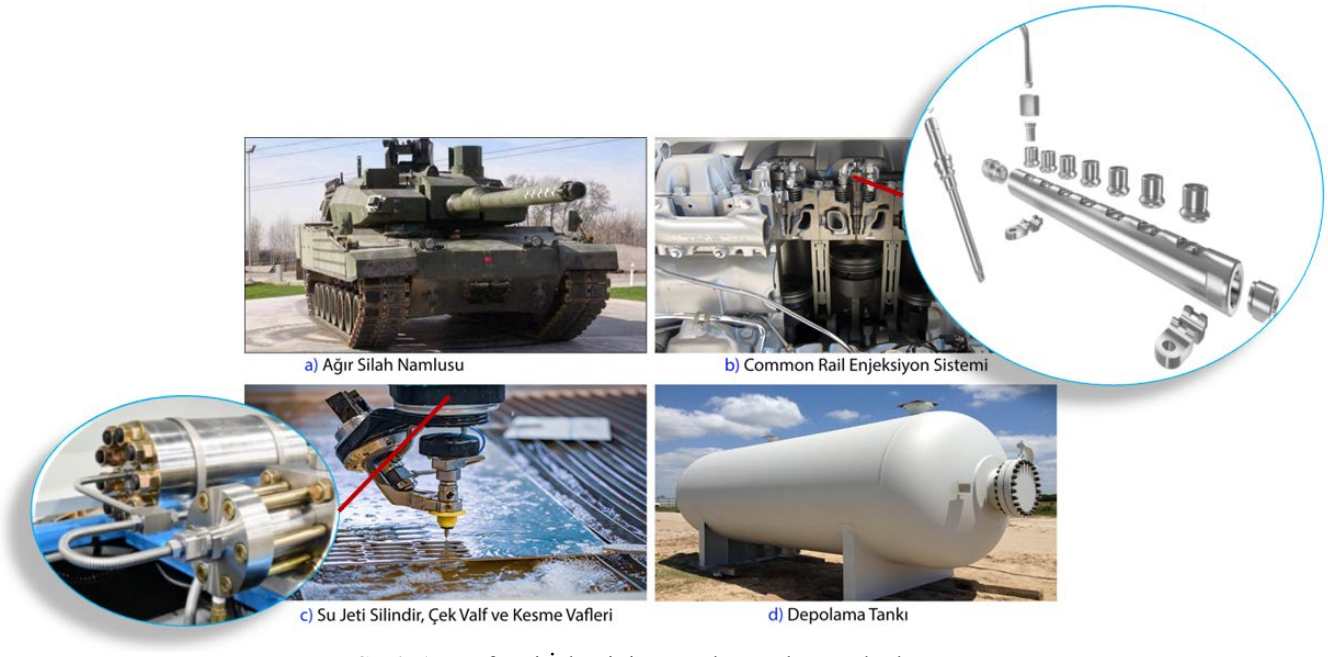
***Sorumlu Yazar:** doganbaran.90@gmail.com*

1. Giriş

Genel olarak, darbeli ve değişken yüksek basınçlar altında çalışan kalın cidarlı silindirlere, kalıcı artık gerilme oluşturarak basınç taşıma kapasitesini artıran otofretaj işlemi uygulanmaktadır. Otofretaj işlemi ile oluşan kalıcı artık gerilme, silindirin yorulma ömrünü önemli seviyede artırmaktadır (Majzoobi & Ghomi, 2006a; Ali vd., 2010; Shim vd., 2010).

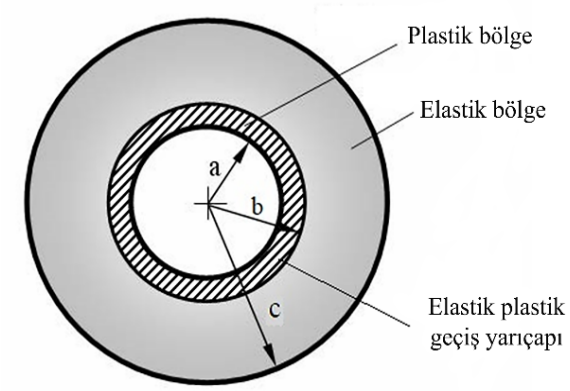
Otofretaj işleminin pratikteki uygulama örnekleri aşağıda listelenmiştir ve Şekil 1'de gösterilmiştir.

1) Ağır silah namluları (Gibson vd. (2012, 2014), Hu vd., (2014, 2019)),
2) Dizel motor common-rail yakıt enjeksiyon sistemlerinin yakıt püskürtme nozulları (Jain vd., 2016),
3) Su jetlerinin yüksek basınca maruz kalan silindir, çek valf ve kesme valfleri ((Trieb vd., 2005; Çandar & Filiz, 2017),
4) Petrokimya endüstrisinde kullanılan depolama tankları (Partovi, 2012; Kamal & Dixit, 2015),
5) Nükleer santrallerdeki yakıt kazanları (Majzoobi & Ghomi, 2006b; Malik vd., 2007),
6) Gıda teknolojisindeki besin işlemi tekniği (Alegre vd., 2006).



Şekil 1. Otofretaj İşleminin Genel Uygulama Alanları

Otofretaj işleminde, kalın cidarlı silindirin iç yüzeyi, çalışma basıncının üzerinde ve silindir cidarını plastik deformasyona uğratmaya yetecek kadar yüksek bir iç basınca maruz bırakılır. Basıncın uygulanması ile silindir cidarında elastik-plastik bir geçiş bölgesi oluşur (Şekil 2). Uygulanan basınç kaldırıldığında silindir iç tarafı elastik-plastik geçiş yarıçapına (b yarıçapı) kadar plastik deformasyona uğrar. Silindirin dış çapında oluşan elastik toparlanma ise silindir cidarını içe doğru baskı altına alır. Dolayısıyla, iç yüzeye yakın bölgelerde bası (-) yönünde artık gerilme oluşurken dış yüzeyde ise çeki (+) yönünde artık gerilme oluşur. Oluşan bası (-) yönündeki artık gerilme, çalışma basıncı altında oluşan teğetsel gerilmeleri sönümleyerek gerilmelerin seviyesini azaltır. Böylece, otofretaj işlemi silindirin basınç taşıma kapasitesini artırırken silindirin yorulma ömrünün de artmasını sağlar.



Şekil 2. Elastik-Plastik Geçiş Yarıçapı

Savunma sanayi özelinde, ağır silah namlusu üretimi için otofretaj işlemi çok önemli bir işlem adımıdır. Ağır silah namlularının çalışma şartlarında tipik olarak barutun yanması ile oluşan namlu iç yüzey sıcaklığı 1100°C seviyesine kadar çıkmaktadır. Maksimum barut gazı basıncı ise 4000 bar seviyelerine ulaşmaktadır (Lawton, 2001; Putti vd., 2016). Bu yüksek sıcaklık ve basınç altında, tekrarlı atışlarda çalışan ağır silah namluları için otofretaj işlemi önemli bir yer teşkil etmektedir.
Günümüzde ağır silah namlularına mekanik veya hidrolik otofretaj işlemi uygulanmaktadır. Genelde yüksek çaplarda hidrolik otofretaj işlemi uygulanırken, küçük çaplarda ise mekanik otofretaj işlemi daha yaygın kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında ağır silah namlusuna uygulanan mekanik otofretaj işleminde oluşan gerilmeler sonlu elemanlar metodu (SEM) ile sayısal olarak hesaplanmıştır.

Mekanik otofretaj işleminde ağır silah namlusunun plastik deformasyonu, namlu ekseni boyunca boyda boya geçirilen iç çaptan daha büyük bir geometriye sahip, özel olarak imal edilmiş bir mandrel yardımıyla sağlanır.

Mandrelin namlu içinde hareketini sağlayabilmek için namlu ile mandrel arasında oluşan sürtünme kuvvetini yenebilecek bir kuvvete ihtiyaç vardır. Mandrel namlu içinde hareket ederken sürtünme katsayısını ve oluşan direnç kuvvetini azaltmak için özel yağlar kullanılır. Ayrıca, namlu iç yüzeyine fosfat kaplama (çinko/mangan) ve bu kaplamanın üzerine stearate bazlı yağlar (O'hara, 1992) tatbik edilmesi uygulamada en fazla tercih edilen yöntemdir.

Mekanik otofretaj işleminin en önemli özelliği, hazırlık ve uygulama aşamalarının kolay ve hızlı olmasıdır. En önemli dezavantajı ise, işlem uygulanmadan önce imalat toleranslarının oldukça dar olmasıdır. Ayrıca, değişken iç çapa sahip namlularda bu işlemin uygulanması mümkün değildir.

Mekanik otofretaj işleminde oluşan gerilme dağılımlarının incelenmesi ile ilgili literatürde bulunan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir:

Alinezhad & Bihamta (2012), ABAQUS programı ile mandrel geometrisinde yapılan modifikasyonların, mekanik otofretaj işlemi sonunda oluşan artık gerilmeleri nasıl etkilediğini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Deneysel sonuçların sayısal sonuçları destekler yönde olduğu belirlenmiştir.

Hu & Penumarthy (2014) kalın cidarlı bir silindirdeki mekanik otofretaj işlemini ANSYS programı ile incelemiştir. Çalışmada, malzeme modeli olarak Bauschinger etkisini de içeren kinematik pekleşme modeli kullanılmıştır. Mekanik otofretaj işlemi sonunda oluşan artık gerilmeler sayısal olarak hesaplanmış ve literatürde verilen deneysel artık gerilme değerleri ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçların, numune üzerinde artık gerilme ölçümünden önce yapılan hazırlık işlemlerinden kaynaklı olumsuz etkilerden dolayı, sayısal sonuçlarla benzerlik göstermediği tespit edilmiştir. Ayrıca, Bauschinger etkisi ve sürtünme katsayısının, gerilme-gerinim dağılımları üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Nihai olarak optimum mandrel geometrisi ve buna bağlı olarak çalışma basıncı altında oluşan Von Mises eşdeğer gerilme değeri hesaplanmıştır.

Gibson vd. (2014) mekanik otofretaj işleminde oluşan deformasyon mekanizmasını incelemek ve artık gerilmeleri hesaplamak için ANSYS programını kullanmıştır. Mandrel koniklik açısı, mandrel üzerindeki düz bölgenin uzunluğu ve sürtünme katsayısı parametrelerine göre analizler yapılmıştır. Sonuç olarak eksenel gerilmelerin, artık teğetsel gerilme ve ikinci bir plastik akma üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Chica vd. (2019) soğuk şekillendirme tabanlı düşünerek analizler gerçekleştirmiştir. Mandrelin geometrik özelliklerinden olan ön konik açı, mandrel üzerindeki düz bölgesinin uzunluğu ve yüzde arakesit oranı değiştirilerek parametrik analizler gerçekleştirilmiş ve bunların artık gerilmeler üzerindeki etkileri ANSYS programı ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki ağır silah namlusu mekanik otofretaj işleminde elde edilen sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca çalışmada, daha küçük delik çapına sahip geometriler için dış/iç çap oranının mekanik otofretaj sonunda oluşan artık gerilmelere etkisi incelenmiştir.

Hu vd. (2021) A723 çeliği ile imal edilmiş kalın cidarlı bir silindirde mekanik otofretaj işlemini incelemek için Bauschinger etkisini de göz önünde bulundurarak geliştirdikleri fonksiyonları ANSYS programına entegre ederek analizler gerçekleştirmiştir. Analizlerde malzeme tanımlaması yapmak için, A723 çeliğindeki Bauschinger etkisini yansıtan çekme testleri gerçekleştirilmiş ve bu testlerin doğrulaması yapılmıştır. Geliştirilen malzeme modeli ile literatürde verilen malzeme modelleri arasında karşılaştırma yapılmıştır.

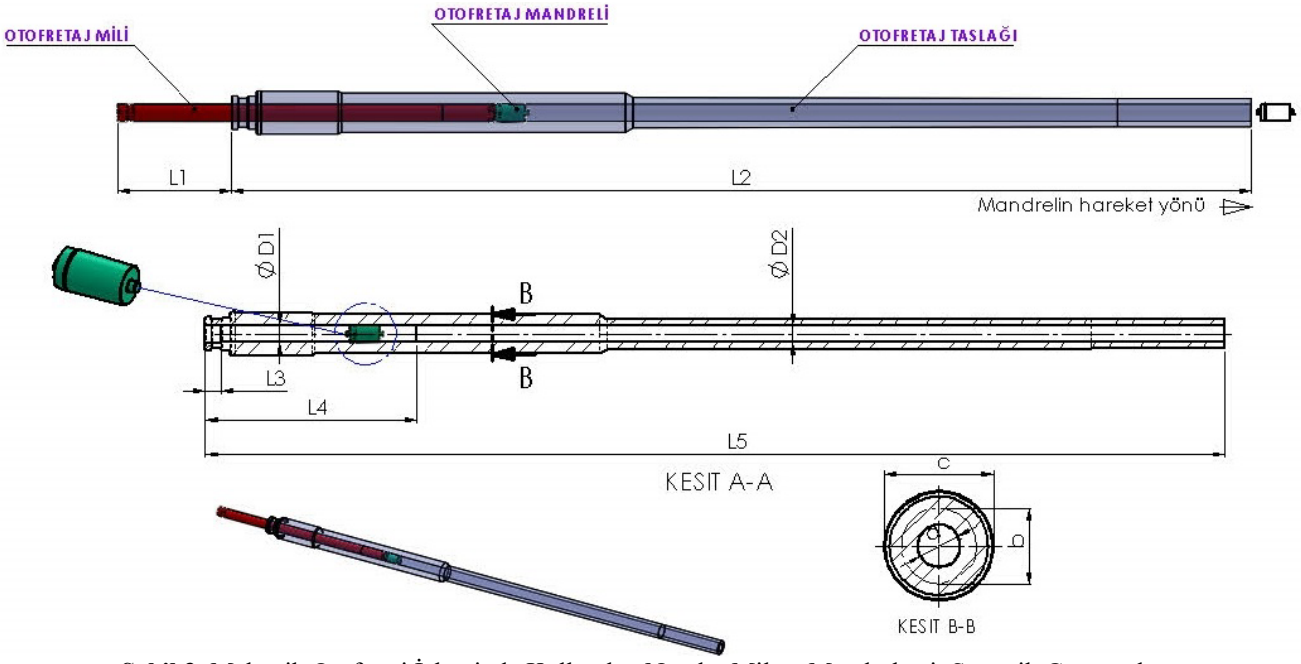
Bunlara ek olarak Bauschinger etkisini de içeren mekanik otofretaj çözümleri ile buna eşdeğer hidrolik otofretaj çözümleri karşılaştırılmıştır. Mekanik otofretaj işlemi sonunda, silindir iç yüzeyine yakın bölgede oluşan teğetsel artık gerilme değerlerinin, hidrolik otofretaj işlemindeki sonuçlara nazaran daha derin ve bası (-) yönünde olduğu görülmüştür. Bununla beraber, mekanik otofretaj işlemi sonunda çeki (+) yönünde eksenel gerilme oluşurken, hidrolik otofretaj işlemi sonunda bası (-) yönünde eksenel gerilme oluştuğu tespit edilmiştir. Son aşamada, mekanik otofretaj işleminden sonra silindir üzerindeki talaş kaldırma işleminin, silindir iç yüzeyine yakın yerlerde oluşan gerilme dağılımlarını ciddi şekilde iyileştirdiği görülmüştür.

2. Mekanik Otofretaj

Ağır silah namlularının mekanik otofretaj işlemi, namlu iç çapı boyunca iç çaptan daha büyük bir çapa sahip özel imal edilmiş konik bir mandrel geçirilerek yapılır (Şekil 3). Mekanik otofretaj ile ilgili ilk çalışmalar Davidson vd. (1963) tarafından gerçekleştirilmiştir.

Mekanik otofretaj işlemi için özel tasarlanmış tezgahlar kullanılır. Namlu iç çapından daha büyük olan konik mandrelin, eksenel olarak namlu içinden boydan boya geçirilmesini sağlamak, mekanik sürtünme ve elastik-plastik şekil değişimlerinden dolayı kritik bir işlemdir. Mekanik otofretaj işleminde kullanılan mandrel, namlu uzunluğuna göre belirli sayıda mil kullanılarak namlu içinden boydan boya geçirilir. Milleri, dolayısıyla mandreli hareket ettirmek için tezgahtaki hidrolik ünite kullanılır.

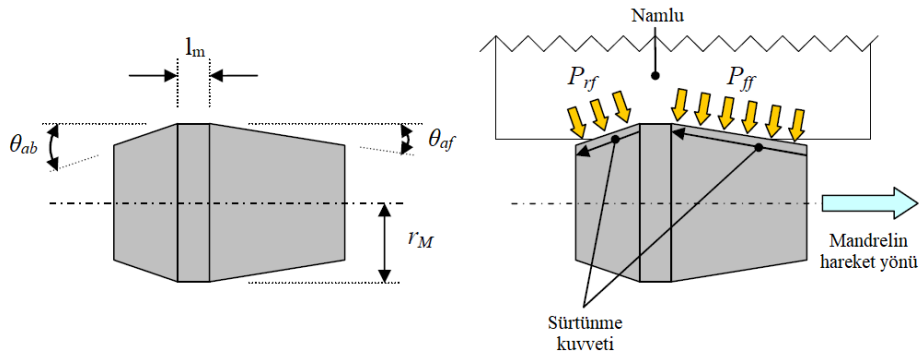
Mekanik otofretaj işlemi esnasında meydana gelen yüklemeler, işlemin geometrik uygulaması gereği olarak oldukça küçük bir temas alanı olan konik mandrelin düz kısmında gerçekleşir ki bu sebeple hidrolik otofretaj işleminden farklıdır (Gibson, 2008). Mekanik otofretaj işleminde bölgesel deformasyon esnasında mandrel-namlu arasındaki sürtünmeden dolayı çok yüksek kayma gerilmeleri oluşur.



Şekil 3. Mekanik Otofretaj İşleminde Kullanılan Namlu, Mil ve Mandrele ait Şematik Görünüşler

Mekanik otofretaj işleminde kullanılan mandreller tipik olarak sabit çaplı ortadaki kısa düz bir bölgenin, farklı açılardaki iki konik bölge ile birleşmesinden oluşur (Şekil 4). Mandrelin ön konik bölgesinin eğimi arka konik bölgeye kıyasla daha küçüktür.

Mandrel üzerinde bulunan ön ve arka konik bölgeler, yalnızca mandrelin namlu içinde merkezlenmesini sağlamaz; aynı zamanda plastik deformasyonu ve kalıcı artık gerilme oluşumunu sağlar.

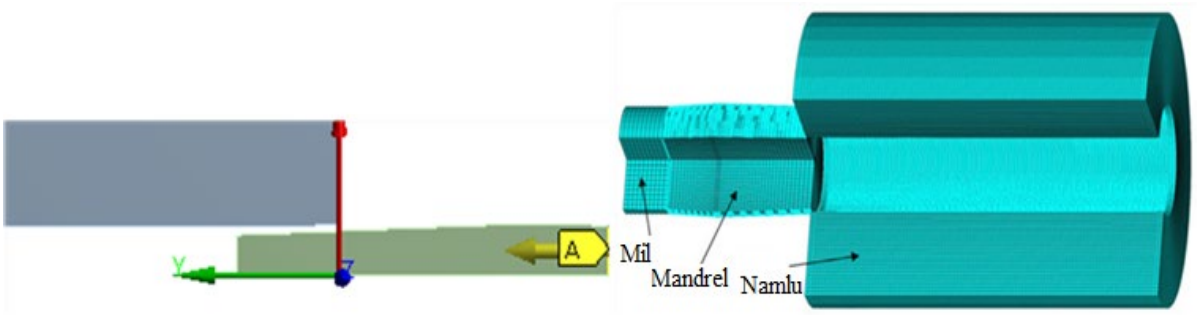


Şekil 4. Mekanik Otofretaj İşleminde Kullanılan Mandrel (Gibson, 2008)

Bu çalışmada, mekanik otofretaj işleminde oluşan gerilme dağılımlarının hesaplanması için SEM tabanlı ANSYS paket programı kullanılmıştır. SEM analizi için kullanılan namlu ve mandrel geometrisine ait bilgiler, malzeme bilgileri ve modele ait ağ yapısı ilerleyen alt bölümlerde açıklanmıştır. Ayrıca analiz kapsamında oluşturulan SEM modelinin doğrulama çalışmaları da gerçekleştirilmiştir.

3. SEM Modeli

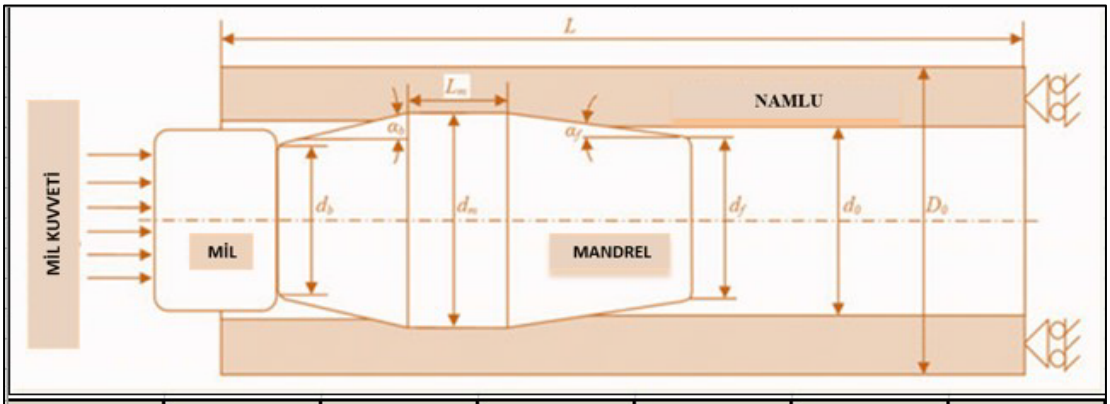
Mekanik otofretaj işleminin sayısal olarak modellenmesi için literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar arasında O'hara (1992), Iremonger & Kalsi (2003), Gibson vd. (2012, 2014), Hu vd., (2014; 2019) ve Chica (2019)'nın çalışmaları ön plana çıkmaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, mekanik otofretaj sayısal hesaplamaları için, iki boyutlu (2B) aksisimetrik modellerin (O'hara, 1992; Iremonger & Kalsi, 2003; Gibson vd., 2012, 2014; Chica vd., 2019) ve üç boyutlu (3B) çeyrek kesitli modellerin (Bihamta vd., 2007; Hu vd., 2014, 2021; Hu, 2019) kullanıldığı görülmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Literatürde Kullanılan İki (2B) ve Üç (3B) Boyutlu SEM Modeli

Bu çalışma kapsamında ise mekanik otofretaj işleminin sayısal olarak modellenmesi için iki boyutlu (2B) aksisimetrik model kullanılmıştır. Bu modelleme SEM tabanlı ANSYS paket programında yapılmıştır. Silindirik koordinatlarda gerçekleşen otofretaj işlemi geometrik ve sınır şartları dikkate alındığında aksisimetrik olarak iki boyutlu olarak modellenebilir. Ayrıca, iki boyutlu modelleme sayesinde daha yoğun ağ yapısı ve analiz süresinin azaltılması sağlanır.

Mekanik otofretaj SEM modelinde kullanılan namlu ve mandrelin temel geometrik boyutları Şekil 6'da şematik olarak gösterilmiştir (Hu vd., 2014). Burada namlu uzunluğu (L) olarak namlunun ateşleme sonrasında en yüksek ısıl ve basınç yüklerine maruz kaldığı en kritik bölge olan ilk 400 mm'lik mesafe alınmıştır. SEM modelinde kullanılan diğer ölçüler Şekil 6'da verilmiştir.

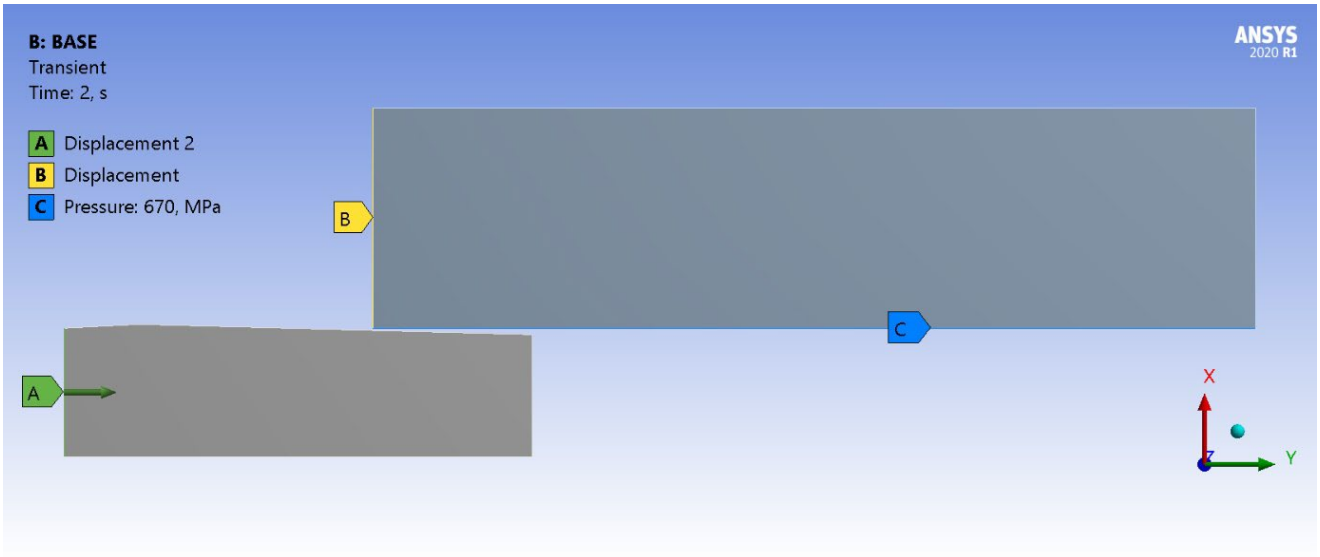


D_0(mm)	d_0 (mm)	L (mm)	d_m (mm)	L_m (mm)	a_f (°)	a_b (°)
Ø315	Ø116	400	Ø119,4	6,35	1,5	3

Şekil 6. Namlu ve Mandrel Şeması ve Geometrik Ölçüleri

ANSYS paket programında oluşturulan SEM modeli ve sınır şartları Şekil 7'de gösterilmiştir. Mandrelin A yüzeyinin x yönündeki hareketi kısıtlanmıştır ve y yönündeki hareketi için ise mandrelin namlunun içinden boydan boya geçmesi için 540 mm yer değiştirme tanımlanmıştır. Namlunun B yüzeyinin x yönündeki hareketine izin verilmiş ve y yönündeki hareketi ise sınırlandırılmıştır. Mandrelin namlu içindeki boydan boya hareketi tamamlandıktan sonra, ağır silah namlusunun çalışma basıncı olan 670 MPa basınç değeri,

namlunun iç yüzeyi olan C yüzeyine sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Çalışma basıncı olarak ilgili ağır silah namlusunun ortalama hazne basıncı olan 670 MPa değeri kullanılmıştır (Kruczynski & Hewitt, 1991; MKE, 2021).



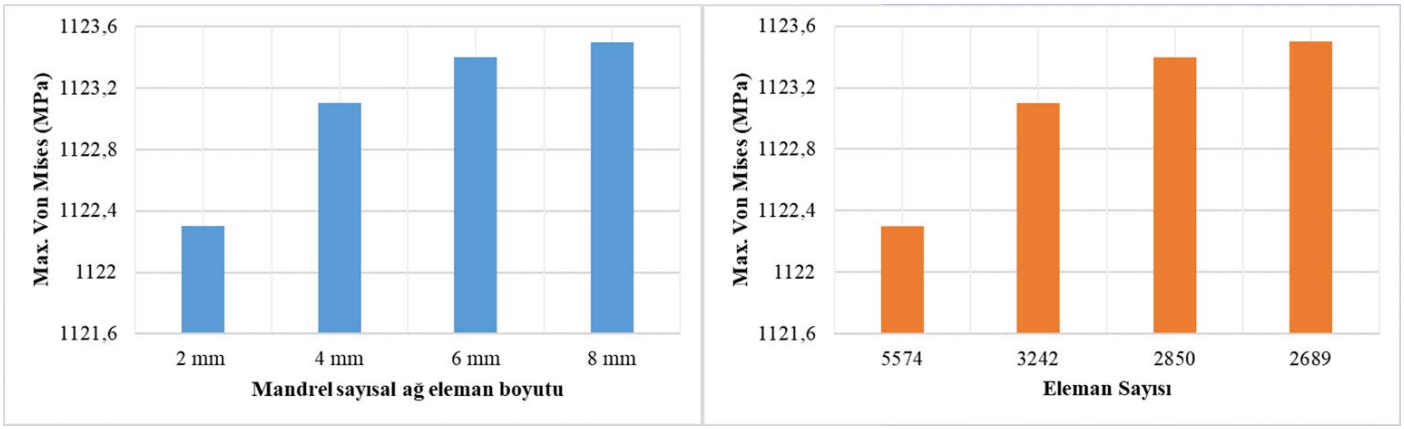
Şekil 7. SEM Modeli ve Sınır Şartları

SEM analizinde malzeme modeli olarak bilineer kinematik pekleşme modeli kullanılmıştır. Namlu ve mandrel için kullanılan malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Namlu malzemesi olarak kullanılan Ç4340 çeliği dikkate alınmıştır. Bu malzemenin akma mukavemeti (σ_y) 1195 MPa, tanjant modülü (T) ise 3723 MPa'tır. Mandrel malzemesi olarak ise namlu malzemesinden daha tok ve mukavemetli bir yapıya sahip olan WC (tungsten karbür) kullanılmıştır. Tablo 1'de verilen mandrel malzemesinin de mekanik özellikleri SEM modelinde tanımlanmıştır (Gibson, 2008).

Tablo 1. SEM Modelinde Tanımlanan Malzeme Özellikleri

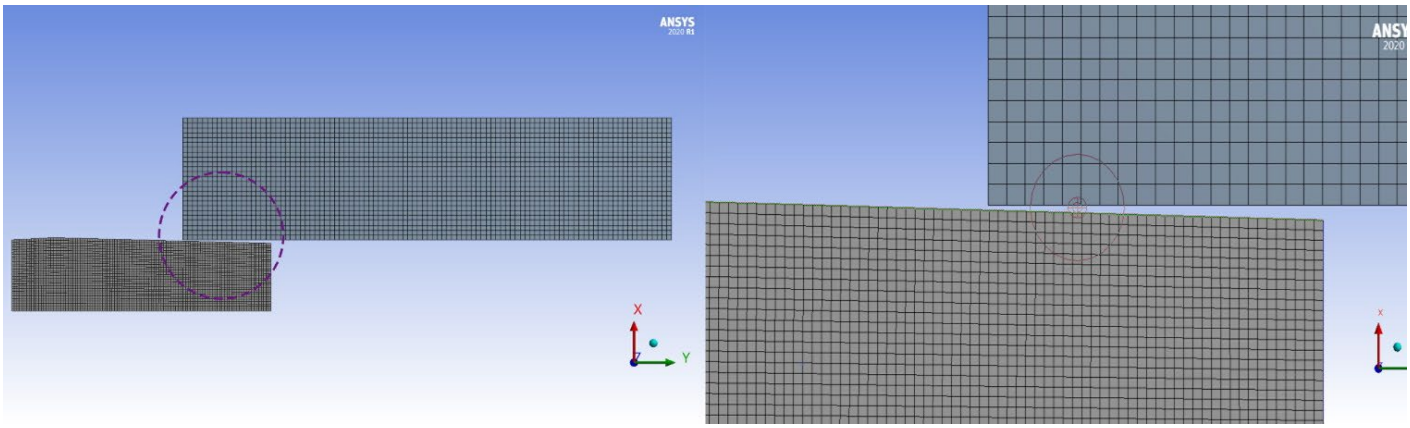
Namlu		**Mandrel**	
Parametre	**Değer**	**Parametre**	**Değer**
E (GPa)	200	E (GPa)	500
ϑ	0,3	Θ	0,24
σ_y (MPa)	1195	σ_y (MPa)	-
T (MPa)	3723	T (MPa)	-

Literatürdeki bazı çalışmalarda, ağ yapısı oluşturulurken özellikle mandrel üzerindeki düz bölgenin (L_m) kaç parçaya bölüneceğinin elde edilen gerilme dağılımlarının hata oranını etkilediği ifade edilmektedir (Gibson vd. (2012, 2014). Analiz sonuçlarının ağ sayısından bağımsız olup olmadığını göstermek için analizler mandrel ağ yapısı eleman boyutu değiştirilerek tekrarlanmıştır. Mandrelin düz bölgesi için sırasıyla 2, 4, 6 ve 8 mm eleman boyutu kullanılarak ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu boyutlara karşılık gelen eleman sayıları sırasıyla 5574, 3242, 2850 ve 2689'dur. Şekil 8'de gösterildiği gibi değişen mandrel ağ yapısı eleman boyutuna bağlı olarak 670 MPa çalışma basıncı altında oluşan maksimum Von Mises eşdeğer gerilme değerinin kayda değer seviyede değişmediği görülmüştür.



Şekil 8. Maksimum Von Mises Eşdeğer Gerilme Değerinin Farklı Ağ Eleman Boyutlarına Göre Değişimi

Bu sonuçlar göre, mandrel için 2 mm, namlu için ise 4 mm boyutunda elemanlar kullanılmış ve oluşan ağ yapısı Şekil 9'da gösterilmiştir. Namlu ve mandrel için düğüm/eleman sayısı (node/element) toplamda 17244/5574 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9. SEM Modeli Ağ Yapısı

4. Sonuçlar

Çalışma kapsamında, mekanik otofretaj işlemi sonunda elde edilen gerilme dağılımı SEM programı ile sayısal olarak hesaplanmıştır. Oluşturulan SEM modelinin doğruluğunu teyit etmek amacıyla, literatürde verilen analizler tekrarlanmıştır (Gibson vd., (2012, 2014)). Ardından incelenen ağır silah namlusu için model/malzeme/sınır şartı tanımlamaları yapılarak sonuçlar elde edilmiştir.

Ayrıca, doğrulama çalışmalarından sonra, SEM analizi ile referans geometri için otofretajsız ve otofretaj uygulanmış namluda çalışma basıncı altında hesaplanan gerilme değerleri karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

4.1. Doğrulama çalışmaları

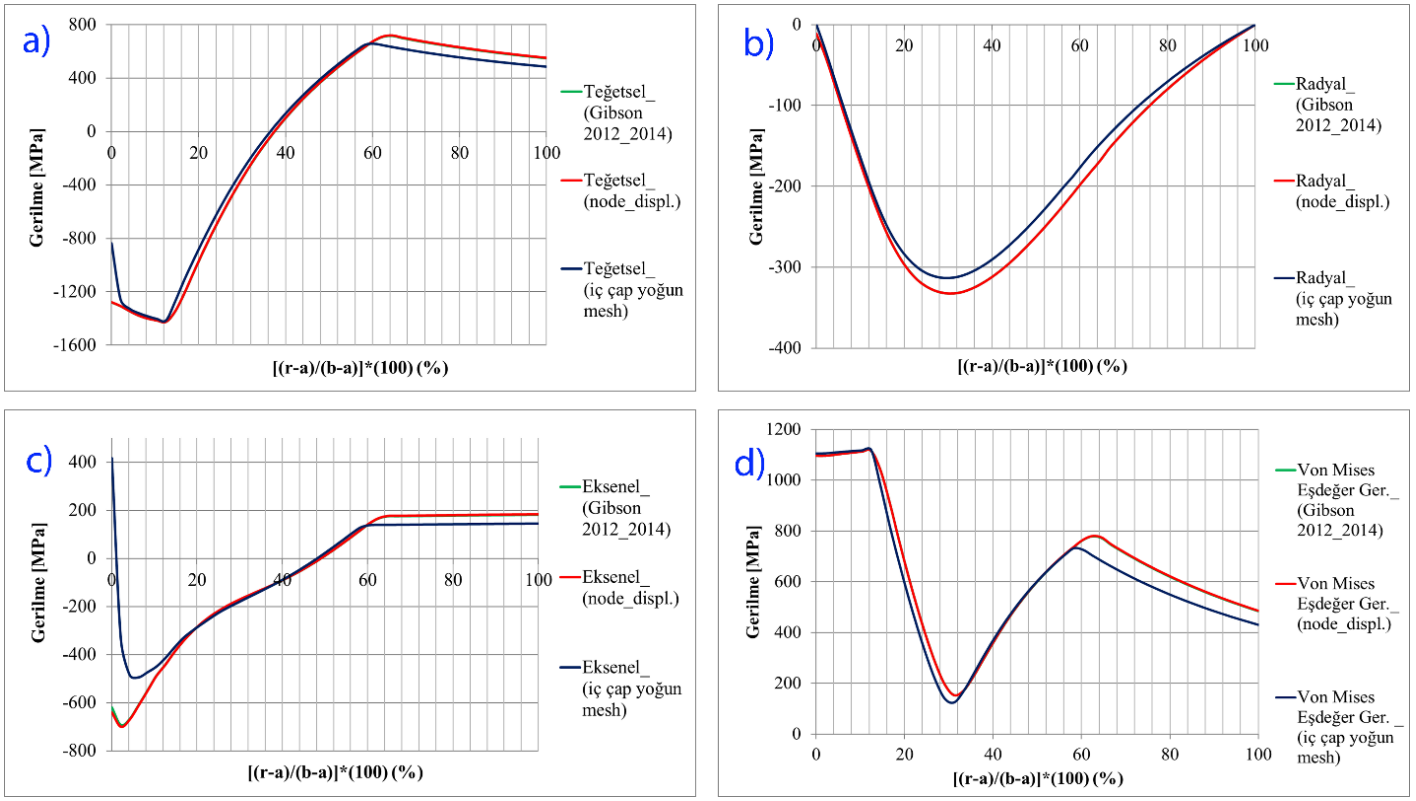
Çalışma kapsamında oluşturulan mekanik otofretaj SEM modelinin doğruluğunu teyit etmek için Gibson'ın iki boyutlu (2B) modelleri referans olarak alınmıştır. Bu amaçla, Gibson vd. (2012, 2014)'nin 2B analizleri ilgili geometri, malzeme, ağ yapısı ve sınır şartları kullanılarak yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 10'da karşılaştırılmıştır. Yatay eksen namlunun iç ve dış çapına göre normalize edilmiş radyal namlu kalınlığını göstermektedir (r*=(r-a) / (b-a) *100). Şekil 10'da gösterildiği gibi, mevcut SEM modeli ile mekanik otofretaj işlemi sonunda elde edilen teğetsel (a), radyal (b), eksenel (c) ve Von Mises eşdeğer (d) gerilme değerlerinin, Gibson vd., (2012, 2014)'nin elde ettiği gerilmelere çok yakın olduğu görülmüştür. Sadece, namlu iç çapına yakın yerde yoğun ağ yapısının kullanıldığı varyasyon için fark bir miktar fazla olmuştur.

Ayrıca, bu doğrulama çalışmasına ek olarak; O'hara, G.P. (1992)'nın yaptığı gibi, namlunun arka yüzeyi yerine, otofretaj işlemi esnasında namluyu tutan çenelerin bulunduğu dış çaptaki düğüm noktasından sabitlenerek de (node displacement) analiz yapılmıştır. Namlu arka yüzeyinin ve dış çaptaki düğümün sabitlenmesi ile elde edilen sonuçlar birbiri üzerine çakışmıştır.

4.2. Ağır Silah Namlusu Mekanik Otofretajında Oluşan Gerilme Dağılımları

İncelenen ağır silah namlusu için model/malzeme/sınır şartı tanımlamaları yapılarak analizler çalıştırılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca mekanik otofretaj işlemi esnasında oluşan gerilmelere ait SEM görüntüleri de verilmiştir.

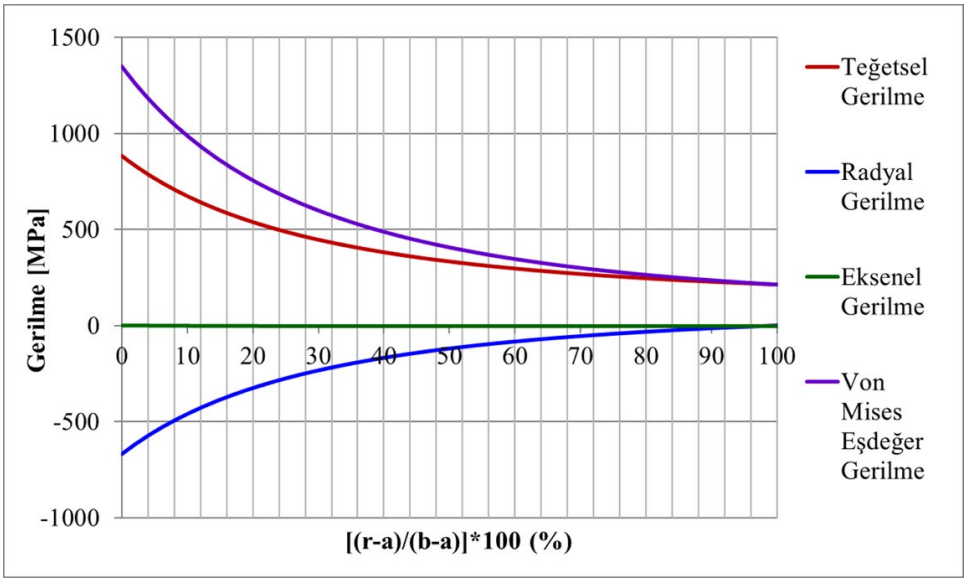
Aşağıda, karşılaştırma ve takip kolaylığı açısından sırasıyla otofretajsız namluda çalışma basıncında oluşan gerilme dağılımı, otofretaj esnasında ve bitiminde namluda oluşan gerilme dağılımı, otofretajlı namluda çalışma basıncında oluşan gerilme dağılımı ile otofretajsız ve otofretajlı namluda çalışma basıncında oluşan gerilme dağılımının karşılaştırılması verilmiş ve yorumlar yapılmıştır.



Şekil 10. Doğrulama Çalışmasında Elde Edilen Gerilme Dağılımları a) Teğetsel b) Radyal c) Eksenel d) Von Mises Eşdeğer

4.2.1. Otofretajsız Namluda Çalışma Basıncında Oluşan Gerilme Dağılımı

Öncelikle, otofretaj uygulanmamış namluda 670 MPa çalışma basıncı altında radyal yönde oluşan gerilme dağılımları referans olarak kullanılmak üzere Şekil 11'de verilmiştir. Yatay eksen namlunun iç ve dış çapına göre normalize edilmiş radyal namlu kalınlığını göstermektedir (r*=(r-a) / (b-a) *100). Düşey eksende ise teğetsel (a), radyal (b), eksenel (c) ve Von Mises eşdeğer (d) gerilme değerleri verilmiştir. Şekil 11'de gösterildiği gibi, teğetsel gerilmenin namlu iç yarıçapında 884,87 MPa değerinde olduğu, dış çapa doğru ise asimptotik olarak 211,95 MPa değerine düştüğü görülmektedir. Radyal gerilme iç çaptan dış çapa doğru, çalışma basıncı olan -670 MPa değerinden 0 MPa değerine düşmektedir. Eksenel gerilme, kalın cidarlı silindirlerde meydana gelen gerilmelerin doğası gereği, çok düşük seviyede 1 MPa'nın altında oluşmuştur. Von Mises eşdeğer gerilme değeri ise iç çapta 1350,3 MPa'dır. Namlu malzemesinin akma mukavemeti olan 1195 MPa değerinin üzerinde olan bu değer, yorulma ömrü ve çatlak başlangıcı ile birlikte kırılma olayının oluşma riskini olumsuz yönde etkileyecektir.



Şekil 11. Otofretajsız Namluda Çalışma Basıncı Altında Oluşan Gerilme Dağılımları

4.2.2. Otofretaj Esnasında ve Bitiminde Namluda Oluşan Gerilme Dağılımı

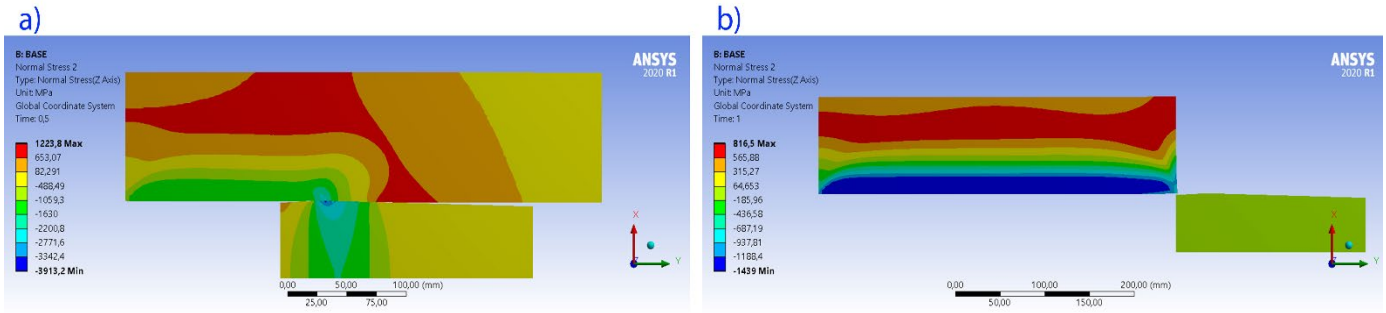
Şekil 12, 13, 14 ve 15'te mekanik otofretaj işlemi esnasında (eksenel yönde namlu orta noktası) ve bitiminde elde edilen teğetsel, radyal, eksenel ve Von Mises eşdeğer gerilmelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 16'da ise bu gerilmelerin eksenel yöndeki namlunun orta noktasından alınan radyal yöndeki dağılım grafikleri verilmiştir.

Teğetsel gerilme: Şekil 12 ve 16'da gösterilen teğetsel gerilme grafiklerinde görüldüğü gibi, mandrelin namlu iç çapı ile temas ettiği bölgede, mandrelin namlu iç çapı boyunca hareketi esnasında namlu iç çapını genişlemeye zorlayan kuvvet ile dış çapın plastik deformasyona karşı gösterdiği direncin bir araya gelmesiyle, namlu iç çapına yakın yerlerde oldukça yüksek seviyede bası (-) yönünde teğetsel gerilme oluşmaktadır. Namlu dış çapına doğru ise düşük seviyede çeki (+) yönünde teğetsel gerilme oluştuğu görülmektedir. Teğetsel gerilmenin bası (-) yönünde, namlu et kalınlığının %15'lik mesafesine denk gelecek şekilde -1429,8 MPa değerinde olduğu görülmektedir. Ayrıca teğetsel gerilme, çeki (+) yönünde namlu et kalınlığının %65'lik mesafesine karşılık gelecek şekilde 721,23 MPa değerini almaktadır.

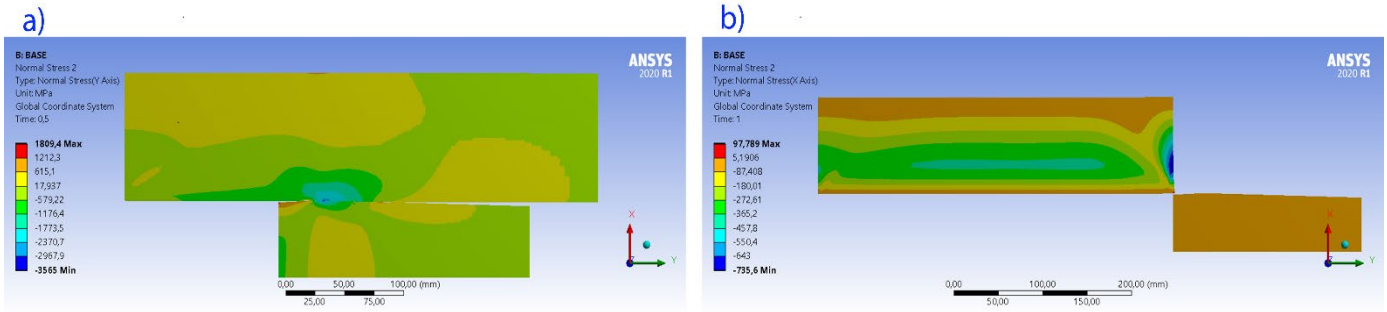
Radyal gerilme: Şekil 13 ve 16'da gösterilen radyal gerilme grafiklerinde görüldüğü gibi, temas bölgesinde mandrelin eksenel hareketinden ve iç çapta meydana gelen genişlemeden kaynaklı olarak namlu iç yüzeyinde bası (-) yönünde kalıcı radyal bir gerilme meydana gelmektedir. Namlu iç ve dış çapında radyal gerilme değeri 0 MPa iken namlu et kalınlığının % 31'lik mesafesine denk gelen konumda radyal gerilme maksimum -377,08 MPa değerini almaktadır.

Eksenel gerilme: Şekil 14 ve 16'da gösterilen eksenel gerilme grafiklerinde görüldüğü gibi, mekanik otofretaj işleminin aksisimetrik ve dinamik bir deformasyon türü olmasından dolayı, eksenel gerilmeler oldukça önem arz etmektedir. Mandrelin namlu iç çapını sıkıştırarak namlu içinde hareketi esnasında, iç çapta meydana gelen sürtünme ile iç yüzeylere yakın yerlerde ciddi miktarda bası (-), dış çapta ise çeki (+) yönünde eksenel gerilme oluşmaktadır. Namlu iç çapında bası (-) yönünde -733,36 MPa eksenel gerilme oluşmaktadır. Namlu et kalınlığının %2'ne karşılık gelen bölgede ise -889,36 MPa ile en yüksek değerini alan eksenel gerilme, namlu et kalınlığı boyunca azalmaktadır. Namlu et kalınlığının %50'lik kısmına denk gelen yerde çeki (+) olarak yönlenen eksenel gerilmenin namlu dış çapındaki değeri 205,01 MPa olmaktadır.

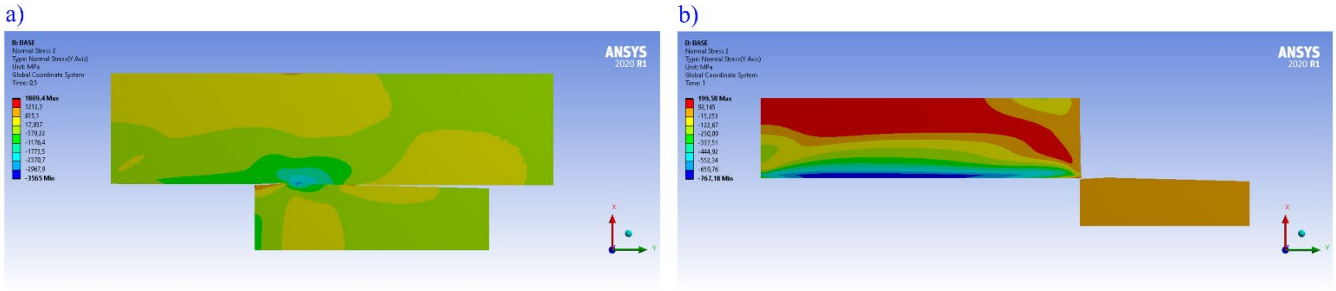
Von Mises eşdeğer gerilme: Şekil 15 ve 16'da gösterilen Von Mises eşdeğer gerilme grafiklerinde görüldüğü gibi, mekanik otofretaj işleminin sonunda, gerilme bileşenlerinin iç yüzeyden dış yüzeye doğru çeki (+) yönünden bası (-) yönüne doğru yönlenmesinden kaynaklı olarak, Von Mises eşdeğer gerilmesi değerinin namlu iç çapından et kalınlığı boyunca yönlendirildiği görülmektedir. Von Mises eşdeğer gerilme değerinin namlu iç çapından namlu et kalınlığının %15'lik kısmına kadar yaklaşık 1092 MPa değerinde sabit olarak kaldığı görülmektedir. Ardından eşdeğer gerilme namlu et kalınlığının %33'lük kısmında 192,2 MPa ile minimum değerini almaktadır. Von Mises eşdeğer gerilme değeri minimum değerini aldıktan sonra artarak namlu et kalınlığının %65'lik kısmına denk gelen konumda 793,08 MPa olmaktadır. Ardından eşdeğer gerilme tekrar düşüşe geçerek namlu dış çapında 480,65 MPa değerinde oluşmaktadır.



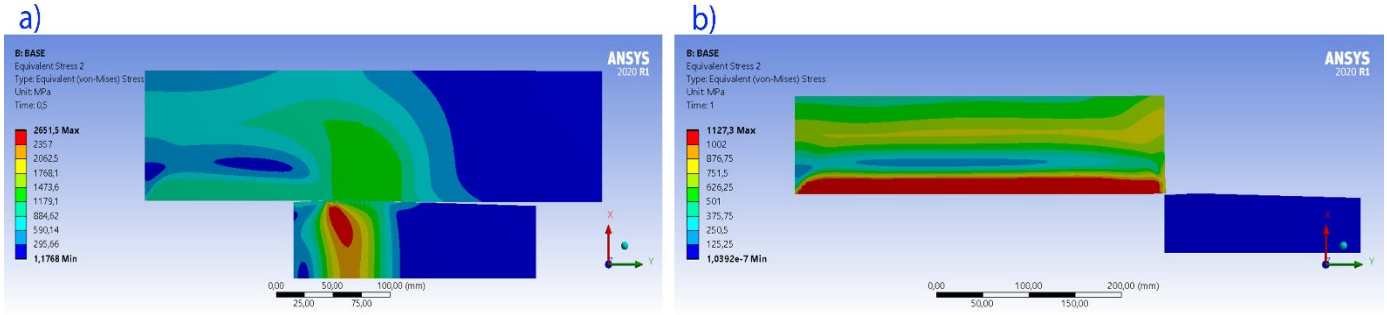
Şekil 12. Mekanik Otofretaj İşlemi Esnasında Oluşan Teğetsel Gerilme: a) Eksenel Yönde Namlu Orta Noktası, b) Bitim Noktası



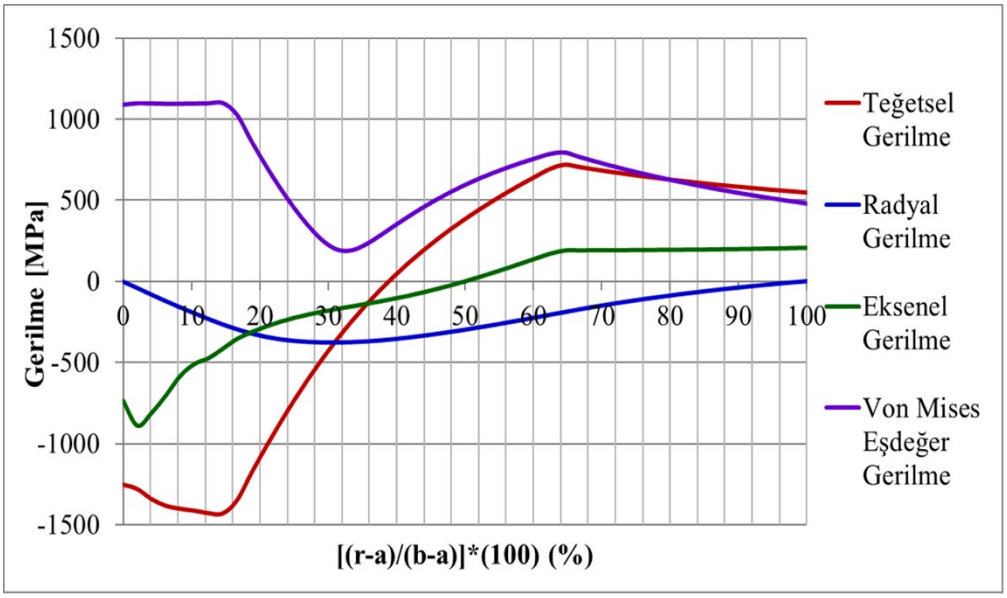
Şekil 13. Mekanik Otofretaj İşlemi Esnasında Oluşan Radyal Gerilme: a) Eksenel Yönde Namlu Orta Noktası, b) Bitim Noktası



Şekil 14. Mekanik Otofretaj İşlemi Esnasında Oluşan Eksenel Gerilme: a) Eksenel Yönde Namlu Orta Noktası, b) Bitim Noktası



Şekil 15. Mekanik Otofretaj İşlemi Esnasında Oluşan Von Mises Eşdeğer Gerilme: a) Eksenel Yönde Namlu Orta Noktası, b) Bitim Noktası



Şekil 16. Mekanik Otofretaj İşleminin Sonunda Elde Edilen Gerilme Dağılımları

4.2.3. Otofretajlı Namluda Çalışma Basıncında Oluşan Gerilme Dağılımı

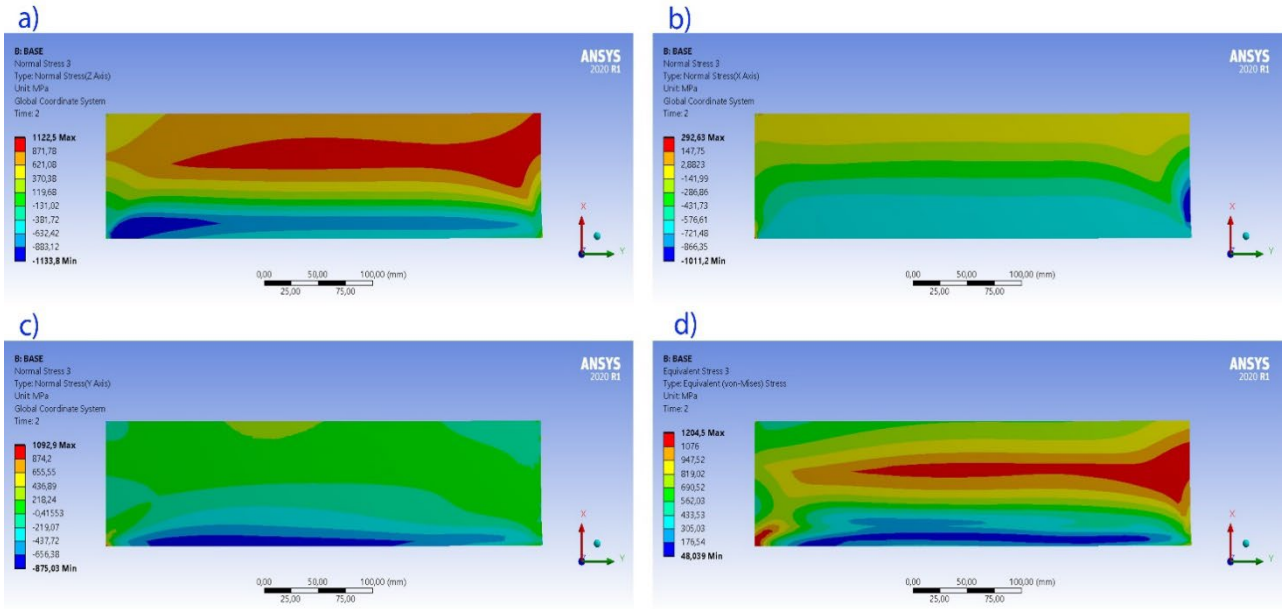
Mekanik otofretaj işlemi uygulanmış namluda, 670 MPa çalışma basıncı altında oluşan teğetsel, radyal, eksenel ve Von Mises eşdeğer gerilmelere ait SEM görüntüleri Şekil 17'de gösterilmiştir. Çalışma basıncı altında oluşan radyal doğrultudaki gerilme dağılımları ise Şekil 18'te gösterilmiştir.

Teğetsel gerilme: Namlu mekanik otofretaj işlemine tabi tutulduktan sonra, teğetsel gerilmenin iç çapta -401,42 MPa değerinde olduğu ve namlu et kalınlığının %13'lük mesafesine denk gelen konumda -757,62 MPa değerine sahip olduğu görülmektedir. Burada önem arz eden durum, teğetsel gerilmenin otofretaj uygulanmamış bir namluya nazaran iç çapa yakın bölgelerde bası (-) yönünde ve namlu et kalınlığının %65'lik mesafesine denk gelen konumda 1007,3 MPa değerinde olduğudur. Böylece teğetsel gerilme yorulma ve çatlak başlangıcı açısından kritik bölge olan iç çaptan oldukça uzak bir mesafeye yönlendirilmiştir.

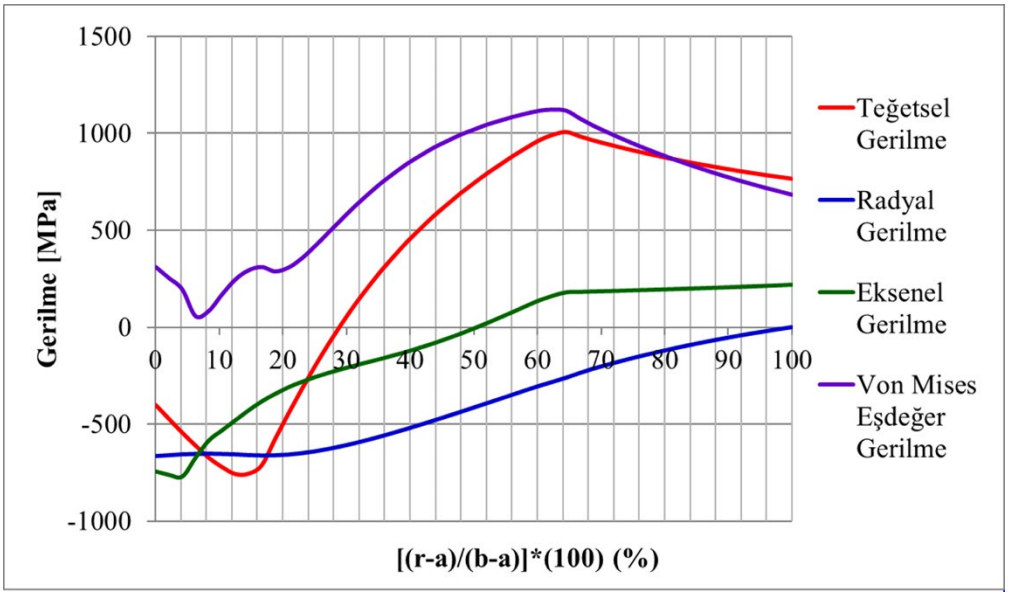
Radyal gerilme: Namlu et kalınlığı içerinde oluşturulmuş kalıcı artık gerilmenin etkisiyle, radyal gerilmenin namlu iç çapında -666,4 MPa değeri ile maksimum seviyede olduğu ve dış çapa doğru ise nihai değerinin 0 MPa olacak şekilde düştüğü görülmektedir.

Eksenel gerilme: Eksenel gerilmenin mekanik otofretaj işlemi sonunda oluşan eksenel gerilme dağılımına benzer şekilde oluştuğu görülmektedir. Namlu et kalınlığının %2'ne karşılık gelen bölgede, -760,57 MPa ile en yüksek değerini alan eksenel gerilme, namlu et kalınlığının %52'ne karşılık gelen konumda çeki (+) yönüne geçmektedir. Eksenel gerilme dış çapta nihai olarak 218,98 MPa değerini almaktadır.

Von Mises eşdeğer gerilme: Von Mises eşdeğer gerilmesinin namlu et kalınlığı boyunca yönlendirildiği ve seviyesinin otofretaj yapılmamış bir namluya göre makul seviyede azaldığı görülmektedir. Eşdeğer gerilme namlu et kalınlığının %63'ne denk gelen konumda 1122,3 MPa seviyesinde olmaktadır.



Şekil 17. Otofretajlı Namluda 670 MPa Çalışma Basıncı Altında Oluşan Gerilmelere Ait SEM Görüntüleri: a) Teğetsel b) Radyal c) Eksenel, d) Von Mises Eşdeğer Gerilme



Şekil 18. Otofretajlı Namluda 670 MPa Çalışma Basıncı Altında Oluşan Gerilme Dağılımları

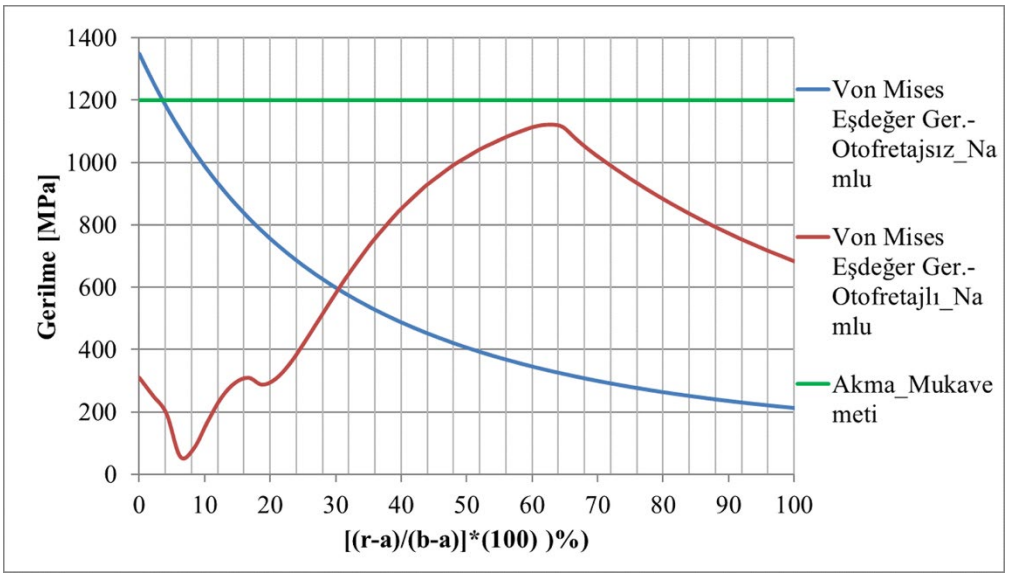
4.2.4. Otofretajsız ve Otofretajlı Namluda Çalışma Basıncında Oluşan Gerilme Dağılımlarının Karşılaştırılması

Şekil 19'da otofretajsız ve otofretaj uygulanmış namluda 670 MPa çalışma basıncı altında oluşan Von Mises eşdeğer gerilme değerleri gösterilmiştir. Otofretaj uygulanmamış namluda, çalışma basıncı altında oluşan Von Mises eşdeğer gerilme değerinin, namlu iç çapında namlu malzemesi akma mukavemeti olan 1195 MPa değerinin üstünde olacak şekilde 1350,3 MPa olduğu görülmektedir. Kırılma mekaniğinde çatlak başlangıcı ve ilerlemesi açısından kritik bölge olan iç çapta akma mukavemetinin üzerinde oluşan bu değer, namlunun yapısal bütünlüğünün korunması açısından olumsuz bir durum teşkil etmektedir.

Otofretaj işleminin ardından 670 MPa çalışma basıncı uygulandığında ise, iç çapa yakın bölgelerde Von Mises eşdeğer gerilme değerinin dalgalı bir seyir göstererek minimum değerini aldığı görülmektedir. Eşdeğer gerilme, namlu iç çapında 310,45 MPa iken namlu et kalınlığının %6'sına denk gelen kısmında minimum değerini alarak 57.15 MPa olmaktadır. Bu noktadan sonra çok küçük bir düşüşün ardından, eşdeğer gerilme namlu et kalınlığının %63'ne denk gelen konumda 1122,3 MPa olmaktadır. Bu gerilme değerinin, namlu akma mukavemeti olan 1195 MPa'ın altında olduğu görülmektedir. Eşdeğer gerilme maksimum değerini aldıktan sonra dış çapta 683,78 MPa nihai değerini almaktadır.

Otofretaj uygulanmış namluda Von Mises eşdeğer gerilme değeri, otofretaj uygulanmamış bir namluya göre iç çapa yakın bölgelerde oldukça azalırken, otofretaj uygulanmış namluda maksimum eşdeğer gerilme otofretaj uygulanmayan namluya göre %16,88 oranında azalmıştır. Benzer geometrik ölçüye sahip bir ağır silah namlusunda yapılan çalışmada (Hu vd., 2014), maksimum Von Mises eşdeğer gerilmesi %18 oranında azalmıştır. Çalışmada elde edilen sonucun, literatürde verilen değerle uyumlu olduğu görülmektedir.

Otofretaj işleminin ardından otofretajsız namluya göre daha düşük bir eşdeğer gerilme değeri elde edilmesi, otofretaj uygulanmış namluda basınç taşıma kapasitesinin artmasına olumlu yönde katkı sağlamaktadır. Basınç taşıma kapasitesinden kasıt, namlunun uygulanan herhangi bir basınç yükü esnasında plastik deformasyona maruz kalmamasıdır.



Şekil 19. Otofretajlı ve Otofretajsız Namluda Von Mises Eşdeğer Gerilme Değerlerinin Karşılaştırılması

5. Genel Değerlendirmeler

Bu çalışmada, bir ağır silah namlusu üzerinde mekanik otofretaj işlemi sonunda oluşan gerilmeler bir SEM programı yardımıyla sayısal olarak hesaplanmıştır. Oluşturulan SEM modelinin literatür tabanlı doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

1) Otofretajsız namluda 670 MPa çalışma basıncında namlu iç çapında hesaplanan Von Mises eşdeğer gerilmenin değeri 1350,3 MPa iken, otofretaj uygulanmış namluda iç çapta eşdeğer gerilmenin değeri ise 310,45 MPa olarak hesaplanmıştır.

2) Otofretaj uygulanmış namluda, Von Mises eşdeğer gerilmesinin maksimum değeri, namlunun et kalınlığının %63'ne karşılık gelen konumda 1122,3 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu gerilme değerinin, namlu akma mukavemeti olan 1195 MPa'ın altında olduğu görülmektedir.

3) Otofretaj uygulanmış namluda Von Mises eşdeğer gerilme değeri, otofretaj uygulanmamış namluya göre iç çapa yakın bölgelerde oldukça azalırken, otofretaj uygulanmış namluda maksimum Von Mises eşdeğer gerilme, otofretaj uygulanmayan namluya göre %16,88 oranında azalmıştır.

Bu sebeplerden dolayı, ağır silah namlularında otofretaj işleminin uygulanması ve oluşan gerilmelerin hesaplanması namlu ömrü ve basınç taşıma kapasitesi açısından kritik öneme sahiptir.

Referanslar

Alegre, J.M., Bravo, P., & Preciado, M. (2006). Design of an autofrettaged high-pressure vessel, considering the Bauschinger effect. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 220(1), 7-16. doi: 10.1243/095440805X73645

Ali, A.R.M, Ghosh, N.C. & Alam, T-E. (2010). Optimum design of pressure vessel subjected to autofrettage process. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering 4 (10), 1040-1045.

Alinezhad, P., & Bihamta, R. (2012). A study on the tool geometry effects in the swage autofrettage. Advanced Materials Research Vols., 433-440, 2206-221. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.433-440.2206

Bihamta, R., Movahhedy, M.R. & Mashreghi, A.R. (2007). A numerical study of swage autofrettage of thick-walled tubes. Materials and Design, 28 (3), 804-815. doi: 10.1016/j.matdes.2005.11.012

Chica, C.J, Marìn, M.M., Rubio, E.M., Teti, R., & Segreto, T. (2019). Parametric analysis of the mandrel geometrical data in a cold expansion process of small holes drilled in thick plates. Materials, 12 (24):4105.

Çandar, H., & Filiz, H., (2017). Optimum autofrettage pressure for a high pressure cylinder of a waterjet intensifier pump. Universal Journal of Engineering Science, 5(3), 44-55. doi: 10.13189/ujes.2017.050302

Davidson, T.E., Barton, C.S., Reiner, A.N., & Kendall, D.P. (1962). New approach to the autofrettage of high-strength cylinders, Experiment Mech., 2, 33–40

Gibson, M.C (2008). Determination of residual stress distributions in autofrettaged thick-walled cylinders. PhD Thesis, Department of Engineering Systems and Management, Cranfield University, Defence College of Management and Technology, Cranfield.

Gibson, M.C., Hameed, A., & Hetherington, J.G. (2012). Investigation of driving force variation during swage autofrettage, using finite element analysis. Journal of Pressure Vessel Technology, 134:051203. doi: 10.1115/1.4006922

Gibson, M.C., Hameed, A., & Hetherington, J.G. (2014). Investigation of residual stress development during swage autofrettage, using finite element analysis. Journal of Pressure Vessel Technology, 136:021206-1. doi: 10.1115/1.4025968

Hu, Z., & Penumarthy, C. (2014). Computer modeling and optimization of swage autofrettage process of a thick-walled cylinder incorporating Bauschinger effect. American Transactions on Engineering & Applied Sciences, 3(1), 31-63.

Hu, Z. (2019). Design of two-pass swage autofrettage processes of thick-walled cylinders by computer modeling Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 233(4), 1312-1333. 10.1177/0954406218770221

Hu, Z., Gibson, M.C., & Parker, A.P. (2021). Swage autofrettage FEA incorporating a user function to model actual Bauschinger effect. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 191: 104372. doi: 10.1016/j.ijpvp.2021.104372

Iremonger, M.J., & Kalsi, G.S. (2003). A numerical study of swage autofrettage. Journal of Pressure Vessel Technology, 125 (3), 347-351. doi: 10.1115/1.1593073.

Jain, A., Khanwelkar, S., Saurav, K., Landge, A., & Yadav, U. (2016). Design and performance of hydraulic autofrettage using universal testing machine. Int. J. of Research in Mechanical Eng. Tech., 6(2), 154-157.

Kamal, S.M., & Dixit, U.S. (2015). Feasibility study of thermal autofrettage of thick-walled cylinders. Journal of Pressure Vessel Technology, 137:061207. doi: 10.1115/1.4030025

Kruczynski, D.L., & Hewitt, J.R. (1991). Temperature compensation techniques and technologies-an overview, U.S. Army Laboratory Command, Ballistic Research Laboratory, Report No: BRL-TR-3283

Lawton, B. (2001). Temperature and heat transfer at the commencement of rifling a 155 mm gun. 19th International Symposium of Ballistics, Switzerland, 307-314.

Majzoobi, G.H., & Ghomi, A. (2006). Optimization of autofrettage in thick-walled cylinders. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 16(1-2) 124-131.

Majzoobi, G.H., & Ghomi, A. (2006). Optimization of compound pressure cylinders. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 15(1-2) 135-145.

Makine ve Kimya Endüstrisi A.Ş (2021). https://mke.gov.tr/tr/urunlerimiz/sayfalar/17-09-2021-urun-kataloglari, İndirilme Tarihi: 01.10.2023.

Malik, M.A, Knushnood, S., Khan, M., & Rashid, B. (2007). Analysis of autofrettaged metal tubes. 15th International Conference on Nuclear Engineering, Nagoya, Japan, 22-26 April.

O'hara, G.P. (1992). Analysis of swage the swage autofrettage process, U.S. Army Armament Research, Development and Engineering Center, Benet Laboratories, Report No: ARCCB-TR-92016

Partovi, A. (2012). Analysis of autofrettaged high pressure components. Master's Degree Thesis, Blekinge Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Sweden.

Putti, A., Chopade, M.R., & Chaudhari, H.E. (2016) A review on gun barrel erosion. International Journal of Current Engineering and Technology, 4, 231-235.

Shim, W.S., Kim, J.H., Lee, Y.S., Cha, K.U. & Hong, S.K. (2010). A study on hydraulic autofrettage of thick-walled cylinders incorporating Bauschinger effect. Experimental Mechanics, 50, 621-626. doi 10.1007/s11340-009-9255-4

Trieb, F., Schedelmaier, J., & Poelzl, M. (2015). Autofrettage-Basic information and practical application on components for waterjet cutting. WJTA American Waterjet Conference, Houston, Texas, 21-23 August.

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

UMAGD, (2023) 15(3), s209-s233.

10.29137/umagd.1362366

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:3 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue

Araştırma Makalesi / Research Article

Endüstriyel Hangar Tipi Çelik Yapıda Farklı Makas ve Çapraz Türlerinin Yapısal Sistem Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

Investigation The Effects Of Various Truss And Brace Kinds On The Structural System In Industrial Hangar Type Steel Structure

Yağmur Dikiciaşık*[1], İbrahim Tarık Sen[1], Serdar Çarbaş[1]

[1]*Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 70200, Karaman, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 18/09/2023* ***Kabul / Accepted**: 19/10/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Öz

Teknoloji geliştikçe, yapısal alandaki ihtiyaçlar bilimsel güncel yöntemlere göre değişmektedir. Alternatif yapı metotlarına kıyasla, çelik yapı sistemleri daha dayanıklıdır ve çeşitli yapısal geometrilere güvenli çözümler sunabilmektedir. Bu çalışmada, endüstriyel hangar tipi çelik bir yapının, örgü düzeni ve stabilite durumları değiştirilerek yapısal analizler gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Sabit lokasyonda, aynı boyutlarda toplam 24 farklı endüstriyel hangar tipi çelik yapının, farklı 3 makas ve 6 çapraz konfigürasyonu için sabit ve hareketli yükler altında yapısal analizleri gerçekleştirilerek sınır değerler uygulama şartnamelerine göre incelenmiştir. Analizler ve yükleme durumları için TS EN 1991-1-4, TS EN 1991-1-3, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar yönetmelikleri baz alınmıştır. Yapılara, sismik yükler zaman-tanım alanında mod birleştirme yöntemi ile etkitilmiş ve 1992 yılında meydana gelen 6,8 M_s büyüklüğündeki Erzincan depreminden elde edilen sismik ivme kayıtları kullanılarak dinamik analizler yapılmıştır. Çelik elemanların tasarımında Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım hesap yöntemi kullanılmıştır. Yapılarda sadece kapasite tasarımı sınırlandırılarak her tip yapı elemanından en az birinin minimum %80 kapasitede çalışması sağlanıp diğer yapısal tepkiler elde edilmiştir. Yapısal analiz programından elde edilen taban kesme kuvveti, yapı ağırlığı, kolon üst nokta ötelenmesi, tepe noktası ötelenmesi ve maksimum deplasman sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, dışmerkez çaprazlı yapıların yapı ağırlığı açısından, merkezi çaprazlı yapıların ise öteleme açısından daha avantajlı yapısal tepkiler verdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

"Endüstriyel hangar tipi çelik yapı, Merkezi ve dışmerkez çapraz, Kafes yapı sistemi"

Abstract

As technology develops, needs in the structural field evolve in parallel with current scientific methods. Compared to alternative construction methods, steel construction systems are more robust and can provide safe structural solutions to various constructional geometries. In this study, structural analyses of an industrial hangar-type steel structure are carried out by changing the truss arrangement and stability conditions to evaluate comparatively. Structural analyses of a total of 24 different industrial hangar type steel structure having same dimensions on a fixed location are performed for 3 truss and 6 bracing configurations subjected to fixed and live loads to attain limit values according to practice code of structural specifications. Analysis and loading conditions are based on TS EN 1991-1-4, TS EN 1991-1-3, Turkey Building Earthquake Code, Regulation on Design, Calculation and Construction Principles of Steel Structures. Seismic loads are applied to the structures within the time-history mode superposition method and dynamic analyses are performed using seismic acceleration records of the 6.8 Ms Erzincan earthquake occurred in 1992. In the design of the steel elements, the Load and Resistance Factor Design method are considered. By restricting only the capacity design in the structures, at least one of each type of structural element is ensured to operate at a minimum capacity of 80% and other structural responses are obtained. The base shear force, structural weight, column top drift, apex drift and maximum displacement results obtained from the structural analysis program are comparatively evaluated. As a result, it is observed that eccentrically braced structures provide more advantageous structural responses in terms of structural weight, while concentrically braced structures provide more advantageous structural responses in terms of drift and displacement.

Key Words

"Industrial hangar type steel structure, Concentrically and eccentrically brace, Truss structure system"

***Sorumlu Yazar:** dyagmur@kmu.edu.tr*

1. Giriş

Gelişen teknoloji ve değişen dünya koşullarına bağlı olarak farklı yapı inşa yöntemleri ve birçok yapı türü ortaya çıkmıştır. Özellikle ulaşım ağlarının genişlemesi hammadde elde edilmesini kolaylaştırmış, hammadde veya ana ürünlerin konumu ne olursa olsun çeşitli bölgelerde endüstriyel faaliyetlerin gerçekleştirilmesine olanak sağlamıştır. Bu bağlamda, endüstriyel yapılarda yaygın olarak betonarme prefabrik veya çelik konstrüksiyon sistemler tercih edilmektedir. Prefabrik sistemler, aşırı yükseklik veya geniş açıklık gerektirmeyen standart tasarımlarıyla maliyet ve işçilik avantajı sunmakta, basit ve hızlı çözüm sağlayabilmektedir. Ancak üretim ve imalat süreçlerinde hava şartları gibi dış etkenlerden etkilenmesi, uzun açıklıklı, çok katmanlı ve düzensiz şekilli yapıların ihtiyacını karşılayamaması bu yapısal sistemler için büyük bir dezavantajdır. Çelik yapı sistemleri ise bünyelerinde çok sayıda destek elemanı (kiriş, kolon vb.) ve ikincil destek elemanlarını (levhalar, cıvatalar, gergiler vb.) barındıran ve hassas bir projeye göre özenle üretilip monte edilen yapısal sistemler olduğundan ilk yapım maliyeti açısından dezavantajlı yönleri olmasına rağmen, endüstriyel alanlara yönelik gelişmiş yapı taleplerine karşı nitelikli ve daha avantajlı konstrüktif çözümler sunabilmektedirler.

Bu çalışmada günümüz yapı sektöründe önemli bir yere sahip endüstriyel hangar tipi çelik bir yapının değişik tasarım parametrelerine göre yapısal analizleri icra edilerek elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Sabit bir lokasyon üzerinde aynı boyutlara sahip toplam 24 farklı endüstriyel hangar tipi çelik yapının, farklı 3 makas ve 6 çapraz sistemi için sabit ve hareketli yükler altında yapısal analizleri gerçekleştirilmiş, elde edilen sınır değerler incelenmiştir. Bunlara ek olarak çaprazsız ve deprem kirişsiz çerçeve sistem ve deprem kirişi ilaveli çerçeve sistem ile yapısal analizler icra edilerek toplamda 8 çerçeve tipi üzerinden elde edilen sonuçlar üzerinde de karşılaştırmalar yapılmıştır.

Bu çalışmanın literatüre yaptığı katkıyı göstermek amacıyla çalışma konusu ile ilgili olarak literatürde var olan mevcut çalışmalar şu şekilde özetlenmiştir; Özcihan (2001) araştırmasında, merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik yapısal sistemlerin doğrusal olmayan davranışını araştırmıştır. Yapının düşey yükler etkisinde doğrusal elastik davranışta bulunduğu, yatay işletme yüklerinin etkisinde ise plastik davranışta bulunduğunu gözlemlemiştir. Bunun yanı sıra TS 4561-Çelik Yapıların Plastik Teoriye Göre Hesaplanmasına İlişkin Kurallar standartlarının güvenlik açısından tutarlı olduğu sonucunu elde etmiştir. Çelik (2003) yaptığı çalışmada, döneminde yürürlükte bulunan Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkındaki Yönetmeliğin (ABYYHY`98) ve Amerikan Çelik Yapı Yönetmeliği'nin 8. Bölümünde yer alan çelik yapılar için sismik tasarım kurallarına yer vermiştir. Çelik yapılara ilişkin daha kapsamlı uluslararası düzenlemeleri (AISC-American Institute of Steel Construction) inceleyerek, bu yönde ülkemiz mevzuatlarının eksik ve yetersiz alanlarını incelemiştir. Ayrıca merkezi ve dışmerkez çaprazlı bir çelik yapı modelleyerek merkezi kirişin eksenel kuvvet değerinin dışmerkez çapraz yapı elemanlarından daha büyük olduğu sonucuna varmıştır. Kocabaş (2005) çalışmasında, TDY 98, TS 498 ve TS 648 yönetmelikleri çerçevesinde üç farklı çelik yapının analiz ve tasarım sürecini tamamlamış ve çapraz uygulamalarının yapının ağırlığını azalttığını ve yer değiştirme değerlerini önemli ölçüde sınırladığını tespit etmiştir. Eşsiz (2005) çalışmasında, sismik kuvvetlerin çoğunluğunun yapılara yatay kuvvetler olarak etki ederek özellikle yüksek binalarda ciddi hasarlara neden olduğunu belirtmiştir. Çelik çaprazların yatay sismik kuvvetleri önemli ölçüde sönümleyebildiğini, büyük ölçekli yıkımları ve olumsuz sonuçları önleyebildiğini tespit etmiştir. Korkmaz (2007) çalışmasında, çok katlı betonarme bir yapıya çeşitli şekillerde çelik çaprazlar ekleyerek yapısal analizler yapmıştır. Bu çalışmada, V çapraz model tercih ederek yapısal analizlerini aynı doğrultuda, düşey doğrultuda ve farklı doğrultularda olmak üzere üç farklı şekilde gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak, düzgün olmayan çaprazlı dağılımla modellenen yapıların yer değiştirme açısından daha olumlu sonuçlar verebileceğini belirtmiştir. Çileli (2008), Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY2007) kapsamında farklı tip ve çapraz düzenlemelerine sahip 20 katlı bir çelik yapı tasarlamış ve yapısal analizlerini gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak, merkezi çapraz sisteminin yapıda yatay yer değiştirmeleri engelleyebilmek için kesitlere yüksek yükler bindirdiğini ve yapının ağırlığını önemli derecede arttırdığı tespit etmiştir. Ayrıca dışmerkez çaprazlardan özellikle ters V çaprazlı yapı modellerinin küçük kesitli elemanlar için daha fazla ötelenme değerlerine karşı koyabildiğini ve dışmerkez çapraz elemanların genele bakıldığında daha avantajlı kısımda kaldığı bulgusuna varmıştır. Can (2008) çalışmasında, sünekliği yüksek merkezi çaprazlı çelik çerçeveye sahip 6 katlı bir yapısal sistem tasarlamıştır. Çalışmanın yapıldığı dönemde Türkiye'de yapı yürürlükte bulunan TDY 2007 ve TS 648 standartlarının yük kombinasyonları ve çapraz türleri açısından yetersiz olduğu sonucuna varmıştır. Standart yapısal limit değerlerin belirlenmesinde ABD yapı mevzuatlarından biri olan Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7) ve American Institute of Steel Construction (AISC 360-05) yönetmeliklerini kullanmıştır. Aynı zamanda X çaprazlı olarak modellediği yapı ile yapısal bir analiz yapmış ve mevzuattaki yetersizliği eleştirmiştir. Mungan (2009), çelik konstrüksiyon sistemli sanayi yapılarında makas modellerinin önemini belirlemek amacıyla TDY 2007 ve TS 648 standartlarını temel alan yapısal analiz programı kullanarak üç farklı makas tipini irdelemiştir. Bu makas modellerinin yapay enkesitli profil makaslar, prefabrik profillerden üretilmiş makaslar ve kafes sistem yapısına sahip olan makaslar olduğunu belirtmiştir. İlaveten, yüksekliği az ve açıklıkları geniş olan yapılar için kafes sistem makas modelinin sehim değerleri ve yapısal ağırlık açısından daha avantajlı olabileceği sonucuna ulaşmıştır. Civelek (2010) araştırmasında, 1959 senesinde ABD'nin New York eyaletinde mevcut bulunan çok katlı bir çelik yapının günümüz koşullarına ve teknolojisine göre İstanbul-Maslak konumunda yeniden inşasını ele almıştır. Yapısal analizlerde söz konusu binanın inşa edildiği sırada kullanılmayan dışmerkez çapraz modelini kullanmış ve dışmerkez çapraz kullanılan bir bina tasarımının daha avantajlı olabileceği sonucuna varmıştır. Alıcıoğlu (2011), farklı kesitlere sahip merkezi çaprazlı bir çelik yapının analizini yapmış ve elde edilen sonuçları değerlendirmiştir. Daire kesit, kare kesit, I-kesit, dikdörtgen kesit ve T-kesit gibi beş farklı geometrik modeli eşit kesit alanı ve uzunluklarla irdelemiştir. Sonuçlar değişik tipte kesitlerin kullanılmasının farklı çapraz tiplerinde optimum değerler verdiğini göstermiştir. Kural ve Zeybek (2011) çok katlı çelik yapılarda moment aktarabilen çerçeve yapılar ile merkezi çelik çapraz modele sahip yapıları ikinci dereceden etkiler açısından karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak çapraz içeren yapısal sistemin ikincil etkiler açısından faydalı sonuçlar verebileceğini belirtmişlerdir. Türk (2016), merkezi çelik çaprazlı yüksek

katlı bir çelik yapı tasarlayarak döneminde taslak halinde bulunan Türküye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2016) ve yürürlükte olan Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları (ÇYTHYE 2016) yönetmelikleri kapsamında gerçek sismik veriler ile yapısal analizler icra etmiştir. Yapısal analiz sonuçlarına göre göçme sırasında çapraz perde elemanların önemli rol oynadığını ve amaçlandığı gibi plastikleşmenin ilk olarak çaprazlarda başladığını tespit etmiştir. Lekesiz (2016), merkezi çaprazlı perdelerin dört farklı tipini araştırmıştır. Diyagonal tip, ters V tip, X tip ve iki katta bir X tip olarak tasarlanan bu çaprazlı perde modelleri arasından sismik performans açısından ters V tip çaprazlı modelin en olumsuz değerlere sahip olduğu sonucuna varmıştır. Akgönen (2017), dört farklı çerçeve sistemine sahip yüksek katlı çelik yapılar tasarlamış ve bunları yatay kuvvetler altında test etmiştir. Bunlar diyagonal çaprazlar, X çaprazlar, V çaprazlar ve çaprazsız yüksek sünekliğe sahip çerçeve sistemler olup yapısal analiz sonucunda X çapraz modelin enerji emilimi ve rijitlik açısından yatay kuvvetlere karşı üstün performans sergileyebileceği sonucuna varmıştır. Nayak vd., (2018) moment aktarabilen çelik çerçeve sistemine ve merkezi çelik çapraz tasarımına sahip üç katlı bir çelik yapıyı çeşitli çapraz düzenler deneyerek analiz etmiştir. Örgü düzeni olarak her katı X tipi, iki katı X tipi ve üç katı X tipi olacak şekilde yapısal analizler yapmıştır. Sonuçlar, çaprazlı yapısal sistemin çaprazsız çerçeveli sisteme göre optimum sonuçlar verdiğini, örgüsel çaprazlı modellerden her katı X tipi olan modelin en avantajlı olduğunu göstermiştir. Bayram vd., (2019) moment aktarabilen çelik çerçeve sistemi ve dışmerkez çelik çapraz modeli olan aynı boyutlardaki 5 katlı iki çelik binayı Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar (ÇYTHYDE 2018) yönetmeliğince analiz etmişlerdir. Elde ettikleri değerler dışmerkez çapraza sahip yapı sisteminin yatay deplasman ve yapısal ağırlık açısından daha avantajlı olduğu sonucunu ortaya koymuştur. Arıbaş vd., (2019) araştırmalarında inceledikleri 5 katlı çelik bir bina için çaprazsız çerçeve sistemini ve dışmerkez V çapraza sahip çerçeve sistemini ayrı ayrı kullanarak yapısal analizler gerçekleştirmiş ve dışmerkez çapraz sistemlerle modellenen yapıların diğer çerçeve yapılarına göre çok daha optimum değerlerle modellenebileceğini belirtmişlerdir. Sancıoğlu vd., (2019) 5 kata sahip bir çelik binanın yapısal analizini çaprazsız çerçeve sistem ve dışmerkez çaprazlı çerçeve sistem tasarımıyla inceleyerek çaprazlı tasarımların kesit alanını azaltıp yapının ağırlığını önemli ölçüde düşürdüğünü ve dolayısı ile sismik kuvvetleri de azalttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, az katlı çelik yapılarda çaprazların davranışı incelendiğinde geçerli bir sonuç elde edilebilmesi için uzun açıklıklı ve yüksek katlı binalara öncelik verilmesi gerektiğini önermişlerdir. Putra ve Tarigan (2019), moment aktarabilen çerçeve sistemi ve merkezi X çaprazlı çerçeve sisteme sahip 6 katlı bir çelik yapıyı analiz etmişlerdir. Ayrıca yapıya itme analizi uygulamışlardır. Sonuçlar, çaprazsız çerçeve sisteminin yapısal ağırlığının fazla olduğunu ve itme analizi ile çerçeve sisteminin performans sonuçlarının LS (Can Güvenliği) düzeyinde, çaprazlı çerçeve sistemin ise IO (Hemen Kullanım) düzeyinde olduğunu göstermektedir. Verileri değerlendirdikten sonra çaprazlı sistemin daha güvenli ve ekonomik bir çözüm sağlayabileceği kanaatine varmışlardır. Yanık (2019), DBYBHY 2007 çerçevesinde aynı kat planına sahip 4 katlı, 8 katlı ve 12 katlı üç farklı moment aktarabilen çelik binanın yapısal analizlerini gerçekleştirmiştir. Merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik bina modelleri üzerinden yapısal analizler yaparak elde edilen bulguları karşılaştırmıştır. 4 katlı bir bina için analitik değerlerde önemli bir farklılık olmamasına rağmen, 8 katlı ve 12 katlı binalarda dışmerkez çapraz kullanımının güvenlik ve ekonomi açısından olumlu sonuçlar verebileceğini belirtmiştir. Kumar vd., (2020) dört farklı tasarım kullanarak 15 katlı bir çelik yapının yapısal analizini gerçekleştirmiştir. Moment aktarabilen çelik çerçeve sistem, diyagonal çapraz sistem, X tipi çapraz sistem ve V tipi çapraz sistem olarak tasarlanan bu modellerin analizi sonucunda X tipi çapraz sistemin taban kesme kuvveti ve yer değiştirme açısından daha avantajlı bir tasarım olduğu sonucuna varmışlardır. Altan (2020) 5 katlı, 10 katlı ve 15 katlı moment aktarabilen çelik çerçeve sistemlerin analizini SAP2000 analiz programını kullanarak gerçekleştirmiştir. TBDY 2018 şartnamesi kapsamında yapıya merkezi ve dışmerkez çaprazlar ekleyerek çeşitli karşılaştırmalar gerçekleştirerek çaprazlı çerçeve sistemlerin çaprazsız çerçeve sistemlere göre daha stabil sonuçlar verdiğini tespit etmiştir. Yıldızhan Sağer (2021) Elazığ'da yapılması düşünülen 5 ve 10 katlı moment aktarabilen çelik yapıların yapısal analizlerini TBDY 2018 ve ÇYTHYDE 2018 kapsamında gerçekleştirmiştir. Yapılarda, merkezi ters V çapraz model ve V çapraz modellerini birleştirerek iki katta bir X çapraz tasarımı oluşturmuştur. Moment aktaran çerçeveler ile çaprazlı modelleri karşılaştırdığında çaprazlı modellerde daha ideal veriler elde ettiğini belirtmiştir. Şeker (2021), 3 katlı ve 5 katlı çelik yapıları dışmerkez çelik çapraz sistemlerle çözerek bir karşılaştırma yapmıştır. Verileri değerlendirdiğinde beklendiği gibi dışmerkez çapraz sistemin moment aktaran çerçeve sistemine göre daha verimli yapısal performans gösterdiği sonucuna varmıştır. Ayrıca dışmerkez diyagonal, ters V ve V çapraz modeller arasından ters V çapraz modelinin yapılar için daha verimli sonuçlara ulaştırdığını tespit etmiştir. Sancıoğlu ve Çarbaş (2021), merkezi çelik çapraz sisteme sahip beş katlı bir çelik yapı üzerinde çalışmışlardır. Merkezi çapraz sisteminin, göreli kat ötelemeleri ve x- ve y-yönlerindeki yer değiştirme açısından moment aktaran çerçeve sistemine göre avantajları olduğunu elde etmişlerdir. Ayrıca, merkezi çapraz sistemleriyle analiz edilen yapıların daha düşük doğal hakim titreşim periyoduna sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Karataş (2022), beş farklı tasarıma sahip bir çelik yapısal sistemi (çaprazsız çerçeve, diyagonal çapraz, ters V çapraz, V çapraz ve X çapraz) 20 katlı olarak çalışmıştır. Yapılar çeşitli deprem analiz yöntemleri kullanılarak analiz edilmiş ve tasarlanmıştır. Ortaya çıkan verilere göre ideal yapısal tasarımın güvenlik, ekonomi, yapısal ağırlık ve taban kesme açısından X çapraz model, yer değiştirme açısından ise ters V çapraz model olduğunu elde etmiştir. Öneri olarak yüksek katlı çelik yapının mutlaka çapraz sistemle çözülmesi gerektiğini de belirtmiştir.

Araştırma kapsamında yapısal tasarımlar için TS EN 1991-1-4, TS EN 1991-1-3, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018) ve Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapımına Dair Esaslar (ÇYTHYDE 2018) yönetmeliği mevzuatları esas alınmıştır. Zaman-tanım alanında mod birleştirme yöntemi kapsamında 1992 Erzincan depreminin 6,8 M_s büyüklüğündeki deprem kayıtları kullanılarak gerçek sismik ivmelerle dinamik analizler yapılmıştır. Çelik elemanların tasarım ve hesabında ÇYTHYDE 2018 kapsamındaki Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım yöntemi kullanılmıştır. SAP2000 yapısal analiz programında modellemeleri yapılan yapılara kar yükleri, rüzgar yükleri, deprem yükleri gibi ortak yükler şartnameler uyarınca uygulanmış, TBDY 2018 ve ÇYTHYDE 2018'de bulunan standart analiz parametreleri tanımlanmıştır. Daha sonra bu ortak parametreler kullanılarak 3 farklı makas ve 6 farklı çapraz türü ile tasarlanan 8 farklı çerçeve tipi modellenmiş ve yapısal analiz uygulanmıştır. Elde edilen yapısal bulgularda daha gerçekçi irdelemeler yapılabilmesi için sadece kapasite tasarımı sınırlı tutularak her tip yapı elemanından en az birinin %80 kapasite oranında çalışması

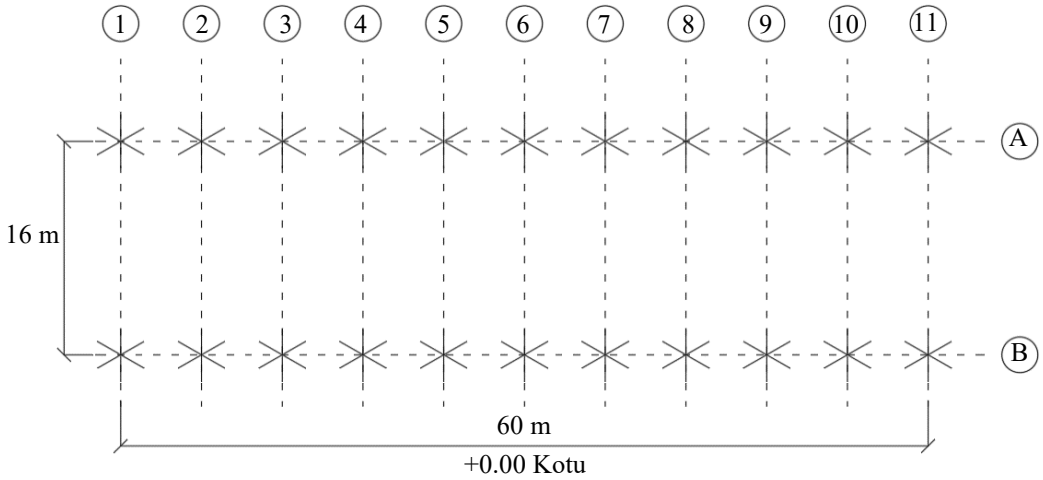
sağlanmıştır. SAP2000 yapısal analiz programından elde edilen verilerden taban kesme kuvvetleri, yapı ağırlıkları, kolon üst nokta ötelenmeleri, tepe noktası ötelenmeleri ve maksimum ötelenme değerleri karşılaştırmalı olarak ele alınmış ve detaylı bir şekilde irdelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışma kapsamında endüstriyel hangar tipi çelik bir yapı tasarlanmış ve yapısal analizler icra edilmiştir. İlgili yapı için konum olarak Konya sanayi bölgesi 37.92517° enlem ve 32.56292° boylam, zemin sınıfı olarak da ZD Zemin Grubu (orta sıkı kum, çakıl ya da çok katı killer) varsayılarak Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'ndan gerekli veriler temin edilmiştir.

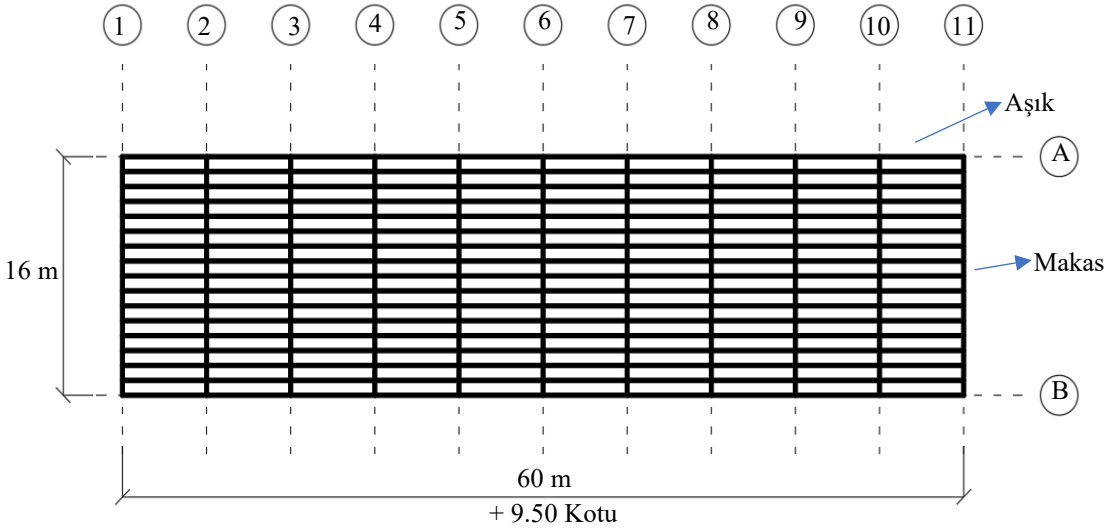
Yapıya etkiyen rüzgar yükleri TS EN 1991-1-4'e göre, kar yükleri ise TS EN 1991-1-3'e göre hesaplanmıştır. Deprem hesap yöntemi olarak TBDY 2018 içerisinde bulunan zaman-tanım alanında mod birleştirme yöntemi (time-history analysis) kullanılmış ve 1992 yılında meydana gelen 6,8 büyüklüğündeki Erzincan depremine ait deprem kaydı dikkate alınarak gerçek deprem ivmeleri ile yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. ÇYTHYDE 2018 kapsamında çelik elemanların tamamı için S235 kalitesinde çelik malzeme dikkate alınmıştır.

Şekil 1'de görüldüğü gibi endüstriyel hangar tipi çelik yapının oturma alanı 60m×16m olacak şekilde tasarlanmış olup, toplam 11 çerçeveden oluşan tek açıklıkta çift kolon-makas yapısal sistemiyle modellenmiştir.



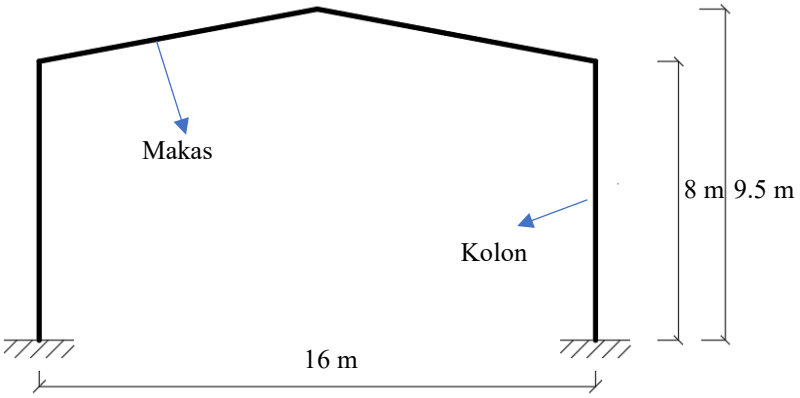
Şekil 1. Endüstriyel hangar tipi çelik yapının kat planı ve ölçüleri.

Tasarlanan endüstriyel hangar tipi çelik yapı taşıyıcı örgü kolonlar, ana kirişler (makaslar), aşıklar, deprem kirişleri ve çaprazlardan oluşmaktadır. Ortak elemanlar olan kolonlar, ana kirişler ve aşık elemanlardan oluşan çerçeve sistem Şekil 2'de gösterilmiştir.

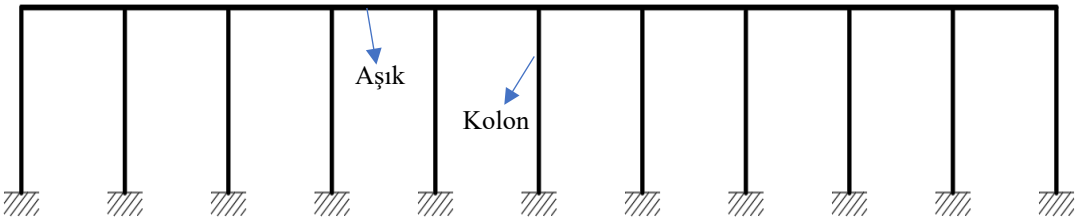


Şekil 2. Endüstriyel hangar tipi çelik yapının kat planı ve taşıyıcı elemanları.

Yapısal modelde çerçeve sistemi oluşturan kolonlar, aşıklar ve makaslardan; kolonların kesitleri HEA profillerden, aşıkların kesitleri IPE profillerden, makasların kesitleri ise tasarıma göre farklılıklar göstermekte olup ince cidarlı dikdörtgen kutu profilden ve IPE profillerden meydana gelmektedir. Yapısal sistem içerisindeki kolonların yüksekliği 8 m, açıklıkları 16 m olarak dikkate alınırken tepe noktası olarak belirlenen mahya yüksekliği 9,5 m olacak şekilde dizayn edilmiştir (Şekil 3). 11 adet çerçeve sistemin bir araya getirilmesiyle oluşturulan endüstriyel çelik hangar yapısında iki çerçeve sistemin aralığı 6m olarak belirlenirken yapının toplam uzunluğu 60 m olarak belirlenmiştir (Şekil 4).

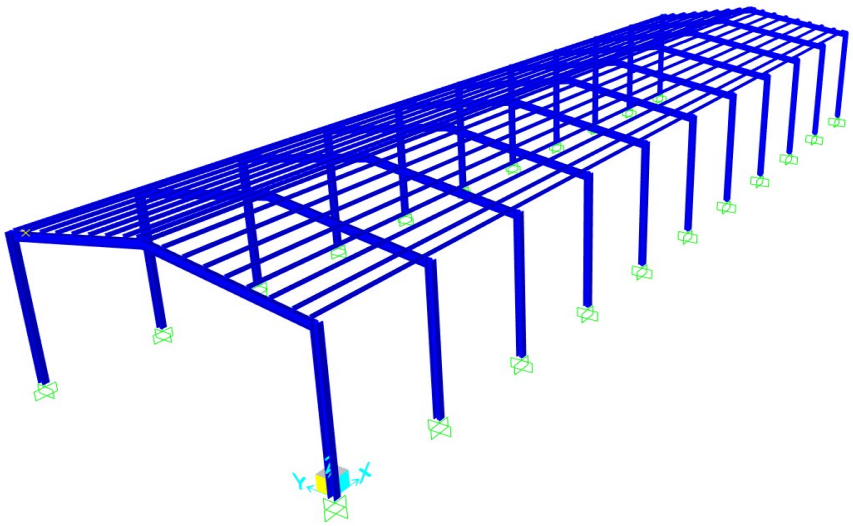


Şekil 3. Yapının 1-1 aksı detayları.



Şekil 4. Yapının A-A aksı detayları.

Aşık elemanlar, çerçevelerin aralığında ve makas üzerinde eşit mesafelerle toplam 18 adet olacak şekilde konumlandırılmış olup yapının üç boyutlu modeli Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Endüstriyel hangar tipi çelik yapının üç boyutlu (3D) görünümü.

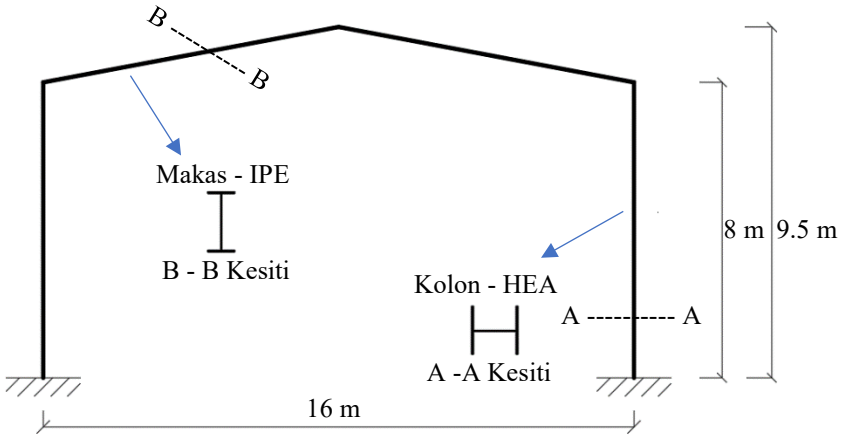
2.1. Makas ve Çapraz Özellikleri

Bu çalışmada ele alınan çelik yapı sistemleri ile analiz edilen farklı örgü düzenindeki endüstriyel hangar tipi çelik yapılar, 6 farklı çapraz tipi ve 3 farklı makas türü olmak üzere toplamda 24 adet olarak ele alınmıştır. Bunlar "*Dolu Gövdeli Makas (DGM)*", "*Simetrik Kafes Sistem Makas (SKSM)", "Örgü Kafes Sistem Makas (ÖKSM)"* olmak üzere 3 farklı makas türü olarak; "*Diyagonal Merkezi Çapraz", "Ters V Merkezi Çapraz", "V Merkezi Çapraz", "Diyagonal Dışmerkez Çapraz", "Ters V Dışmerkez Çapraz", "V Dışmerkez Çapraz"* olacak şekilde merkezi ve dışmerkez olmak üzere toplam 6 farklı çapraz sistemi olarak isimlendirilmişlerdir.

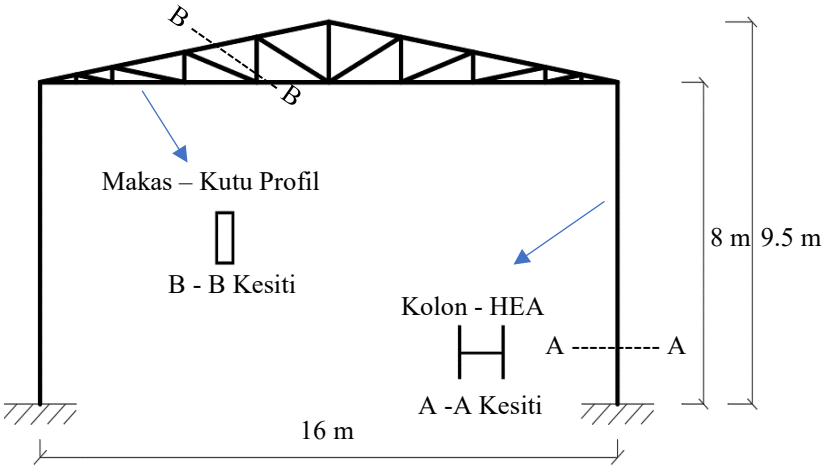
Bunlara ek olarak çaprazsız ve deprem kirişsiz çerçeve sistem ve deprem kirişi ilaveli çerçeve sistem ile yapısal analizler icra edilerek elde edilen sonuçlar üzerinde karşılaştırmalar yapılmıştır.

8 farklı çerçeve sistem düzeni ve 3 farklı makas yapısı üzerinden değerlendirilen modellerin çerçeve tipleri; *"Çaprazsız Çerçeve (Moment Aktaran)", "Çaprazsız Deprem Kirişli Çerçeve", "Diyagonal Merkezi Çaprazlı", "Ters V Merkezi Çaprazlı", "V Merkezi Çaprazlı", "Diyagonal Dışmerkez Çaprazlı", "Ters V Dışmerkez Çaprazlı", "V Dışmerkez Çaprazlı"* şeklinde belirlenmiştir.

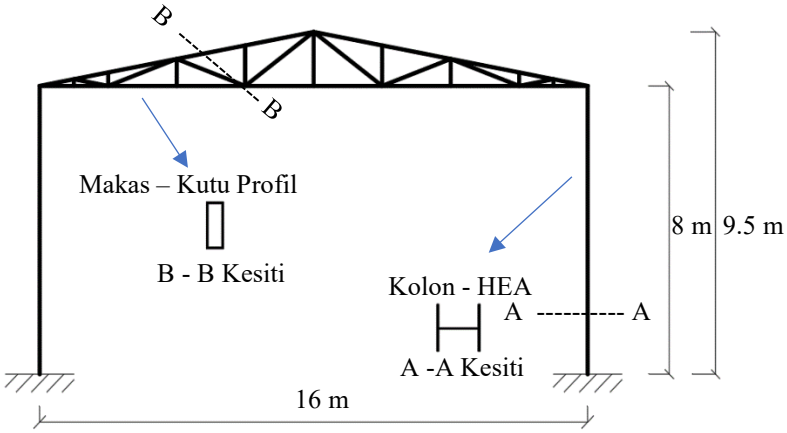
Makas örgü düzeninde incelenen üç ayrı yapısal sistemden ilki dolu gövdeli makas sistem yekpare tek profilden oluşmakta, diğer yapısal sistemler ise kafes sistem mantığında örgü düzeni içinde makas görevi görmektedir. Makas tipleri sırasıyla Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 6. Dolu gövdeli makas türü.

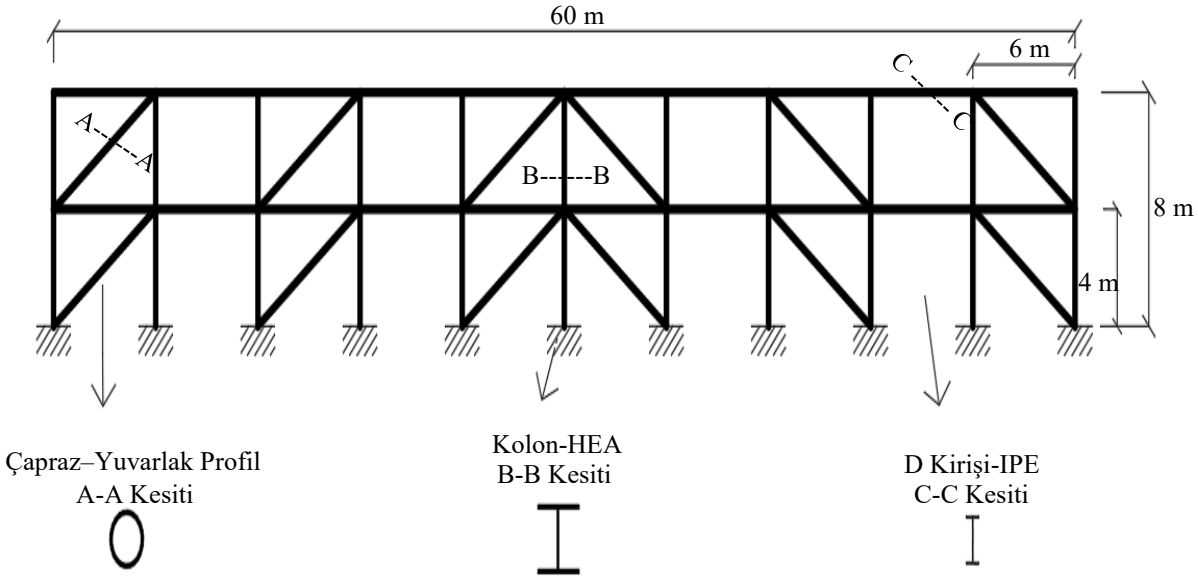


Şekil 7. Simetrik kafes sistem makas türü.

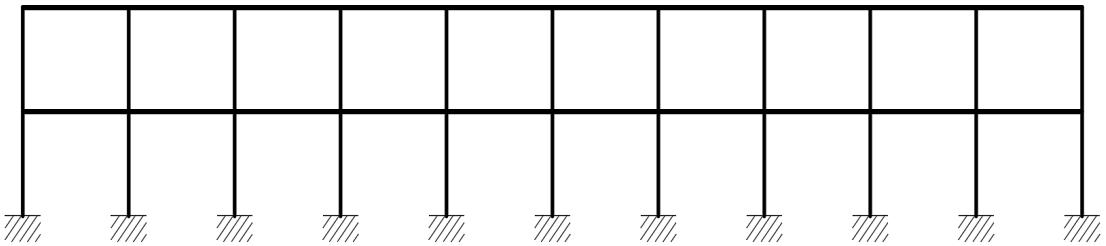


Şekil 8. Örgü kafes sistem makas türü.

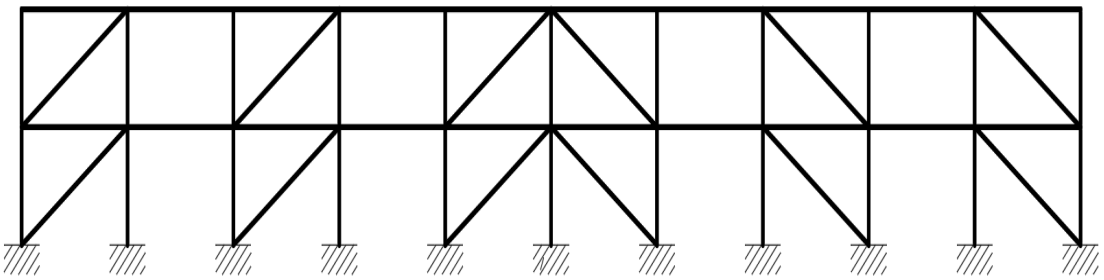
Çapraz elemanların tayininde TBDY 2018'de bulunan merkezi çelik çapraz ve dışmerkez çelik çapraz türleri esas alınmıştır. TBDY 2018'de belirtilen merkezi ve dışmerkez çaprazlardan aynı geometride olan türler seçilmiş, bu sayede aynı geometride merkezi ve dışmerkez çaprazların davranışları karşılaştırıldığında daha net verilerin ortaya çıkabilmesi amaçlanmıştır. Çapraz sisteminin, kolonların ve deprem kirişinin kesit tayini Şekil 9'da, sadece deprem kirişli (çaprazsız) olan çerçeve sistem ise Şekil 10'da belirtilmiştir. Bu doğrultuda kullanılan çerçeve türlerinden diyagonal merkezi çapraz Şekil 11'de, ters V merkezi çapraz Şekil 12'de, V merkezi çapraz Şekil 13'te, diyagonal dışmerkez çapraz Şekil 14'te, ters V dışmerkez çapraz Şekil 15'te, V dışmerkez çapraz Şekil 16'da belirtilmiştir.



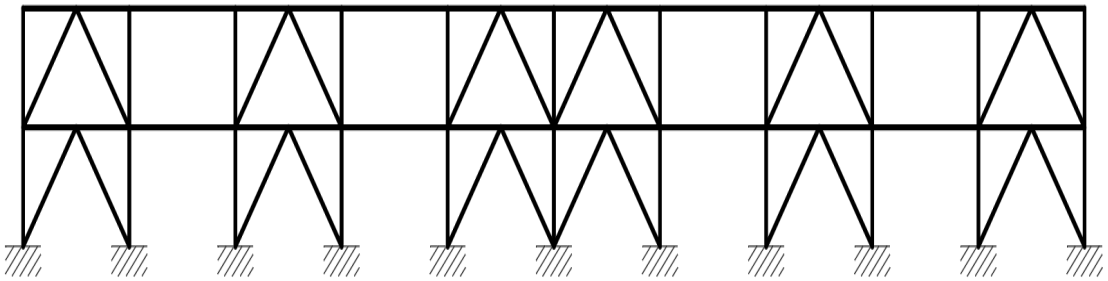
Şekil 9. Çapraz, kolon ve deprem kirişleri detayı.



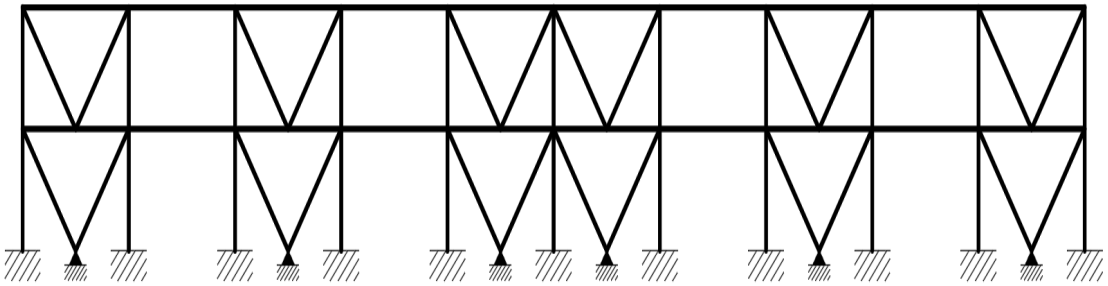
Şekil 10. Çaprazsız deprem kirişli sistem.



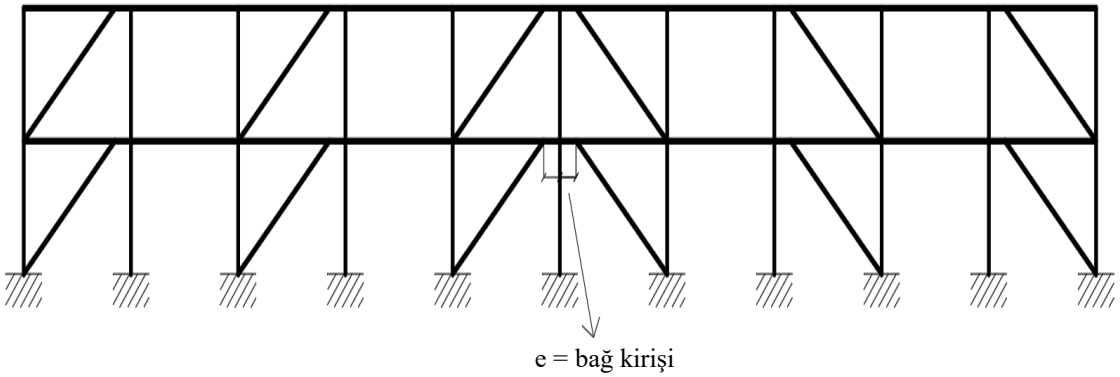
Şekil 11. Diyagonal merkezi çapraz sistem.



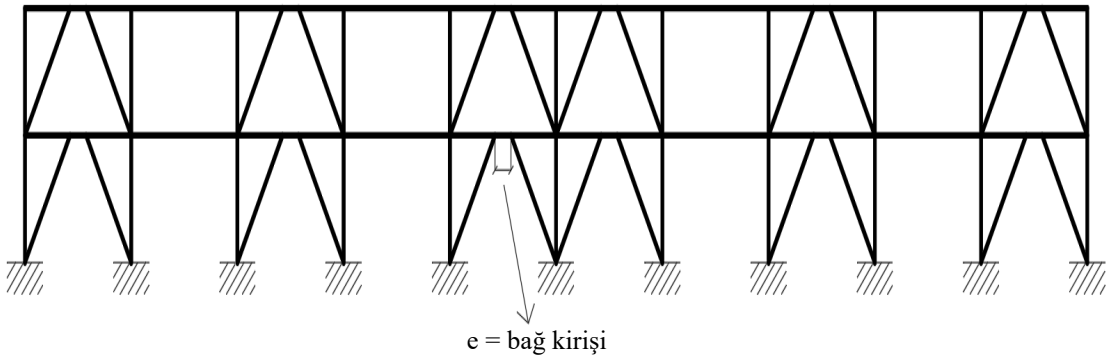
Şekil 12. Ters V merkezi çapraz sistem.



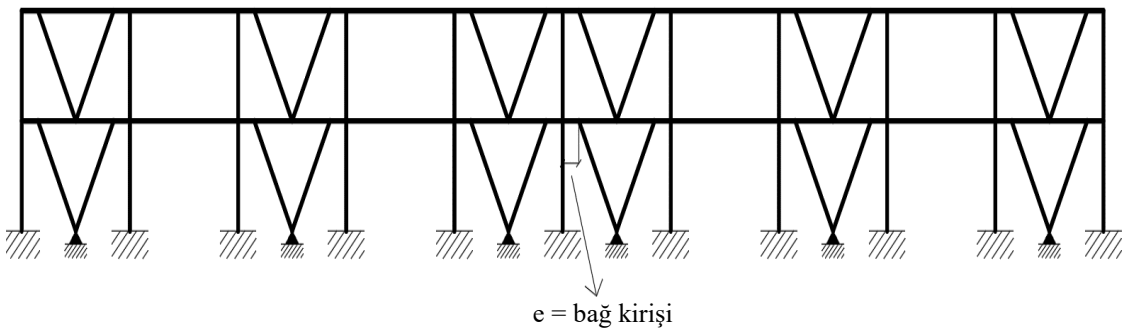
Şekil 13. V merkezi çapraz sistem.



Şekil 14. Diyagonal dışmerkez çapraz sistem.



Şekil 15. Ters V dışmerkez çapraz sistem.



Şekil 16. V dışmerkez çapraz sistem.

Dışmerkez çapraz sistemler Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16'da görüldüğü gibi bağ kirişli yapılardır. Bağ kirişlerinin yönetmeliklerde tavsiye edilen boy uzunluğu Denklem 1 ile sınırlandırılmıştır. Denklem 2 ve Denklem 3'te ise hesaplamaları yapılmıştır. Deprem kirişi olarak tayin edilen IPE180 profili ve S235 çelik malzeme sınıfı verileri ile bağ kirişi boyu hesabı yapılmıştır. (Bayram vd., 2019, s.136)

Burada, Mp: eğilme dayanımını, Vp: kesme dayanımını, e: bağ kirişi boyunu, Fy: karakteristik akma dayanımını, tf: profil başlık kalınlığını, tw: profil gövde kalınlığını, Wp: mukavemet momentini temsil etmektedir.

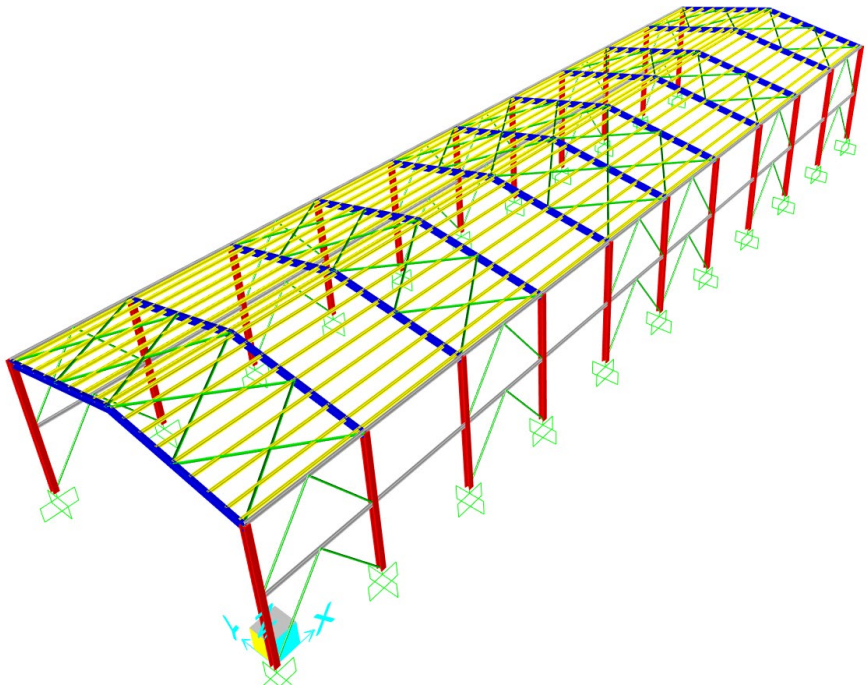
$$1{,}0\ x\ \frac{Mp}{Vp} \leq e\ \leq 1{,}3\ x \frac{Mp}{Vp} \tag{1}$$

$$Mp = 0{,}6\ x\ Fy\ x\ (d - 2tf) x\ tw \tag{2}$$

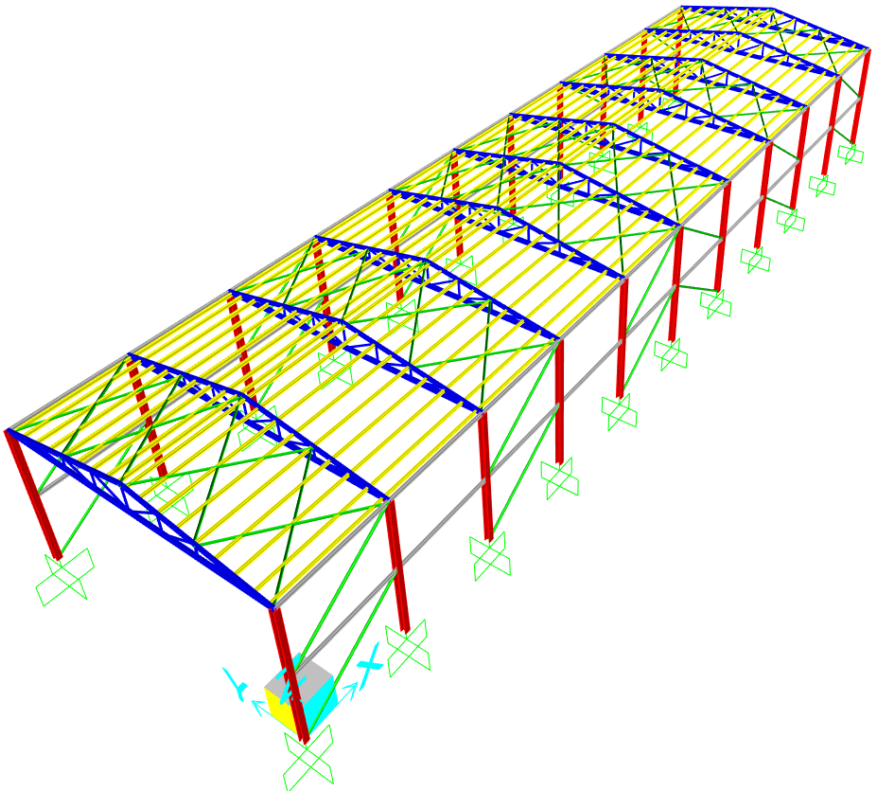
$$Vp = Wp\ x\ Fy \tag{3}$$

$$1{,}0\ x\ \frac{Mp}{Vp} \leq e\ \leq 1{,}3\ x \frac{Mp}{Vp}\ \rightarrow\ 353\ mm\ \leq e\ \leq 460\ mm \tag{4}$$

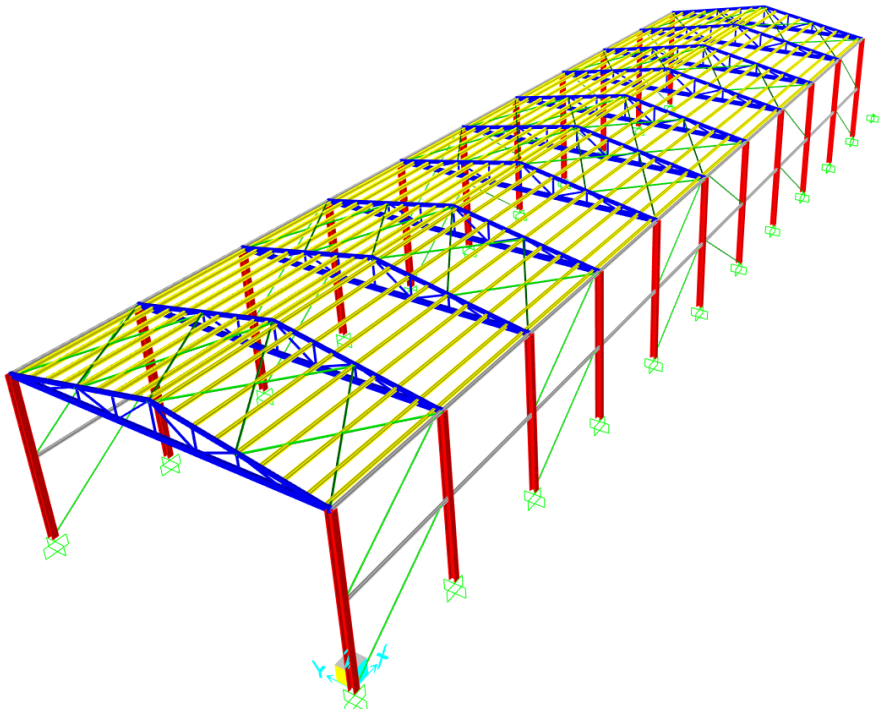
Denklem 4'te görüldüğü üzere tavsiye edilen bağ kirişi mesafesi 353 mm ile 460 mm arasında hesaplanmıştır. Belirtilen aralıktan dışmerkez bağ kirişi uzunluğu 450 mm olarak seçilmiş ve bu değere göre modellemeler yapılmıştır. Şekil 17, Şekil 18 ve Şekil 19'da 3 farklı makas yapısına sahip taşıyıcı yapısal sistemlerin üç boyutlu modelleri gösterilmiştir.



Şekil 17. DGM tipindeki yapının üç boyutlu görüntüsü.



Şekil 18. SKSM tipindeki yapının üç boyutlu görüntüsü.



Şekil 19. ÖKSM tipindeki yapının üç boyutlu görüntüsü.

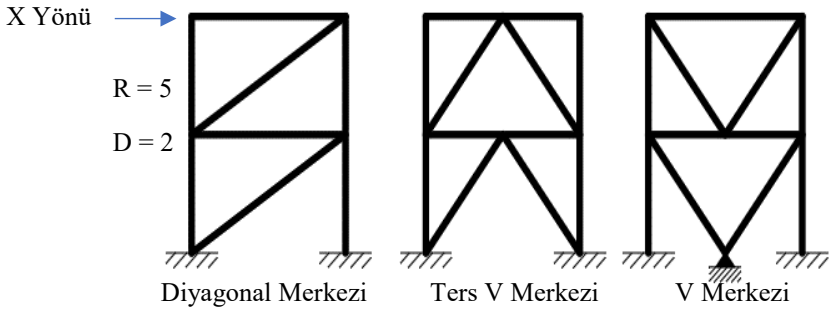
2.2. Yükleme Durumları

Yapısal modellerin analizinde kullanılan deprem verileri AFAD'ın Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması ve TBDY 2018 çerçevesinde irdelenmiştir. Yapının lokasyonu 37.92517° enlem ve 32.56292° boylam olup, konum olarak Konya organize sanayi bölgesinde yer aldığından bu sahanın deprem verileri AFAD web sitesinden alınmıştır (https://www. tdth.afad.gov.tr).

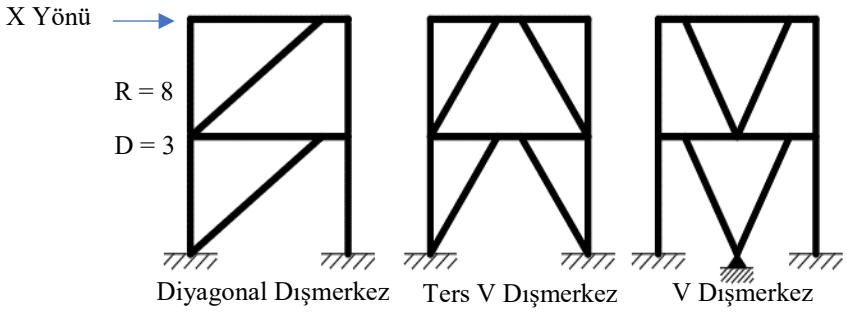
Tasarım için dikkate alınan "DD-2 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu seyrek deprem yer hareketini nitelemektedir. Bu deprem yer hareketi, standart tasarım deprem yer hareketi olarak da adlandırılmaktadır." (TBDY 2018, s.7)

Yapının ilgili konum ve boyut bilgileri doğrultusunda, TBDY 2018'den gerekli deprem hesap yöntemi verileri saptanmıştır. TBDY 2018'den alınan taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R) ve dayanım fazlalığı katsayısı (D), yönetmelikte süneklik düzeyi yüksek taşıyıcı sistemler bölümü altında çerçeve sistemlerin durumuna ve çaprazların tiplerine bağlı olarak değişmektedir. Bina taşıyıcı sistemleri için taşıyıcı sistem davranış katsayısı, dayanım fazlalığı katsayısı ve izin verilen bina yükseklik sınıfları (TBDY 2018) Tablo 1'de gösterildiği üzere; çaprazsız çerçeve sistemi için C11 taşıyıcı sistem ve R=8, D=3, merkezi çaprazlı çelik çerçeve sistem için C13 taşıyıcı sistemi ve R=5, D=2, dışmerkez çaprazlı çelik çerçeve sistem içi ise C14 taşıyıcı sistem ve R=8, D=3 olarak seçilmiştir.

Tasarımda kullanılan çerçevelerin x-z düzlemindeki görünüşleri ve çapraz tiplerine göre değişen R ve D parametreleri MÇ'li (merkezi çaprazlı) çerçeveler için Şekil 20'de, DMÇ'li (dışmerkez çaprazlı) çerçeveler içinse Şekil 21'de gösterilmiştir.



Şekil 20. Yapılarda kullanılan merkezi çapraz türleri ve katsayılar.

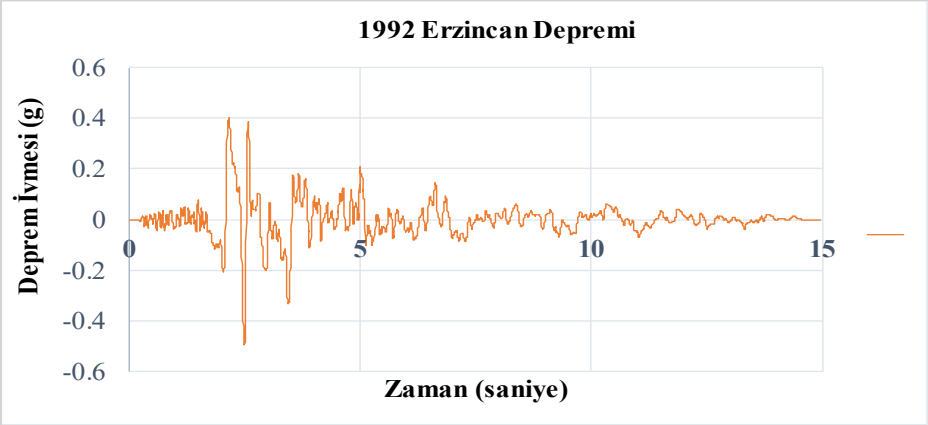


Şekil 21. Yapılarda kullanılan dışmerkez çapraz türleri ve katsayılar.

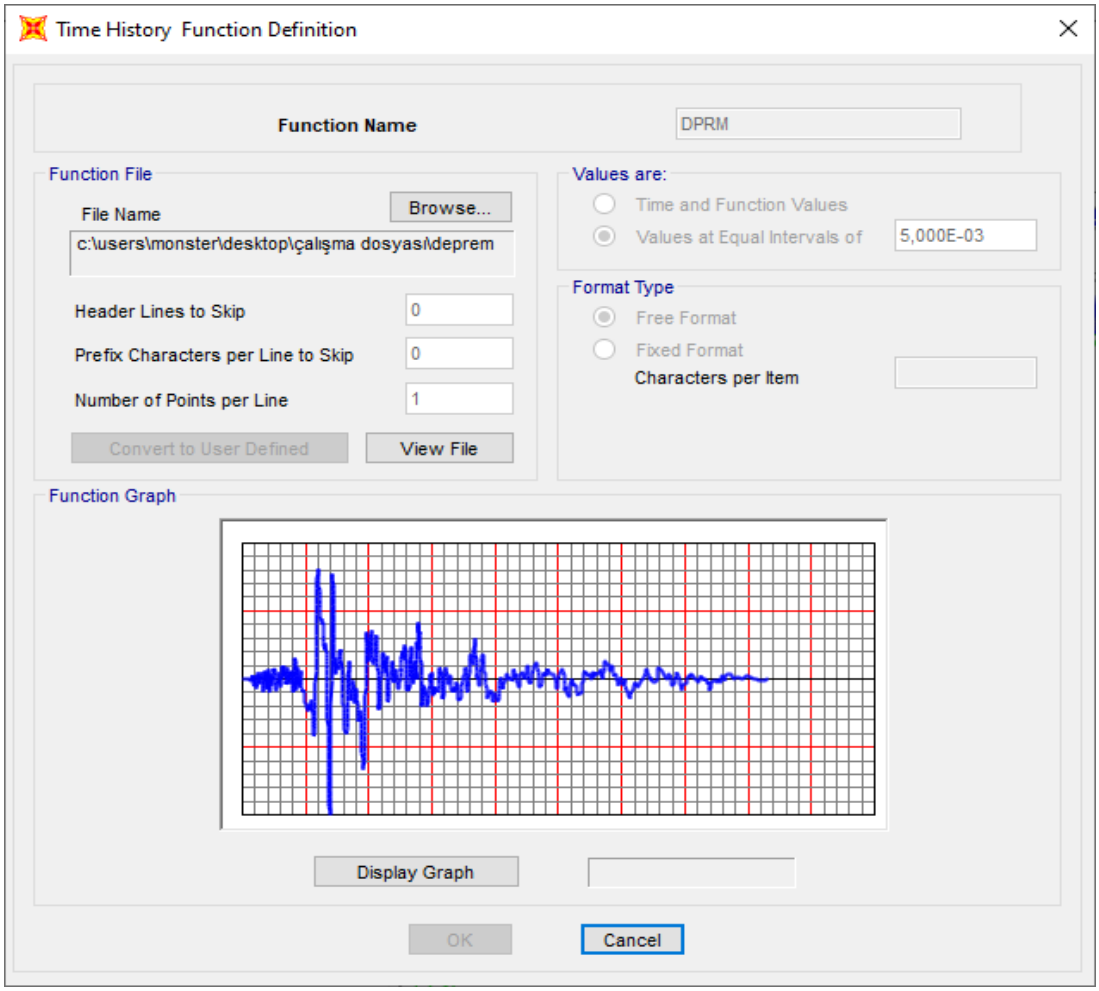
Tablo 1. Bina taşıyıcı sistemleri için taşıyıcı sistem davranış katsayısı, dayanım fazlalığı katsayısı ve izin verilen bina yükseklik sınıfları (TBDY 2018)

Bina Taşıyıcı Sistemi	Taşıyıcı Sistem DavranışKatsayısı *R*	Dayanım Fazlalığı Katsayısı *D*	Bina Yükseklik Sınıfları BYS
C. ÇELİK BİNA TAŞIYICI SİSTEMLERİ			
C1. Süneklik Düzeyi Yüksek Taşıyıcı Sistemler			
C11. Deprem etkilerinin tamamının moment aktaran süneklik düzeyi yüksek çelik çerçevelerle karşılandığı binalar	8	3	BYS ≥ 3
C12. Deprem etkilerinin tamamının süneklik düzeyi yüksek dışmerkezveya burkulması önlenmiş merkezi çaprazlı çelik çerçeveler tarafındankarşılandığı binalar	8	2.5	BYS ≥ 2
C13. Deprem etkilerinin tamamının süneklik düzeyi yüksek merkezi çaprazlı çelik çerçeveler tarafından karşılandığı binalar	5	2	BYS ≥ 4
C14. Deprem etkilerinin moment aktaran süneklik düzeyi yüksek çelik çerçeveler ile süneklik düzeyi yüksek dışmerkez veya burkulması önlenmiş merkezi çaprazlı çelik çerçeveler tarafından birlikte karşılandığı binalar	8	3	BYS ≥ 2

Zaman-tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi gerçek deprem verileri ile yapıların değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Analiz için kullanılacak deprem yükleri, bölgesel deprem tehlikesi ve zemin koşulları ile uyumlu tasarım spektrumları veya zaman-tanım alanında analiz için seçilen ivme kayıtları ile belirlenmektedir. Bu çalışmada 1992 Erzincan depremine ait ivme değerleri kullanılarak gerçek sismik kuvvetler SAP2000 yapısal analiz programında modellenen endüstriyel hangar tipi çelik yapılara uygulanmıştır. Şekil 22'de 1992 yılında meydana gelen 15 saniye süren ve 6,8 büyüklüğüne sahip Erzincan depreminin ivme-zaman grafiği görülmektedir. Erzincan depremi, grafikte gösterilen deprem kaydında görülebileceği üzere esas etkisi 2 ile 4 saniye arasında ortaya çıkan ancak genel etkisinin uzun süreli devam etmesinden dolayı seçilmiştir. Geçmiş yıllarda yaşanmış bu depremin verileri çalışma konusu endüstriyel hangar tipi çelik yapılara etki ettirilerek yapısal analizler icra edilmiştir. Yapısal analizler için kullanılan SAP2000 yapısal analiz programına gerçek deprem ivme kaydının tanımlanması Şekil 23'te gösterilmiştir.



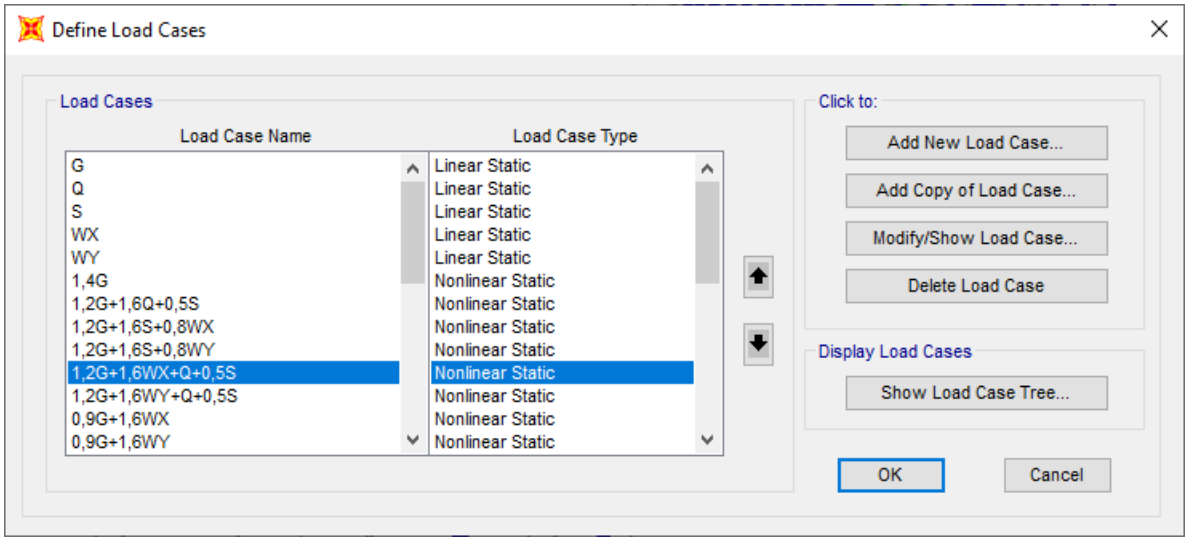
Şekil 22. 1992 Erzincan depremine ait ivme-zaman grafiği.



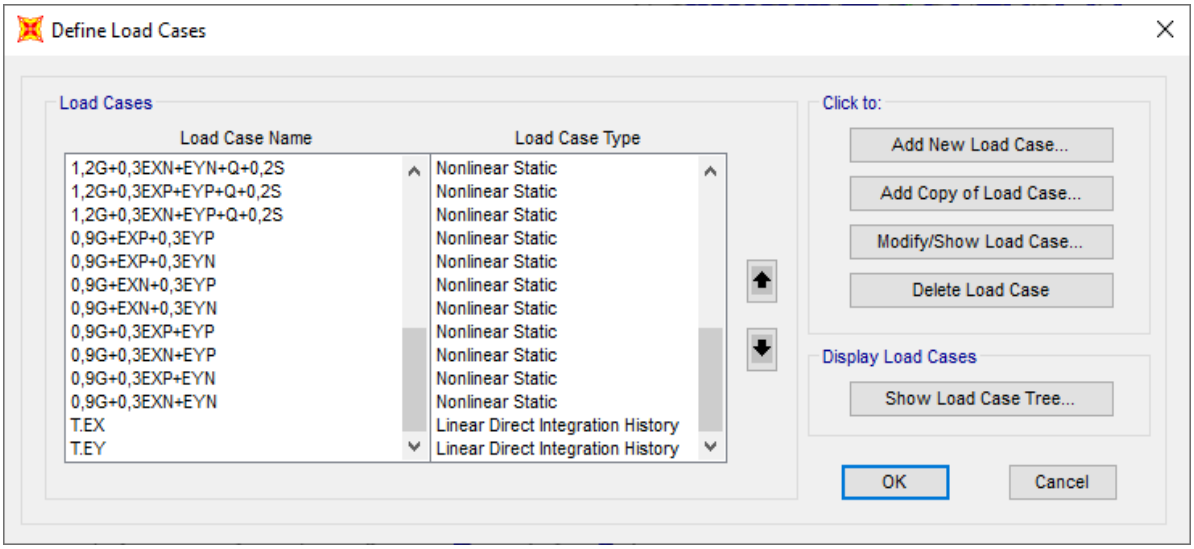
Şekil 23. SAP2000 yapısal analiz programına 1992 Erzincan depreminin ivme-zaman değerlerinin aktarımı.

Yapılarda kullanılacak yükler, deprem yükleri, kar yükleri, rüzgar yükleri ve yapıda kullanılan taşıyıcı sistemin zati ağırlığı olmak üzere dört ana yüklemeden oluşmaktadır. Rüzgar yükleri hesabında TS EN 1991-1-4 Kısım 7- Basınç ve kuvvet katsayıları bölümündeki kurallar baz alındığında yüzey ölçülerine gelen kuvvetler hesaplanmıştır; kar yükleri içinse TS EN 1991-1-3 standardı baz alınarak hesaplanmıştır. Ayrıyeten daha önce defaten belirtildiği üzere, çalışma konusu endüstriyel hangar tipi çelik yapıya deprem kuvvetleri TBDY 2018'de bulunan zaman-tanım alanında mod birleştirme yöntemi kullanılarak etkitilmiştir. Bu bağlamda, yapısal şartnamelere göre ele alınan yük kombinasyonları x- ve y-yönü olmak üzere iki ayrı sismik kuvvet etkisiyle analiz içerisine işlenmiştir.

Çerçeve elemanları oluşturan çeşitli kesitlerdeki S235 çelik malzeme sınıfına ait çelik taşıyıcı profillerin zati ağırlıkları yapısal analiz programında G yükü olarak ele alınmıştır. Yapıya herhangi bir hareketli yük uygulanmamıştır. TBDY 2018 Bölüm 4.4.4. *Deprem Etkisinin Diğer Etkilerle Birleştirilmesi* bölümündeki yük kombinasyonlarıyla ÇYTHYDE 2018 Bölüm 5.3.1 *Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım* kısmında bulunan yük kombinasyonları kullanılmıştır. Şekil 24 ve Şekil 25'de SAP2000 yapısal analiz programına işlenen yük kombinasyonları gösterilmektedir.



Şekil 24. SAP2000 yapısal analiz programına işlenen yük kombinasyonları (1.kısım).



Şekil 25. SAP2000 yapısal analiz programına işlenen yük kombinasyonları (1.kısmın devamı).

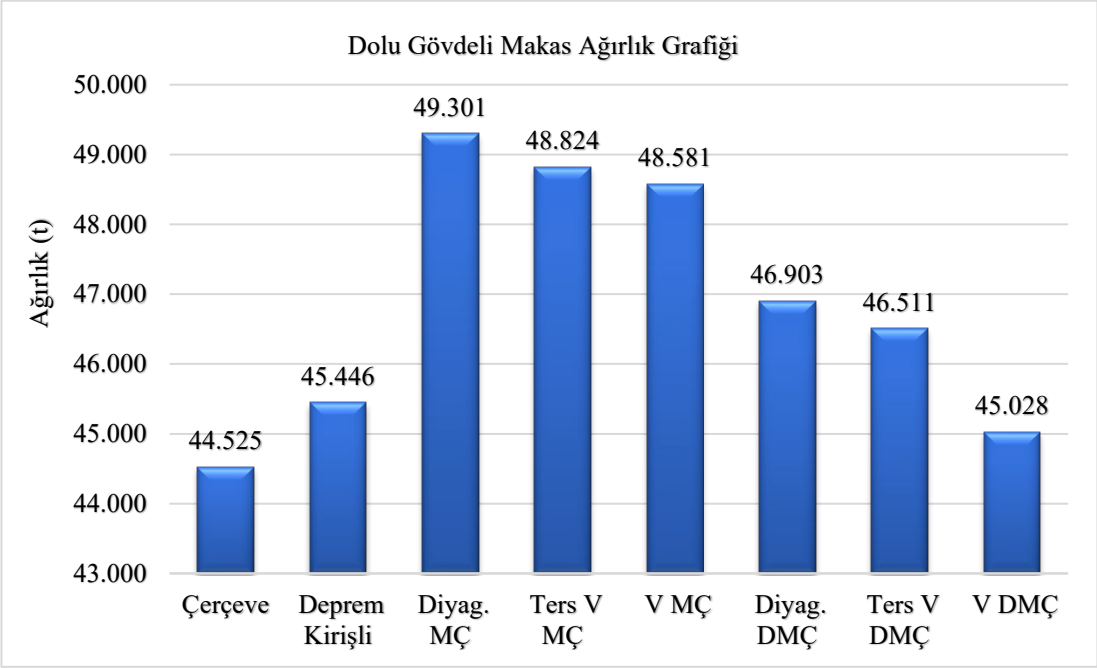
3. Bulgular

Bu çalışmada ele alınan endüstriyel hangar tipi çelik yapı sistemleri 8 farklı çapraz çerçeve sistem ve 3 farklı makas tipi üzerinden irdelenmiş ve kıyaslanmıştır. Makas sistemleri; *"Dolu Gövdeli Makas (DGM)", "Simetrik Kafes Sistem Makas (SKSM)", "Örgü Kafes Sistem Makas (ÖKSM)"*. Çerçeve türleri; *"Çaprazsız Çerçeve (Moment Aktaran)", "Çaprazsız Deprem Kirişli Çerçeve", "Diyagonal Merkezi Çaprazlı", "Ters V Merkezi Çaprazlı", "V Merkezi Çaprazlı", "Diyagonal Dışmerkez Çaprazlı", "Ters V Dışmerkez Çaprazlı", "V Dışmerkez Çaprazlı"* şeklinde belirlenmiştir. Yapısal analizler için sınırlayıcı kriterde sadece kapasite tasarımı baz alınmıştır. Endüstriyel hangar tipi çelik yapılarda değerlendirilmek istenilen bulgu, kapasite tasarımını sağlayan elemanlardan meydana gelen bir yapısal sistemin diğer sınır değerlerinde meydana gelen değişimlerdir. Bu açıdan tasarım kriteri, her tip taşıyıcı sistem

elemanlarından en az birinde kapasite tasarım oranının %80 olması ön koşulu ile kabulü yapılmıştır. Kapasite tasarım şartını sağlayan değişik tipteki örgü düzenine sahip endüstriyel hangar tipi çelik sanayi yapılarının karşılaştırmaları ve değerlendirmeleri yapı ağırlığı, taban kesme kuvveti, kolon üst nokta ötelenmeleri, tepe noktası ötelenmeleri ve yapının maksimum deplasman değerleri üzerinden yapılmıştır.

Yapı ağırlıkları, 3 makas ve 8 çerçeve tipi olmak üzere toplamda 24 farklı yapı üzerinde SAP2000 yapısal analiz programı aracılığı ile hesaplanmış ve grafikler halinde sunularak detaylıca incelenmiştir.

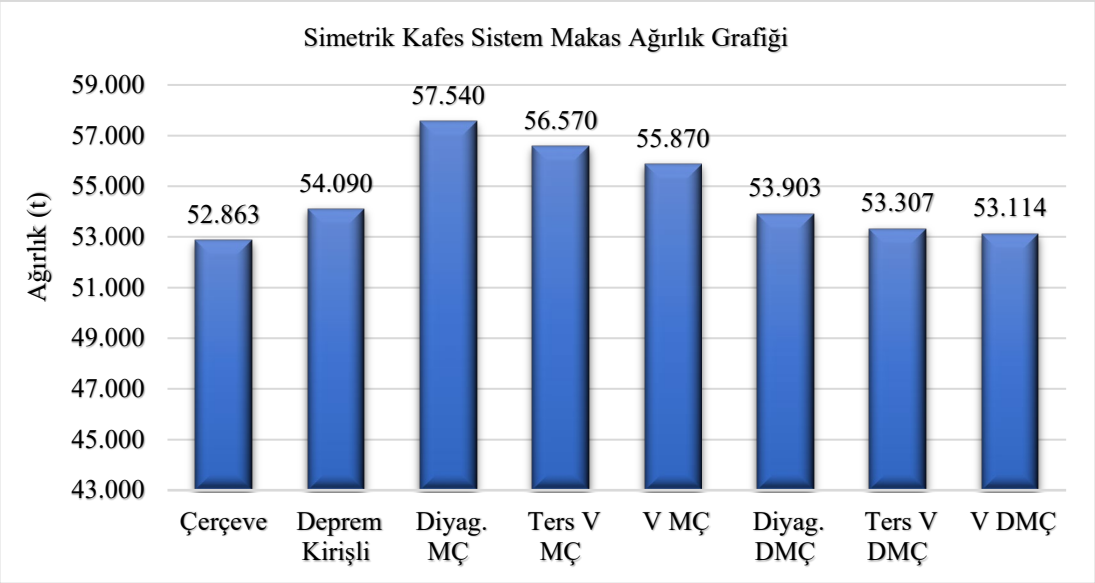
DGM tipinin farklı çerçeve sistemler ile oluşturduğu modellerin ağırlıkları Şekil 26'da ve makas tipinin çerçeve kesiti Şekil 27'de verilmiştir. SKSM tipinin farklı çerçeve sistemler ile oluşturduğu modellerin ağırlıkları Şekil 28'de ve makas tipinin çerçeve kesiti Şekil 29'da verilmiştir. ÖKSM tipinin farklı çerçeve sistemler ile oluşturduğu modellerin ağırlıkları Şekil 30'da ve makas tipinin çerçeve kesiti Şekil 31'de verilmiştir.



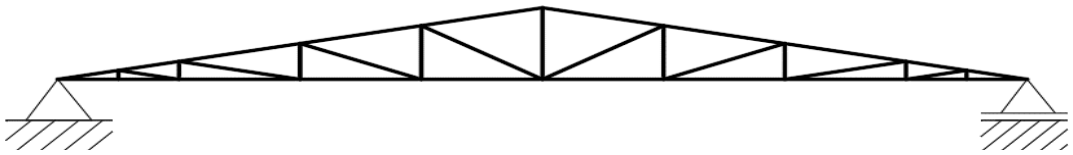
Şekil 26. DGM ağırlık grafiği.



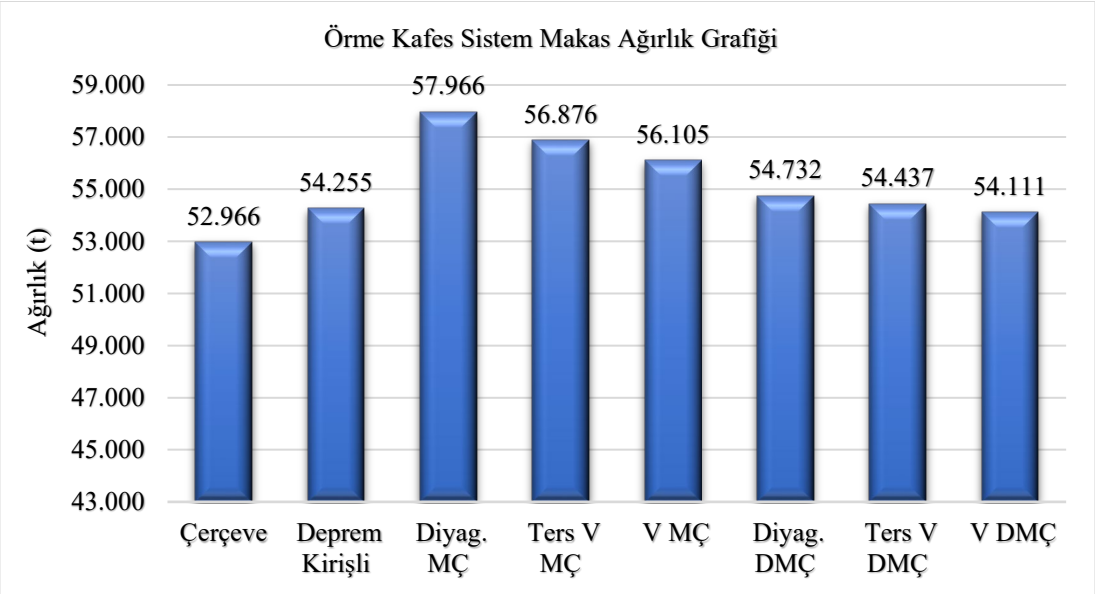
Şekil 27. DGM çerçeve görünüşü.



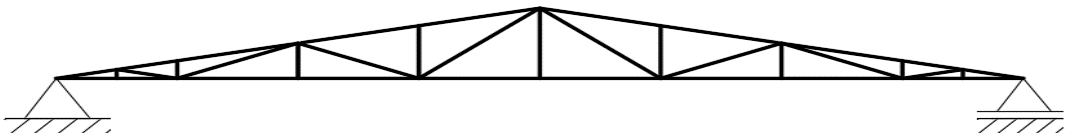
Şekil 28. SKSM ağırlık grafiği.



Şekil 29. SKSM çerçeve görünüşü.



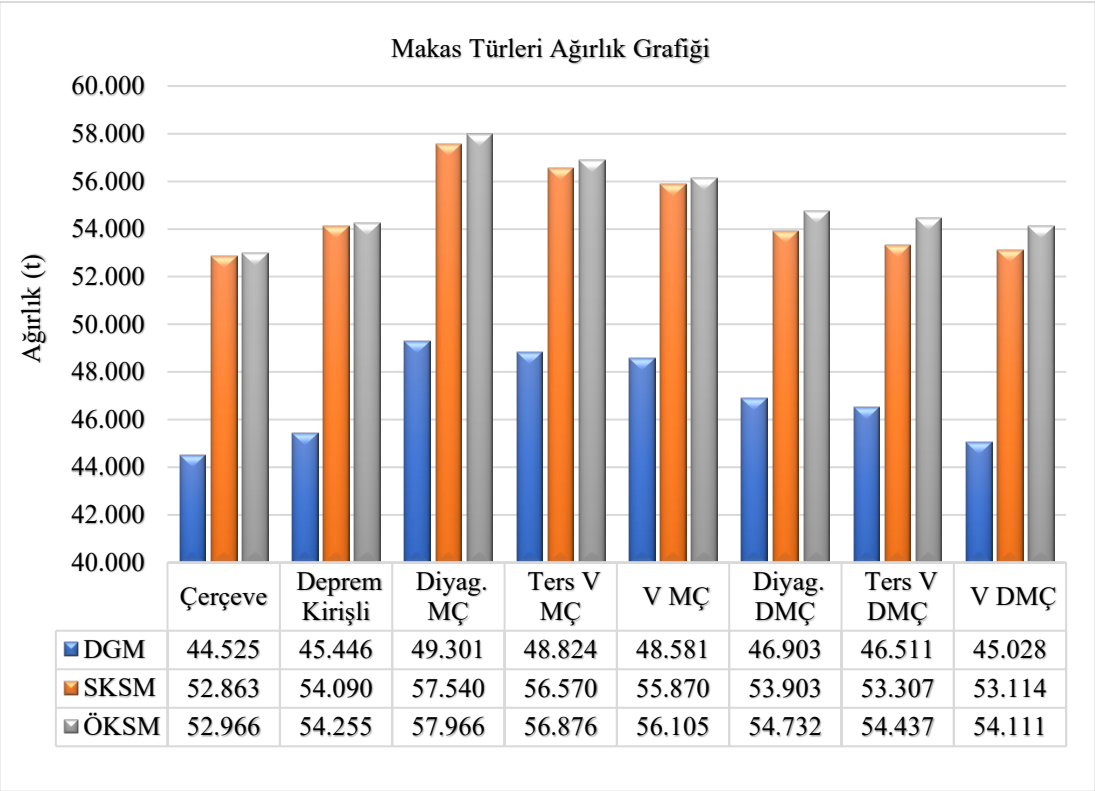
Şekil 30. ÖKSM ağırlık grafiği.



Şekil 31. ÖKSM çerçeve görünüşü.

Şekil 32'de makas türlerine ait çerçeve sistemlerin ağırlıkları ayrı ayrı grafik haline getirilmiştir. Şekil 27, Şekil 29 ve Şekil 31'de açıkça görüldüğü üzere üç makas türünde çerçeve sistemden diyagonal MÇ'li sisteme kadar ağırlık artışı olmaktadır. Aynı zamanda diyagonal MÇ'den sonraki çerçeve sistemlere doğru nispeten doğrusal bir ağırlık azalması görülmektedir. Bu artışın sebebi yapılara

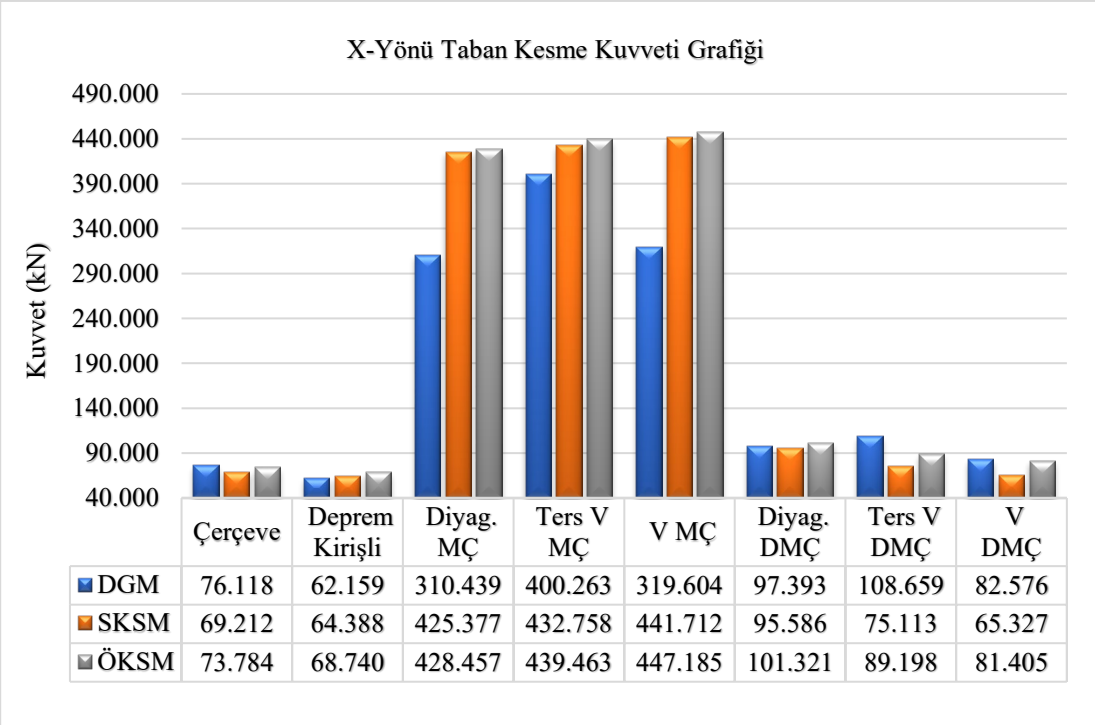
sonradan eklenen elemanların ağırlıklarıdır. Azalmanın sebebi ise çerçeve sistemlerin stabilite özelliği ve örgü düzeninden kaynaklı mevcut profil kesitlerinin küçülmesidir. Üç makas türü karşılaştırıldığında ise dolu gövdeli sistemin diğer kafes sistemlere göre daha düşük yapı ağırlığından oluştuğu görülmüştür. Kalan iki kafes sistemin ağırlıkları karşılaştırıldığı zaman makas örgü düzeninden kaynaklı SKSM'lerin genel olarak daha az yapı ağırlığında çözüldüğü görülmüştür. Özet olarak sadece yapı ağırlığı açısından ele alındığında DGM türünün dışmerkez V çapraz tipinin en az yapı ağırlığında çözülmüş olduğu ve en avantajlı yapısal çözümü verdiği görülmektedir.



	Çerçeve	Deprem Kirişli	Diyag. MÇ	Ters V MÇ	V MÇ	Diyag. DMÇ	Ters V DMÇ	V DMÇ
DGM	44.525	45.446	49.301	48.824	48.581	46.903	46.511	45.028
SKSM	52.863	54.090	57.540	56.570	55.870	53.903	53.307	53.114
ÖKSM	52.966	54.255	57.966	56.876	56.105	54.732	54.437	54.111

Şekil 32. Makas türleri ağırlık grafiği.

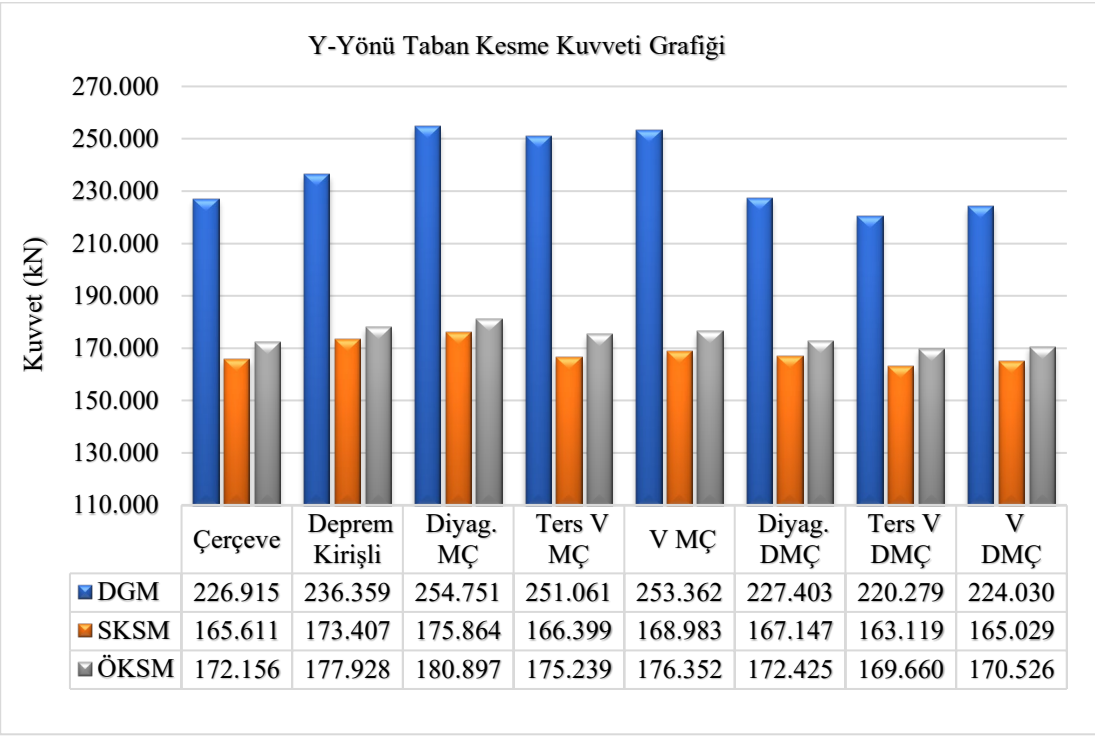
Şekil 33'te yapıların x-yönündeki taban kesme kuvvetleri makas ve çapraz türleri bakımından karşılaştırmalı şekilde verilmiştir. Şekil 33'teki grafikte verilen x-yönü taban kesme kuvvetleri incelendiğinde; çerçeve, deprem kirişli ve DMÇ'li sistemlerin MÇ'li tasarımlara göre çok daha düşük değerlerde taban kesme kuvvetine sahip olduğu açıkça görülmektedir. DMÇ ve MÇ'lerin taban kesme kuvvetleri karşılaştırıldığında, MÇ'li çerçeve sistemlerin taban kesme kuvvetlerinin DMÇ'li sistemlerin taban kesme kuvvetinin yaklaşık 4 katı olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi ise (Şekil 35'teki grafikte belirtilen) x-yönü ötelenme değerleri olduğu tespit edilmiştir. Grafikler detaylı olarak incelendiğinde yüksek ötelenme değerine sahip yapısal tasarımların taban kesme kuvvetleri düşük değerler taşırken, düşük ötelenme değerlerine sahip yapısal sistemlerin taban kesme kuvvetleri yüksek değerler taşımaktadır. Bu durum değerlendirildiğinde, DMÇ'li sistemlerin MÇ'li sistemlere göre daha düşük taban kesme kuvveti taşıdığı ve daha avantajlı yapısal durumda olduğu görülmüştür. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde ise SKSM türü V DMÇ'li sisteminin en az taban kesme değerine sahip olduğu, bu açıdan en avantajlı çerçeve sistemi olduğu görülmüştür.



	Çerçeve	Deprem Kirişli	Diyag. MÇ	Ters V MÇ	V MÇ	Diyag. DMÇ	Ters V DMÇ	V DMÇ
DGM	76.118	62.159	310.439	400.263	319.604	97.393	108.659	82.576
SKSM	69.212	64.388	425.377	432.758	441.712	95.586	75.113	65.327
ÖKSM	73.784	68.740	428.457	439.463	447.185	101.321	89.198	81.405

Şekil 33. Makas tiplerine göre elde edilen X-yönü taban kesme kuvveti grafiği.

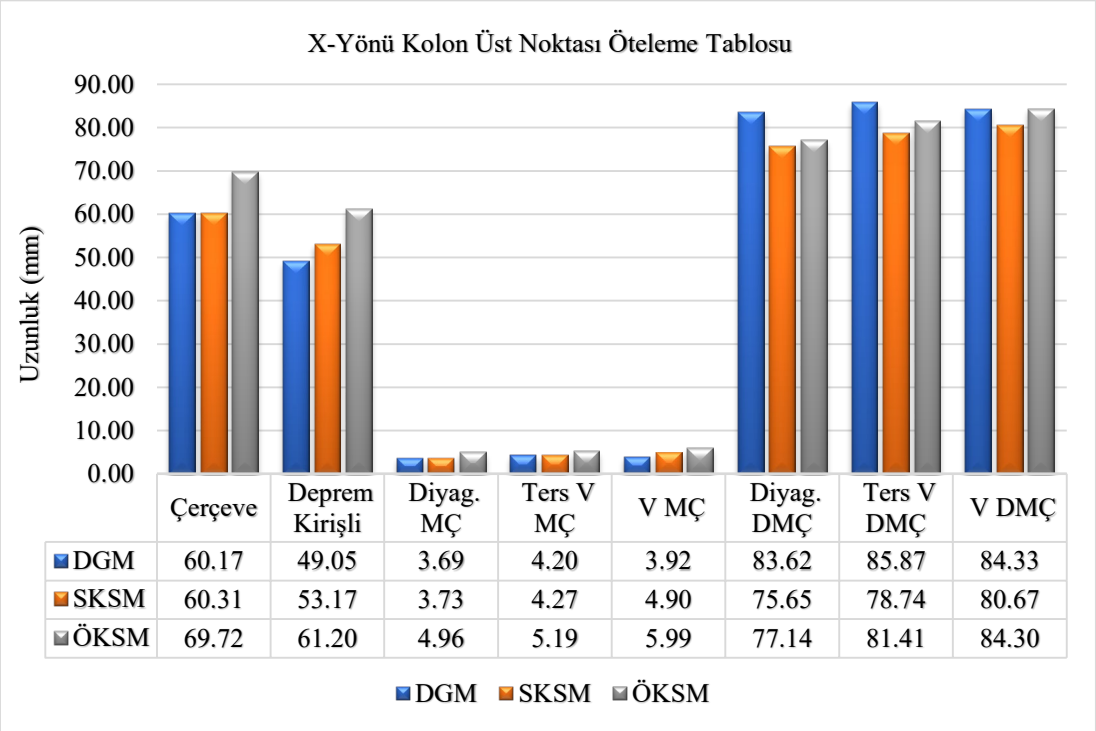
Şekil 34'te makas ve çapraz türleri bakımından farklı 24 yapının y-yönündeki taban kesme kuvvetleri grafik halinde sunulmuştur. Bu şekil incelendiğinde DGM türünün kafes sistem makas türlerine göre daha yüksek taban kesme kuvvetine maruz kaldığı açıkça görülmektedir. Bu yüksek oranda stabilite durumundan kaynaklanmaktadır. Kafes sistem makasların dolu gövdeli sisteme göre y-yönü taban kesme kuvvetleri açısından daha avantajlı yapısal sonuçlar verdiği söylenebilir. Ayrıca, y-yönünde herhangi bir çapraz örgü düzeni bulunmadığından, ağırlık miktarı etken faktör olarak ön plana çıkmaktadır. Bu durumun sonucunda ağırlık ile doğrusal olarak ters V ve V dışmerkez çapraz tiplerinin taban kesme kuvvetlerine en az maruz kalan çerçeve tipleri olduğu görülmektedir. Sonuç olarak SKSM türü ters V çapraz çerçeve sisteminin, y-yönü taban kesme kuvveti açısından avantajlı yapısal sonuçlar verebildiği görülmüştür. Burada da açıkça görülmektedir ki taban kesme kuvveti tek bir parametre ile sınırlı ve doğrusal kalmayacak kadar değişken bir kriterdir.



	Çerçeve	Deprem Kirişli	Diyag. MÇ	Ters V MÇ	V MÇ	Diyag. DMÇ	Ters V DMÇ	V DMÇ
DGM	226.915	236.359	254.751	251.061	253.362	227.403	220.279	224.030
SKSM	165.611	173.407	175.864	166.399	168.983	167.147	163.119	165.029
ÖKSM	172.156	177.928	180.897	175.239	176.352	172.425	169.660	170.526

Şekil 34. Makas tiplerine göre elde edilen Y-yönü taban kesme kuvveti grafiği

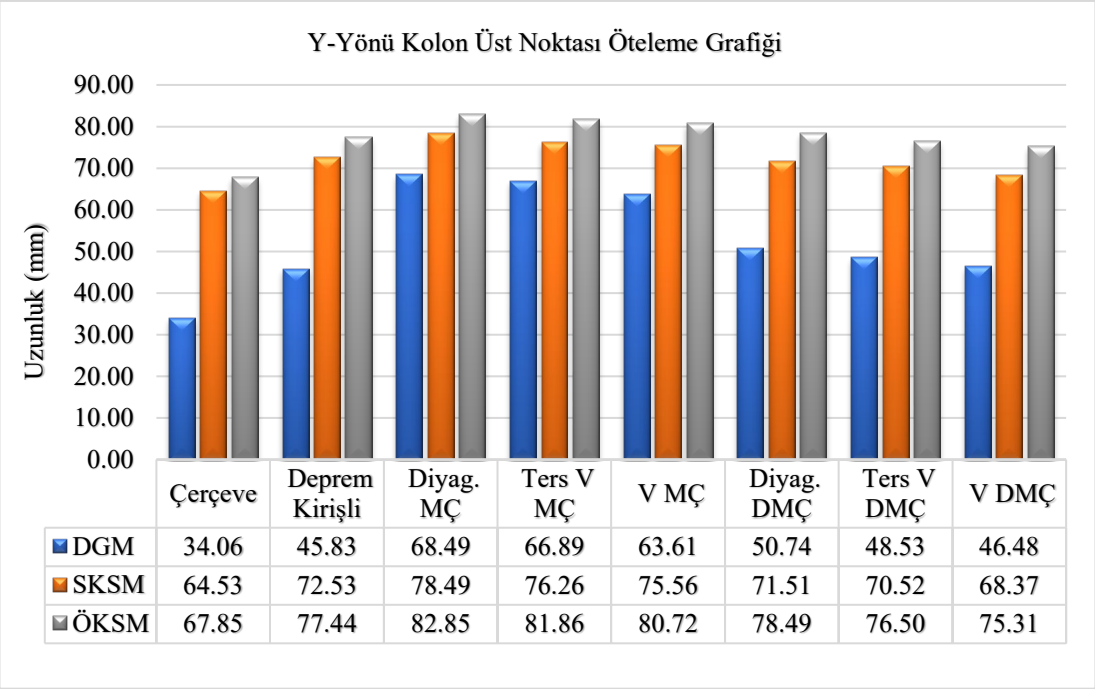
Şekil 35'te yapıların x-yönündeki kolon üst nokta öteleme değerleri karşılaştırmalı grafik şeklinde gösterilmiştir. Öteleme değerleri, E_y ve E_y olmak üzere iki eksende yapılara etki ettirilen deprem yüklerinin sonucundaki yer değiştirme verilerinin incelenmesi ile elde edilmiştir. Yapılarda kullanılan kolonların yüksekliği sabit 8 m'dir. Kolon kesitleri HEA profilden tayin edilmiş olup, farklı ölçülere sahiptirler. Kolon alt noktaları ankastre mesnet şeklinde mesnetlendiği için dönme ve ötelenmeler bu noktalarda oluşmamaktadır. Yapıya gelen yükler kolonun diğer uç noktası olan üst kısmında ciddi ötelemeler oluşturmaktadır. Bu ötelemeler ise büyük oranda çapraz elemanlar tarafından karşılanmakta ve yapı bu sayede stabil hale gelmektedir. Kolon üst noktasının öteleme değerleri üzerinden çapraz elemanların ve makas türlerinin karşılaştırılması, çalışma amacına uygun bir değerlendirme olacaktır. Şekil 35'te x-yönü kolon üst noktası öteleme değerleri mm cinsinden 24 farklı çerçeve tasarım için ayrı ayrı verilmiştir. Deprem kirişli çerçeveler ile çaprazsız çerçeve sistemler ile karşılaştırıldığında, deprem kirişlerinin kolon üst nokta ötelemelerini %11-18 arasında değişen oranlarda düşürdüğü görülmüştür. Tabloya bakıldığı zaman çaprazsız çerçeveler ve DMÇ'ler yüksek öteleme değerleri verirken, MÇ'li sistemler diğer sistemlere göre 20 kat daha düşük öteleme değerleri vermektedir. Bu durumun sebebi ise Çizelge 3.1'de belirtilen çerçeve sistemlerin deprem etkilerine karşı tasarım parametreleridir. MÇ'li çerçevelerde deprem etkilerinin tamamı çaprazlar tarafından karşılandığı için çapraz elemanlarının kesitleri büyük olmakta ve yapıyı daha rijit hale getirmektedir. Fakat DMÇ'li yapılarda deprem etkileri çaprazlarla beraber tüm çerçeve sistem ile birlikte karşılandığından kesitler daha küçük olmakta ve buna bağlı olarak yapı ağırlığı nispeten daha az olmaktadır.



	Çerçeve	Deprem Kirişli	Diyag. MÇ	Ters V MÇ	V MÇ	Diyag. DMÇ	Ters V DMÇ	V DMÇ
DGM	60.17	49.05	3.69	4.20	3.92	83.62	85.87	84.33
SKSM	60.31	53.17	3.73	4.27	4.90	75.65	78.74	80.67
ÖKSM	69.72	61.20	4.96	5.19	5.99	77.14	81.41	84.30

Şekil 35. Makas türleri X-yönü kolon üst noktası öteleme grafiği.

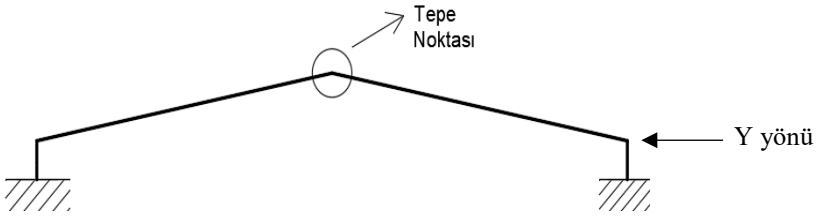
Şekil 36'daki grafikte y-yönü kolon üst noktası öteleme değerleri mm cinsinden 24 farklı çerçeve tasarımı için ayrı ayrı gösterilmiştir. Y-yönündeki kolon üst noktası öteleme grafiği detaylı şekilde irdelendiğinde; çaprazsız çerçevelerden merkezi çaprazlı (MÇ) çerçevelere doğru öteleme verilerinde artım, merkezi çaprazlı çerçevelerden dışmerkez çapraz (DMÇ) çerçevelere doğru öteleme verilerinde ise azalım gözlemlenmiştir. Y-yönü herhangi bir çapraz sisteme sahip olmadığından bu öteleme verilerinde yapı ağırlığı ve makas türüne göre değişiklik saptanmıştır. Bu sebeple, stabilite durumları birbirine yakın olan kafes sistemlerde öteleme verileri de ağırlık verileri gibi birbirine yakın sonuçlar olarak görülmektedir. Dolu gövdeli makaslarda (DGM), kafes sistem makaslara göre daha düşük öteleme verileri olması, makasların moment aktarabilen birleşimlerden oluşmasından kaynaklanmaktadır. Ek olarak DGM tipinde bulunan kolon kesitinin kafes sistem makas tipinde bulunan kesitten güçlü eksen yönünde (y-yönü) daha rijit olmasından dolayı, öteleme verilerinin değerlerinde düşüş gözlemlenmektedir. Bu bulguların sonucunda düşük değerde öteleme verisine sahip olan (büyük oranda ağırlık etkisinden dolayı), dolu gövdeli makas tipi-V dışmerkez çapraz türünün, y-yönü kolon üst nokta öteleme verisi açısından en ideal çerçeve türü olduğu gözlemlenmiştir.



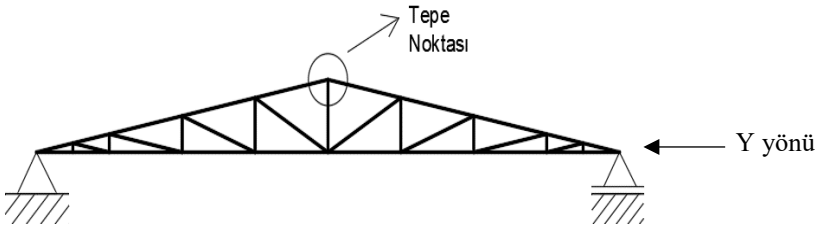
	Çerçeve	Deprem Kirişli	Diyag. MÇ	Ters V MÇ	V MÇ	Diyag. DMÇ	Ters V DMÇ	V DMÇ
DGM	34.06	45.83	68.49	66.89	63.61	50.74	48.53	46.48
SKSM	64.53	72.53	78.49	76.26	75.56	71.51	70.52	68.37
ÖKSM	67.85	77.44	82.85	81.86	80.72	78.49	76.50	75.31

Şekil 36. Makas türleri Y-yönü kolon üst noktası öteleme grafiği.

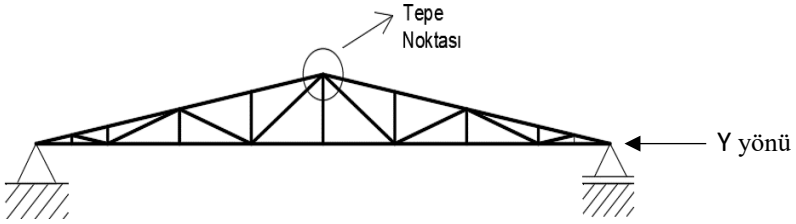
Tepe noktası öteleme değerleri, 3 makas ve 8 çerçeve tipi olmak üzere toplamda 24 farklı yapı üzerinde, SAP2000 yapısal analiz programı aracılığı ile hesaplanmış ve grafikler halinde (Şekil 40 ve Şekil 41) incelenmiştir. Uzunluklar mm (milimetre) cinsinden verilmiştir. Öteleme değerleri, E_x ve E_y olmak üzere iki eksende yapılara etki ettirilen deprem yüklerinin sonucundaki yer değiştirme verileridir. Tepe noktası Şekil 37, Şekil 38 ve Şekil 39'da gösterildiği üzere yapının en üst noktası olan, mahya kotu olarak da isimlendirilen makas sisteminin uç noktasıdır. Bu noktanın yüksekliği tüm çerçeve sistemlerde eşit ve 9.5 m'dir. Makas türlerinin farklılıklarını değerlendirme ve yorumlama açısından tepe noktası ötelemeleri, tıpkı kolon üst noktası ötelemeleri gibi çalışmanın amacına uygun kritik veriler sunmaktadır.



Şekil 37. DGM ve tepe noktası.



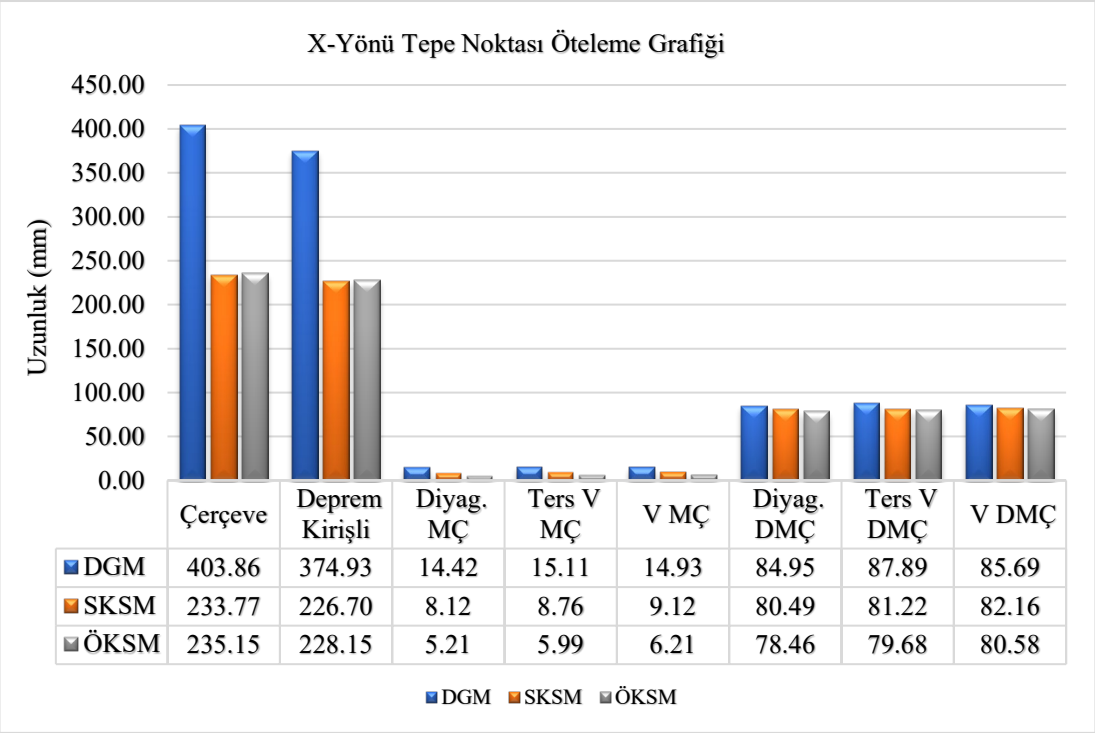
Şekil 38. SKSM türü ve tepe noktası.



Şekil 39. ÖKSM türü ve tepe noktası.

Şekil 40'taki grafikte x-yönü tepe noktası öteleme değerleri mm cinsinden 24 farklı çerçeve tasarım için ayrı ayrı gösterilmiş ve sayısal verilere yer verilmiştir. Bu veriler doğrultusunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Çaprazsız çerçeve sistemlerin tepe noktalarında ciddi yer değiştirme değerlerinin oluştuğu ve stabilitenin bozulduğu açıkça görülmekte ve bir kez daha çapraz elemanların yapı tasarımı üzerinde ki önemi ortaya çıkmaktadır.
- Çaprazsız çerçeve sistemlere eklenen deprem kirişlerinin kolon üst noktalarında olduğu gibi tepe noktalarında da yapının öteleme değerlerini etkilediği görülmüştür. Deprem kirişli çerçeve sistemlerde, düz çerçeve sistemlere göre %3-6 oranında değişen miktarlarda daha az yer değiştirme değerleri gözlemlenmektedir.
- DGM'nin düz çerçeve sistemlerinde yüksek öteleme değerleri oluşması, örgü sistem eksikliğinden kaynaklı, yekpare profillerin zayıf eksendeki davranışını göstermektedir. Tepe noktası moment aktaran bir birleşim olduğu halde zayıf eksendeki ötelemeler çapraz elemanların yokluğunda ciddi stabilite sorunlarına yol açmaktadır.
- Şekilde belirtilen yer değiştirme değerleri neticesinde en az öteleme değerine sahip ÖKSM türünde diyagonal MÇ'li çerçeve sistemi olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi ÖKSM türünün tepe noktası olarak ifade ettiğimiz düğüm noktasında sağladığı stabilite durumudur.

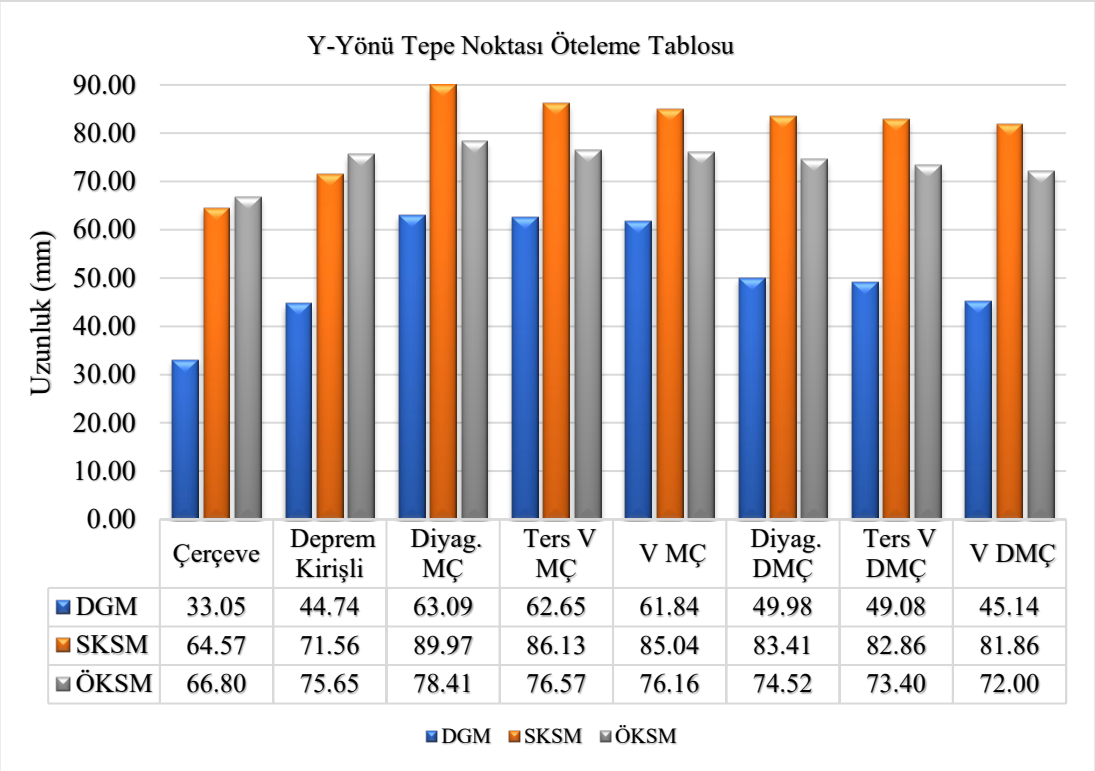


	Çerçeve	Deprem Kirişli	Diyag. MÇ	Ters V MÇ	V MÇ	Diyag. DMÇ	Ters V DMÇ	V DMÇ
DGM	403.86	374.93	14.42	15.11	14.93	84.95	87.89	85.69
SKSM	233.77	226.70	8.12	8.76	9.12	80.49	81.22	82.16
ÖKSM	235.15	228.15	5.21	5.99	6.21	78.46	79.68	80.58

Şekil 40. Makas türleri X-yönü tepe noktası öteleme grafiği.

Şekil 41'deki grafikte y-yönü tepe noktası öteleme değerleri mm cinsinden 24 farklı çerçeve tasarım için ayrı ayrı gösterilmiş ve sayısal verilere yer verilmiştir. Bu veriler doğrultusunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- DGM sisteminde iki yekpare profilin tepe noktasındaki rijit birleşimi, y-yönündeki yer değiştirmeleri ciddi oranda azaltmıştır. Karşılaştırma yapılan diğer kafes sistem makas türlerine oranla ortalama %30 daha az öteleme değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Kafes sistemler bu rijitlikte yani moment aktaran birleşim mantığı ile çalışmamaktadır. Bütün düğüm noktaları mafsallı olarak birleşmekte ve moment aktarmayan biçimde bağlanmaktadır. Ayrıca DGM türünün diğerlerinden daha hafif yapı ağırlığına sahip olduğu da göz önüne alınmalıdır.
- Tepe noktası düğümleri incelendiğinde ÖKSM'nin örgü düzeninin daha stabil olduğu görülmektedir. Bu durumun sonucunda ise ÖKSM türündeki öteleme değerlerinin, SKSM türüne oranla %13 civarında daha az olduğu ve daha avantajlı yapısal sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Sonuç olarak şekilde, yapı ağırlıkları ve düğüm noktası stabilite durumları göz önüne alındığında DGM türü dışmerkez V çapraz sisteminin en az öteleme değerine sahip olduğu görülmektedir.



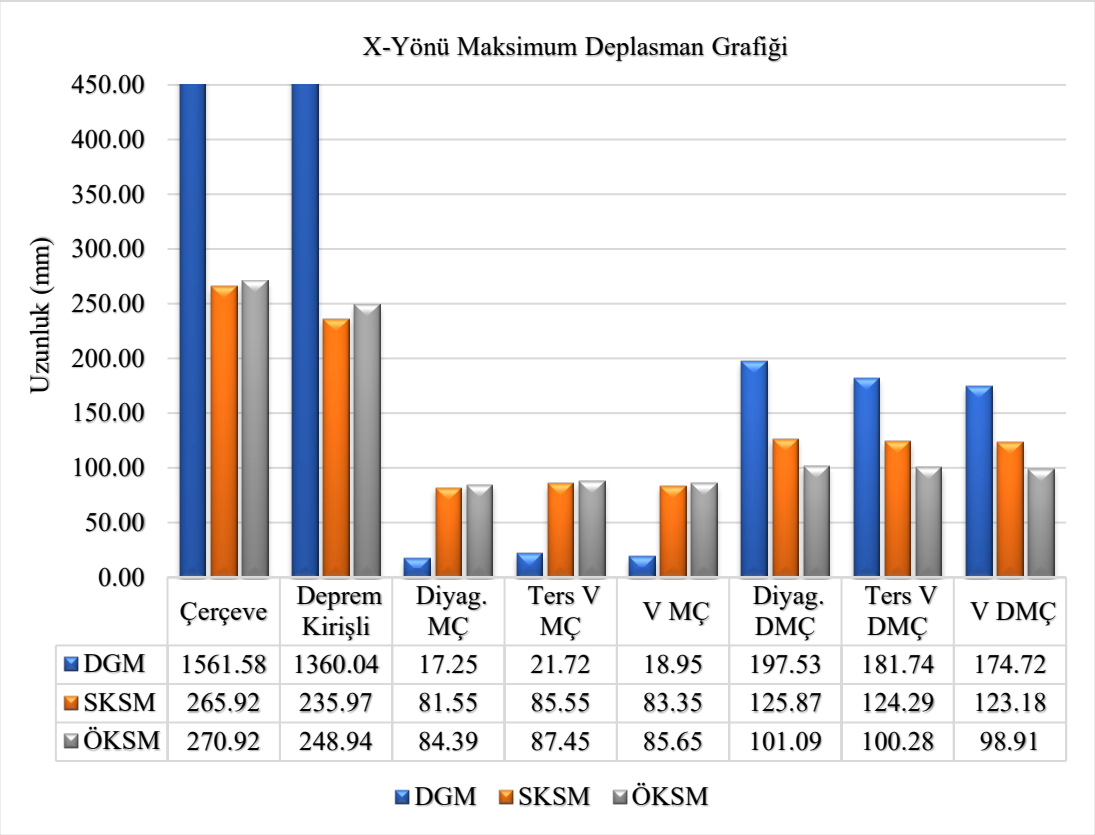
	Çerçeve	Deprem Kirişli	Diyag. MÇ	Ters V MÇ	V MÇ	Diyag. DMÇ	Ters V DMÇ	V DMÇ
DGM	33.05	44.74	63.09	62.65	61.84	49.98	49.08	45.14
SKSM	64.57	71.56	89.97	86.13	85.04	83.41	82.86	81.86
ÖKSM	66.80	75.65	78.41	76.57	76.16	74.52	73.40	72.00

Şekil 41. Makas türleri Y-yönü tepe noktası öteleme grafiği.

Maksimum öteleme değerleri, 3 makas ve 8 çerçeve tipi olmak üzere toplamda 24 farklı yapı üzerinde, SAP2000 yapısal analiz programı aracılığı ile hesaplanmış ve grafikler halinde incelenmiştir. Öteleme değerleri tüm yük kombinasyonlarının ana iki eksende yapılara etki ettirilmesiyle oluşan yer değiştirme verileridir. Maksimum değerler yapıların stabilite durumları hakkında önemli veriler sunabilmektedir. Bu parametre üzerinden asıl gözlemlenmek istenen ise, hangi örgü düzeninin hangi çapraz sistem ile daha stabil çalıştığı ve nasıl sonuçlar verdiği hususudur.

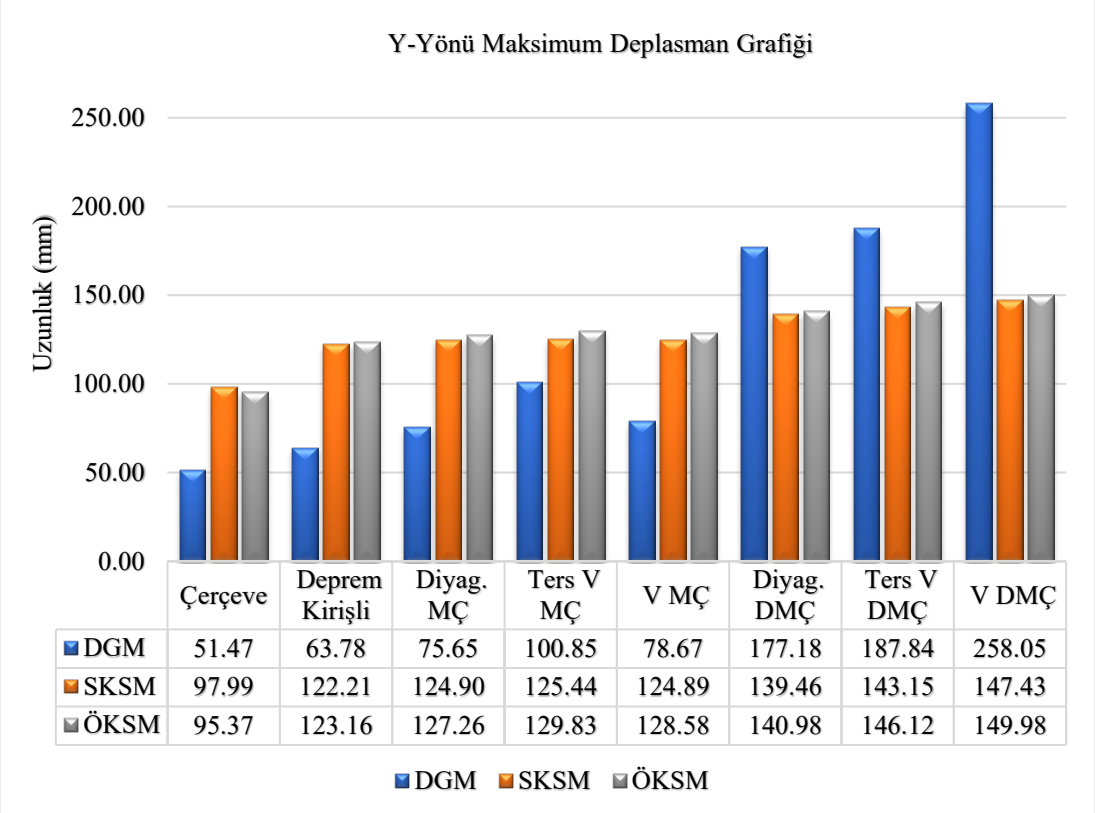
Bu amaçla, Şekil 42'de x-yönü ve Şekil 43'te y-yönü maksimum deplasman değerleri mm cinsinden 24 farklı çerçeve tasarım için ayrı ayrı gösterilmiştir. Şekil 42 ve Şekil 43'te verilen grafiklerdeki veriler doğrultusunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- DGM'nin çaprazsız çerçeve sistemlerinin x-yönü deplasman sonuçlarına bakıldığında ciddi oranda yer değiştirmeler olduğu görülmektedir. Dışmerkez ve merkezi çaprazlı çerçeveli sistemler karşılaştırıldığında %90'lara varan yer değiştirme farklılıkları görülmektedir. Bu durumun sonucunda ise DGM türünün MÇ'li çerçeveler ile daha uyumlu çalıştığını söylemek mümkündür.
- X-yönünde iki kafes sistem arasında değerlendirme söz konusu olduğunda, SKSM türünün merkezi çaprazlar ile ÖKSM türünün dışmerkez çaprazlar ile daha uyumlu çalıştığı görülmektedir.
- Y-yönü maksimum deplasmanlar incelendiğinde, DGM türünün dışmerkez çaprazlı sistemlerle uyumlu çalışmadığı görülmüş ve merkezi çaprazlı sistemlere göre %150'lere varan oranlarda yer değiştirme miktarında artış olduğu gözlenmiştir.
- Y-yönünde kafes sistem makas türleri incelendiğinde, maksimum deplasmanlar açısından merkezi çaprazlar ile dışmerkez çaprazlar arasında %20 civarında bir farklılık olduğu görülmektedir.
- Sonuç olarak maksimum deplasmanlar açısından, hem x-yönünde hem de y-yönünde DGM diyagonal MÇ'li sistem en düşük yer değiştirme değerlerini vermektedir. Maksimum deplasmanlar ile alakalı daha bağlayıcı genel değerlendirmeler tartışma, sonuçlar ve öneriler bölümünde detaylı olarak verilmiştir.



	Çerçeve	Deprem Kirişli	Diyag. MÇ	Ters V MÇ	V MÇ	Diyag. DMÇ	Ters V DMÇ	V DMÇ
DGM	1561.58	1360.04	17.25	21.72	18.95	197.53	181.74	174.72
SKSM	265.92	235.97	81.55	85.55	83.35	125.87	124.29	123.18
ÖKSM	270.92	248.94	84.39	87.45	85.65	101.09	100.28	98.91

Şekil 42. Makas türleri x-yönü maksimum deplasman grafiği.



	Çerçeve	Deprem Kirişli	Diyag. MÇ	Ters V MÇ	V MÇ	Diyag. DMÇ	Ters V DMÇ	V DMÇ
DGM	51.47	63.78	75.65	100.85	78.67	177.18	187.84	258.05
SKSM	97.99	122.21	124.90	125.44	124.89	139.46	143.15	147.43
ÖKSM	95.37	123.16	127.26	129.83	128.58	140.98	146.12	149.98

Şekil 43. Makas türleri y-yönü maksimum deplasman grafiği.

4. Tartışma, Sonuçlar ve Öneriler

Yapılan bu çalışmada sadece kapasite tasarım değerleri sınır değer olarak tercih edilmiştir. Her taşıyıcı eleman türünün en az bir elemanının %80 kapasite değerine ulaşması, karşılaştırma için ön koşul olarak kabul edilmiştir. Diğer karşılaştırma parametreleri serbest bırakılmış ve sonuçlar buna göre gözlemlenmiştir.

Tablo 2'de yapılan analizler ve çalışmalar sonucunda dikkate alınan karşılaştırma kriterlerine göre elde edilen ideal örgü düzenlerinin ayrıntılarına yer verilmiştir. İdeal örgü düzeni olarak sunulan bu tablodaki veriler çapraz türlerinin sonuç değerleri üzerinden belirlenmiştir. Çerçeve ve deprem kirişli sistemler çalışma amacı doğrultusunda bu karşılaştırmaya dahil edilmemiştir.

Nihai sonuç değerlendirmeleri ise maddeler halinde aşağıda sunulmuş ve ayrıca önerilere de yer verilmiştir.

Tablo 2. Karşılaştırma kriterlerine göre elde edilen genel sonuçlar

İdeal Örgü Düzeni								
Ağırlık (ton)	Taban Kesme Kuvveti (kN)		Kolon Üst Noktası Ötelemesi (mm)		Tepe Noktası Ötelemesi (mm)		Maks. Deplasman (mm)	
	X maks	Y maks	X	Y	X	Y	X	Y
DGM	SKSM	SKSM	DGM	DGM	ÖKSM	DGM	DGM	DGM
V DMÇ	*V DMÇ*	*Ters V DMÇ*	*Diyagonal MÇ*	*V DMÇ*	*Diyagonal MÇ*	*V DMÇ*	*Diyagonal MÇ*	*Diyagonal MÇ*

- Sonuçlar değerlendirilirken en az bir taşıyıcı elemanın %80 kapasite değerine ulaşması ön koşul olarak kabul edilip diğer parametreler serbest bırakıldığından, yapısal davranışların incelenmesinin amaçlandığı bu çalışmanın bütün sınır değerleri sağlayan benzer çalışmalar ile doğrudan karşılaştırılması sağlıklı sonuçlar vermeyecektir.
- Çaprazsız yapıların genel olarak çok yüksek öteleme değerleri taşıdığı açıkça görülmüştür. Bu durumun çözümü ise çapraz stabilite elemanları ile örgü düzeni oluşturmaktır. Örgü düzenine sahip yapılarda öteleme değerlerinde %95 oranında azalma olduğu görülmüştür. Sonuç olarak çapraz elemanların yapılarda kullanılmasının çok önemli ve gerekli olduğu görülmüştür.
- Deprem kirişli yapıların öteleme ve taban kesme değerlerine bakıldığında, çerçeve sistemlere oranla %5 ile %10 arasında değişen miktarlarda daha avantajlı değerler ortaya çıktığı görülmektedir. Deprem kirişinin de çapraz elemanlar gibi stabilite açısından yapılarda gerekli bir eleman olduğu görülmüştür.
- Çaprazsız çerçeve sistemlerin, DMÇ'li ve MÇ'li sistemlere oranla daha düşük yapı ağırlığına sahip olduğu görülmektedir. DMÇ'li sistemlerin yapıya yaklaşık %5, MÇ'li sistemlerin ise yaklaşık %10 civarında ilave ağırlık getirdiği görülmüştür. Sonuç olarak stabiliteyi sağlamak için kullanılan elemanların yapı ağırlığındaki payı %5 ile %10 arasında değişmektedir.
- DGM tipinin diğer kafes sistem makas tiplerine oranla yaklaşık %15 daha az yapı ağırlığına sahip olduğu görülmüştür. DGM türü ile kafes sistem makas türlerinin birebir karşılaştırılması yapılacağından, kafes sistem makas türlerinde makaslar arası stabilite elemanları kullanılmamış ve oluşan öteleme değerleri gözlemlenmeye çalışılmıştır. Durum bu şekilde olduğundan kafes sistem makasların elemanları yüksek enkesitli profillerden oluşmuş ve yapı ağırlığı artmıştır.
- Taban kesme kuvvetlerinin oluşmasında yapı ağırlığı ve stabilite durumu en etkili iki parametredir. Yapılan bu çalışmada kafes sistem makas türlerinin ağırlıktan kaynaklı olarak taban kesme kuvvetlerinin de yüksek çıktığı görülmektedir. Fakat DMÇ'li sistemlerin kafes sistem makas türleriyle oluşturduğu stabilite uyumu sonucunda düşük taban kesme kuvvetleri ortaya çıkmıştır. Özellikle SKSM türünün V DMÇ'li sistem ile uyumu en düşük taban kesme kuvvetini oluşturmuştur. Sonuç olarak DGM türlerin MÇ'li sistemler ile, kafes sistem makas türlerin ise DMÇ'li sistemler ile uyumlu ve stabil çalışmakta olduğu görülmüştür. Ayrıca DÇM'li sistemlerin taban kesme kuvveti yönünden, MÇ'li sistemlere oranla yaklaşık %75 daha düşük sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Kolon üst noktası ötelemelerine bakıldığında deprem kirişli yapıların, çerçeve yapılara oranla %10 ile %15 arasında değişen değerlerde daha düşük öteleme değerleri verdiği görülmüştür. MÇ'li ve DMÇ'li sistemler karşılaştırıldığında, MÇ'li yapıların kolon üst ötelemeler konusunda yaklaşık %90 daha stabil değerler taşıdığı görülmüştür.
- Tepe noktası öteleme değerleri, kolon üst noktası öteleme değerlerine benzer bir durumda olup, kafes sistemler arasında farklılıklar görülmektedir. Tepe düğüm noktasında daha stabil olan ÖKSM türü, SKSM türüne göre %5 ile %30 arasında değişen değerlerde daha düşük öteleme miktarlarına ulaşmaktadır. Y-yönünde yapılarda oluşturulan herhangi bir çapraz düzeni bulunmadığından öteleme değerleri genel olarak ağırlık ile paralel ilerlemektedir. Bu durumun y-yönü kolon üst noktası ve tepe noktası ötelemeleri için geçerli olduğu görülmektedir.
- Deprem kuvvetlerinin oluşturduğu ötelemeler kolon üst noktası ve tepe noktası özelinde değerlendirilirken, dikkate alınan yük kombinasyonlarının oluşturduğu deplasman yapının tümü için değerlendirilmiştir. Maksimum deplasman değerlerine bakıldığında özellikle DGM türünün çaprazsız çerçeve sisteminin çok yüksek deplasman değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca taban kesme değerlerinde olduğu gibi maksimum deplasman değerlerinde de DGM türünün MÇ'li sistemler ile, kafes sistem makas türünün ise DMÇ'li sisemler ile uyumlu ve stabil çalışmakta olduğu görülmüştür.

- Ters V ve V çapraz türleri diyagonal çapraz türü ile karşılaştırıldığında, V çapraz türleri yapı ağırlığı ve taban kesme kuvvetleri yönünden avantaj sağlarken, ötelemeler ve maksimum deplasman açısından ise dezavantajlı sonuçlar vermektedir. Ters V ve V çapraz türlerinin verileri karşılaştırıldığında V çapraz türünün daha avantajlı sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür.
- DGM türünün kafes sistem makas türlerine göre yaklaşık %16 daha az yapı ağırlığına sahip olduğu görülmektedir. Düşük yapı ağırlığına sahip yapıların inşaat maliyeti yönünden avantajlı olduğu göz önüne alındığında, DGM türünün kafes sistem makaslara göre daha ekonomik çözümler sunabileceği sonucuna ulaşılmıştır.
- Genel olarak çapraz elemanların stabilite açısından yapıda çok önemli bir yeri olduğu, deprem kirişlerinin yapıda tam stabilite sağlanması için kullanılması gerektiği, MÇ'li sistemlerin ötelemeler açısından, DMÇ'li sistemlerin ise yapı ağırlığı ve taban kesme kuvvetleri açısından avantajlı sonuçlar verdiği, MÇ'li türler arasında diyagonal çapraz türünün, DMÇ'li sistemler arasında ise V çapraz türünün avantajlı sonuçlar verdiği ve bunlara ek olarak genel değerlendirme yapıldığında DGM türünün ve V DMÇ'li sisteminin verimli sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında tamamlanmış olan *"Hangar türü çelik sanayi yapısında farklı makas ve çapraz tiplerinin yapısal sistem üzerindeki etkilerinin incelenmesi*" başlıklı yüksek lisans tez çalışmasında yer alan sonuçların ve bulguların bir bölümünü kapsamaktadır.

Referanslar

AFAD. (2018). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. *https://www. tdth.afad.gov.tr*.

Akgönen, A. İ. (2017). Yüksek Sünek Merkezi Çaprazlı Çelik Çerçevelerin Yatay Yükler Altında Davranışının İncelenmesi. *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *20*(3), 16-23.

Alıcıoğlu, M. (2011). Merkezi Çelik Çaprazlı Yapılarda Uygun Çapraz Kesiti Geometrisinin ve Çapraz Türünün Belirlenmesi. *Sakarya Üniversitesi*.

Altan, Y. (2020). Merkezi ve Dışmerkez Çaprazlı Çelik Bina Yapılarında Deprem Performansının Belirlenmesi. *İstanbul Gelişim Üniversitesi.*

Arıbaş, S., Sancıoğlu, S. ve Çarbaş, S. (2019). Dışmerkez V Çaprazların Çelik Bir Yapı Üzerinde İncelenmesi. *KMÜ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi*, *1*(1), 79-97.

Bayram, B., Sancıoğlu, S. ve Çarbaş, S. (2019). Çelik Bir Yapıda Dışmerkez Diyagonal Çaprazların Etkisi. *KMÜ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi*, *1*, 128-145.

Can, M. (2008). Süneklik Düzeyi Yüksek Merkezi Çelik Çaprazlı Perdeler ile İlgili Tasarım Kurallarının Değerlendirilmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi*.

Civelek, O. (2010). Süneklik Düzeyi Yüksek Çok Katlı Bir Çelik Yapının Tasarımı. *İstanbul Teknik Üniversitesi*.

Çelik, B. (2003). Çelik Yapılarda Çaprazlı Çerçevelerin Süneklik Düzeyini Belirleyen Tasarım Kuralları. *İstanbul Teknik Üniversitesi*.

Çileli, E. (2008). Çok Katlı Çelik Yapılarda Çaprazlı Çerçeve Sistemlerin DBYBHY 2007'ye Göre Tasarımı ve Süneklilik Düzeylerinin Karşılaştırılması. *Sakarya Üniversitesi*.

ÇYTHYDE (2018). Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ankara.

Eşsiz, Ö. (2005). Deprem Bölgelerindeki Yapılarda Çelik Çapraz Çerçeve Sistemlerinin Avantajları. *Deprem Sempozyumu, Kocaeli*, 665-667.

Karataş, R. (2022). Farklı Çapraz Tipine Sahip Çok Katlı Çelik Yapıların Analizi. *Konya Teknik Üniversitesi*.

Kocabaş, S. (2005). Çelik Yapıların SAP2000 Programı ile Analiz ve Tasarımı. *Çukurova Üniversitesi*.

Korkmaz, K. A. (2007). Çelik Çapraz Elemanlarla Güçlendirilen Betonarme Yapıların Deprem Davranışlarının İncelenmesi. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, *8*(2), 191-201.

Kumar, M., Raj, V. S., Babu, S. ve Sundararajan, S. (2020). Inelastic Behaviour of Braced Steel Framed Structure by Pushover Analysis. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, *9*(1), 1876-1879.

Kural, M. ve Zeybek, Ö. (2011). Merkezi Çelik Çaprazla Teşkil Edilmiş Çok Katlı Çelik Yapıların İkinci Mertebe Analizi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1-14.

Lekesiz, İ. (2016). Tipik Bir Çelik Endüstri Yapısında Çaprazlı Perde Tipinin Deprem Performansına Etkisinin İncelenmesi. *Balıkesir Üniversitesi*.

Mungan, Ö. (2009). Tek Açıklıklı Endüstri Yapılarında Çelik Taşıyıcı Sistemlerin Karşılaştırılması. *İstanbul Teknik Üniversitesi*.

Nayak, B., Kamath, K. ve Avinash, A. (2018). Pushover Analysis Of Three Dimensional Steel Braced Structure With Varyıng Bracing Heights. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, *9*(4), 265-274.

Özcihan, B. (2001). Merkezi ve Dışmerkez Çaprazlı Çelik Yapı Sistemlerinde Lineer Olmayan Davranışın İncelenmesi ve Süneklik Düzeyinin Belirlenmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi*.

Putra, Z. ve Tarigan, J. (2019). Performance Analysis of Steel Portal Structures with Braces Designed Based on Allowable Interstory Drift Limits. *Simetrikal Journal of Engineering and Technology*, *01*(02), 87-102.

Sancıoğlu, S. ve Çarbaş, S. (2021). Merkezi Çelik Çaprazların Bir Çelik Yapı Üzerinde İncelenmesi. *1st International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences*, 558-565.

Sancıoğlu, Sadrettin, Arıbaş, S., Bayram, B., Şimşek, M. ve Çarbaş, S. (2019). Çelik Bir Binada Kullanılan Çapraz Tiplerinin Deprem Etkisi Altında Analizi.

SAP2000. (2021). Structural Software for Analysis and Design.

Şeker, S., Tunç, Ö., Börekçi, D. ve Göktaş, B. (2021). Dışmerkez Çelik Çaprazların Yapılar Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi*, *2021*(2), 172-181. doi:10.47137/usufedbid.991094

TBDY (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.

TS EN 1991-1-3 (2007). Yapılar Üzerindeki Etkiler-Bölüm 1-3: Genel Etkiler-Kar Yükleri (Eurocode 1). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1991-1-4 (2007). Yapılar Üzerindeki Etkiler-Bölüm 1-4: Genel Etkiler-Rüzgâr Yükleri (Eurocode 1). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Türk, B. (2016). Merkezi Çelik Çaprazlı Çerçeve Taşıyıcı Sistemin Tasarım Kurallarının ve Performansının Değerlendirilmesi. *İstanbul teknik Üniversitesi*.

Yanık, E. (2019). Çelik Taşıyıcı Sistemlerde Kullanılan Çaprazların Yapı Davranışı Üzerine Etkilerinin Araştırılması.

Yıldızhan Sağer, B. (2021). Moment Aktaran ve Merkezi Çaprazlı Çok Katlı Çelik Yapıların 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre Analizi ve Tasarımı. *Çukurova Üniversitesi, Adana.*

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

UMAGD, (2023) 15(3), s234-s249.

10.29137/umagd.1323771

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:3 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue

Derleme Makalesi / Review Article

Beton Esaslı Prefabrike Cephe Panellerinin Tarihsel Gelişiminin Farklı Ülkelerdeki Örnekler Üzerinden Değerlendirilmesi

Evaluation of the Historical Development of Concrete Based Prefabricated Facade Panels through Examples from Different Countries

Mediha Gültek[1], Güneş Mutlu Avinç [2], Pelin Sarıcıoğlu [1], Aslı Yıldız*[3]

[1] Gazi Universitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, 06000, Ankara, TURKIYE
[2] Muş Alparslan Üniversitesi, 49100, Muş, TÜRKİYE
[3] Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, 50040, Nevşehir, TÜRKİYE

***Başvuru/Received**: 06/07/2023 **Kabul / Accepted**: 25/10/2023 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Öz

Prefabrike sistemler, düşük maliyet, hızlı üretim, kaynakların rasyonel kullanımı gibi sunduğu olanaklar ile yapım süreçlerinde sıklıkla uygulanmaktadır. Bu sistemler kullanılarak bir yapının kolon, döşeme, duvar, cephe yüzeyi gibi pek çok bileşeni üretilebilmektedir. Bu araştırmada iç ve dış faktörlere bağlı olarak şekillendikleri için beton esaslı cephe panellerine odaklanılmıştır. Bu bağlamda ilk olarak prefabrike sistemlerin tarihsel süreç içerisindeki gelişimi ortaya konulmuştur. Daha sonra beton esaslı panellerin özellikleri, bileşenleri ve teknik detayları sunulmuştur. Bu çerçevede mimari proje bilgilerini içeren web sayfaları taranmış ve bu panellerin kullanıldığı dokuz (9) adet yapı belirlenmiştir. Yapıların belirlenmesinde panel kullanımı açısından yenilikler sunan, sürdürülebilir, özgün form ve kurguya sahip ve teknolojik açıdan gelişmiş yapılar tercih edilmiştir. Yapılara ait değerlendirmeler bir tablo içerisinde özetlenmiştir. Sonuç olarak, tekstil, cam, karbon gibi malzemelerin beton ile birlikte kullanımının yenilikçi prefabrik cephe elemanlarını ortaya çıkardığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

Prefabrikasyon, Prefabrike sistem, Prefabrike beton panel sistem, Cephe panel sistemi

Abstract

Prefabricated systems are frequently applied in construction processes with the opportunities they offer such as low cost, fast production and rational use of resources. Many components of a building such as columns, slabs, walls, facade surfaces can be produced using these systems. In this research, the focus is on concrete based façade panels as they are shaped depending on internal and external factors. In this context, firstly, the development of prefabricated systems in the historical process is presented.Then, information about the properties, components and technical details of concrete based panels are given. Web pages containing information about architectural projects were scanned and nine (9) buildings using these panels were identified. In the study, buildings that offer innovations in terms of panel use, sustainable, having unique form and technologically advanced are preferred. The evaluations of the buildings are summarized in a table. As a result, it has been determined that the use of materials such as textiles, glass and carbon together with concrete creates innovative prefabricated facade elements.

Key Words

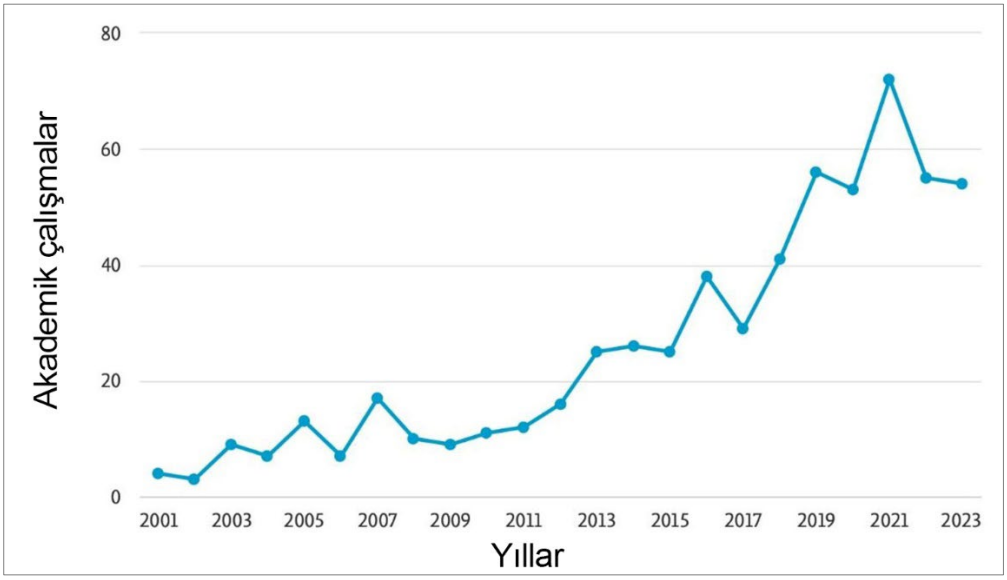
Prefabrication, Prefabricated system, Prefabricated concrete panel system, Facade panel system

Sorumlu Yazar: aslydz@gmail.com.tr

1. Giriş

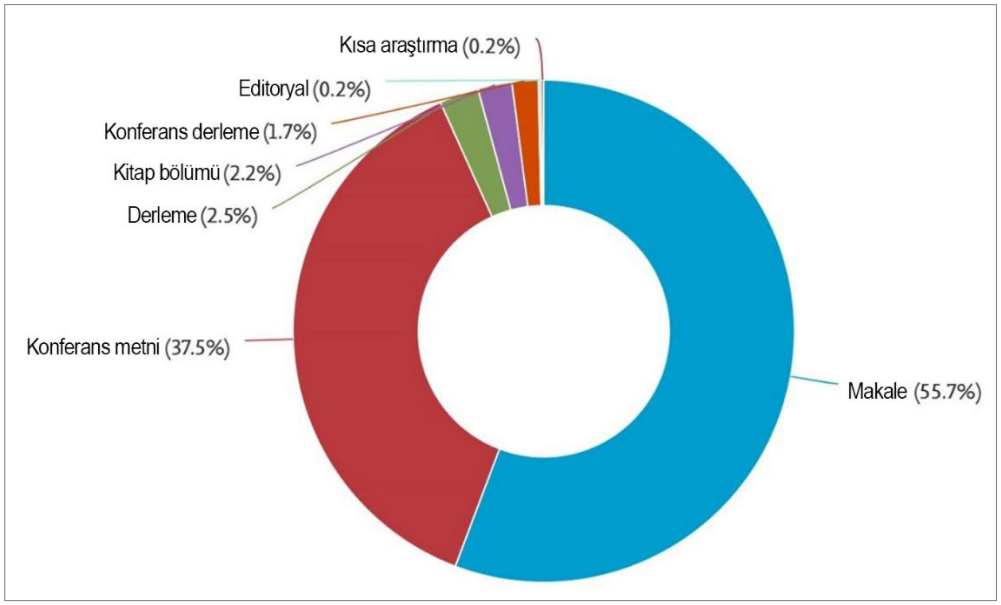
Betonarmenin kullanım alanlarının geniş olması, yük taşıma kapasitesi ve dayanıklılığının yanı sıra üretim kolaylığı, betonarmeyi 20. ve 21. yüzyılın başlarında en çok kullanılan yapı malzemesi durumuna getirmiştir (Roik vd., 2022). Betonarmenin kullanıldığı sistemlerden biri de prefabrik beton yapılardır. Prefabrikasyon kavramı; duvar panelleri, kapılar, pencereler, çatı makasları, dolaplar, merdivenler ve hatta tüm bina parçaları gibi bitmiş veya yarı bitmiş yapısal bileşenlerin birleştirilmesi ve tasarlanması için üretim sahasından veya fabrikadan şantiyeye kadar üretilmesi ya da önceden monte edilmesi sürecini ifade etmektedir (Nirmalkumar vd., 2021:111). Prefabrik beton yapı sistemleri inşa süresinin kısalığı, işgücü ihtiyacının az olması ve sahadaki işlerin en aza indirilmesi gibi avantajlarıyla giderek daha popüler hale gelmektedir (Gunawardena & Mendis 2022). Kullanım avantajlarının fark edilmesiyle beraber kullanım oranı giderek artan prefabrik sistemlerin ortaya çıkması betonun kullanılmaya başlandığı zamanlara dayanmaktadır. İkinci sanayi devrimi ile gelişen teknoloji ve etkili olan dış faktörlerle beraber betonarmenin kullanılmaya başlanması ve duvarların taşıyıcı olmaktan çıkmasıyla iskelet sisteme geçilmiş ve inşaat sektöründe yeni bir dönem başlamıştır. Dönemin getirdiği zorunluluklar (savaş, konut ihtiyacı, gelişmeye başlayan teknoloji) hızlı ve pratik çözümler bulmayı teşvik etmesi sebebiyle 1800'lü yılların ortasında başlayan teknolojik ilerlemelerin malzemeye yansıması sonucunda 1900'lü yıllara gelindiğinde prefabrikasyonun ilk adımları atılmıştır. İlk olarak prefabrik elemanların üretimi ile başlayan prefabrikasyonun gelişimi, bir yapının tüm elemanlarıyla beraber şantiyede üretimi ile devam etmiştir. Sonraki süreçlerde Avrupa'da büyük inşaat şirketleri tarafından prefabrikasyon kullanımının teşvik edilmesiyle beraber tüm dünyada ve ülkemizde prefabrikasyon kullanım oranı artmaya başlamıştır (Seitablaiev ve Umaroğulları, 2020).

İnşaat malzemeleri ve teknolojisinde yaşanan ilerleme, minimum malzeme kullanımı, hafiflik ve ek ekonomik faydalar özelliklerini bir araya getirerek prefabrikasyonda verimli ve sürdürülebilir yapısal sistemlere yönelik araştırmalara yol açmıştır (Venigalla vd., 2022). Bunu başarmak için araştırmacılar, prefabrike beton içerisine tekstil, cam elyaf, karbon fiber gibi malzemeler katarak betonun esneklik, süneklik, dayanım, çatlak oluşumunu önleyerek ince duvarlar ve malzeme tasarrufu gibi yenilikçi sonuçlar doğurmuştur. Bununla birlikte son yıllarda literatürde prefabrik beton sistemler üzerine yürütülen araştırmalar artmaya başlamıştır. Bu bağlamda Scopus veri tabanında "prefabricated AND concrete AND panel" anahtar kelimeleri ile bir arama gerçekleştirilmiştir. Arama 2000-2023 yılları arasında sınırlandırılmıştır. Yapılan araştırma sonucunda farklı alanlarda gerçekleştirilen toplam 592 çalışmaya ulaşılmıştır. Bu çalışmalar yıl, alan ve doküman kategorisine göre analiz edilmiştir. Bu kapsamda 592 makalenin yıllara göre hazırlanan grafiği Şekil 1'de sunulmuştur. Bu grafiğe göre 2015 yılından sonra çalışmaların sayısında artış gözlemlenmiştir.



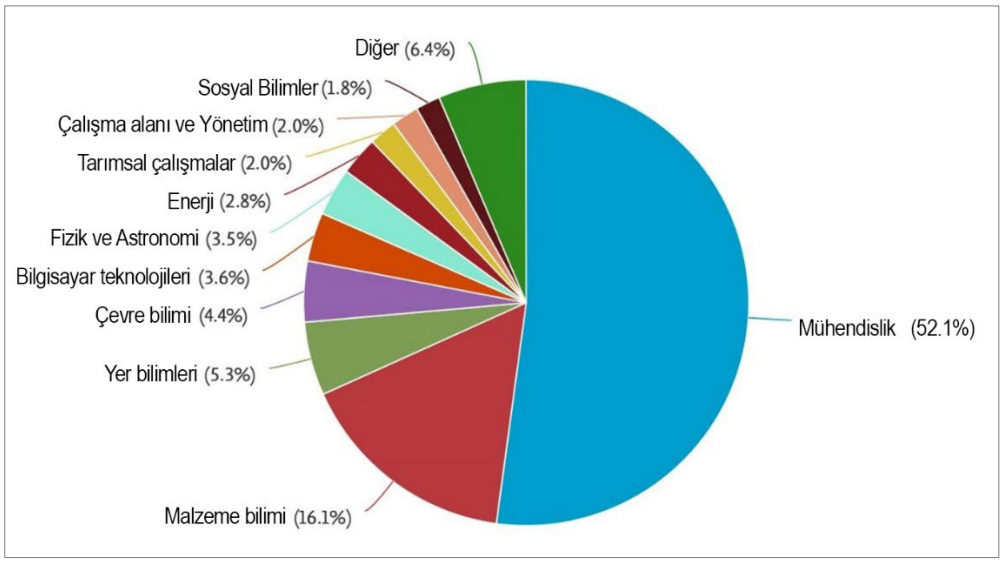
Şekil 1. Yıllara göre yayınlanmış çalışmalar

Yapılan araştırma sonucunda ulaşılan 592 çalışmanın 330'unu makaleler, 222'sini konferans çalışması ve 15 tanesini de derleme makalenin oluşturduğu görülmektedir. Bu veriler Şekil 2'de yer alan grafikte sunulmuştur.



Şekil 2. Ulaşılan çalışmalara ait araştırma kategorileri

Arama sonucunda elde edilen makalelerin ilişkili olduğu çalışma alanları Şekil 3'te sunulmuştur. Bu alanda en çok çalışmanın mühendislik, malzeme bilimi, yer bilimleri ve çevre bilimlerinde olduğu saptanmıştır.



Şekil 3. Ulaşılan çalışmalara ait araştırma alanları

Bunun yanısıra ülkemizde yürütülmüş konuyla ilgili çalışmalar incelendiğinde; Dağ ve diğ. (2022) depreme dayanıklı prefabrik betonarme yapıların mimari tasarım gereksinimlerini belirlemiş ve taşıyıcı sistem yaklaşımlarını ortaya koymuş. Bunun için prefabrik yapılar üzerindeki deprem etkisi özetlenmiş. Prefabrik beton yapıların depreme dayanıklılığına katkı sağlayacak mimari tasarım ilkeleri ortaya konulmuştur. Baş ve Vural (2019) ise beton panel sistemlerin konut üretimindeki kullanımını araştırmış ve kullanılabilecek panellerin kullanıldığı bir rehber hazırlamıştır. Seitablaiev ve Umaroğulları (2020) betonarme prefabrikasyonun dünyadaki ve Türkiye'deki durumunu ortaya koyarak, prefabrikasyonun gelişimine yönelik değerlendirmeler yapmıştır. Kahveci (2019) ise beton bünyeli prefabrike sistemlerdeki düğüm noktalarını incelemiş ve sınıflandırmıştır. Esin ve Coşgun (2004) çalışmalarında betonarme yapım sistemlerin üretim aşamalarının çevrede yarattığı etkileri analiz ederek, ekolojik açıdan değerlendirmişlerdir. Bu bağlamda çalışmanın diğer çalışmalardan farkı, ülkemizdeki prefabrik cephe panellerinin kullanımının yaygınlaşması için, farklı ülkelerdeki örnekleri sunarak panellerin tasarımsal olanaklarını göstermektir. Buradan hareketle araştırmanın örnek yapılar aracılığıyla tasarımcılar ve konunun diğer muhatapları için bir referans sunması amaçlanmaktadır. Çalışma içeriğinde ilk olarak prefabrikasyonun tarihinden başlanarak gelişen sistemler günümüze kadar ele alınmıştır. Sonrasında çalışmanın odağı olan beton esaslı prefabrike cephe panelleri üzerine odaklanılmıştır. Farklı ülkelerdeki yapılara ait beton cephe panellerinin sistemsel detayları incelenerek bir tablo ile sunulmuştur.

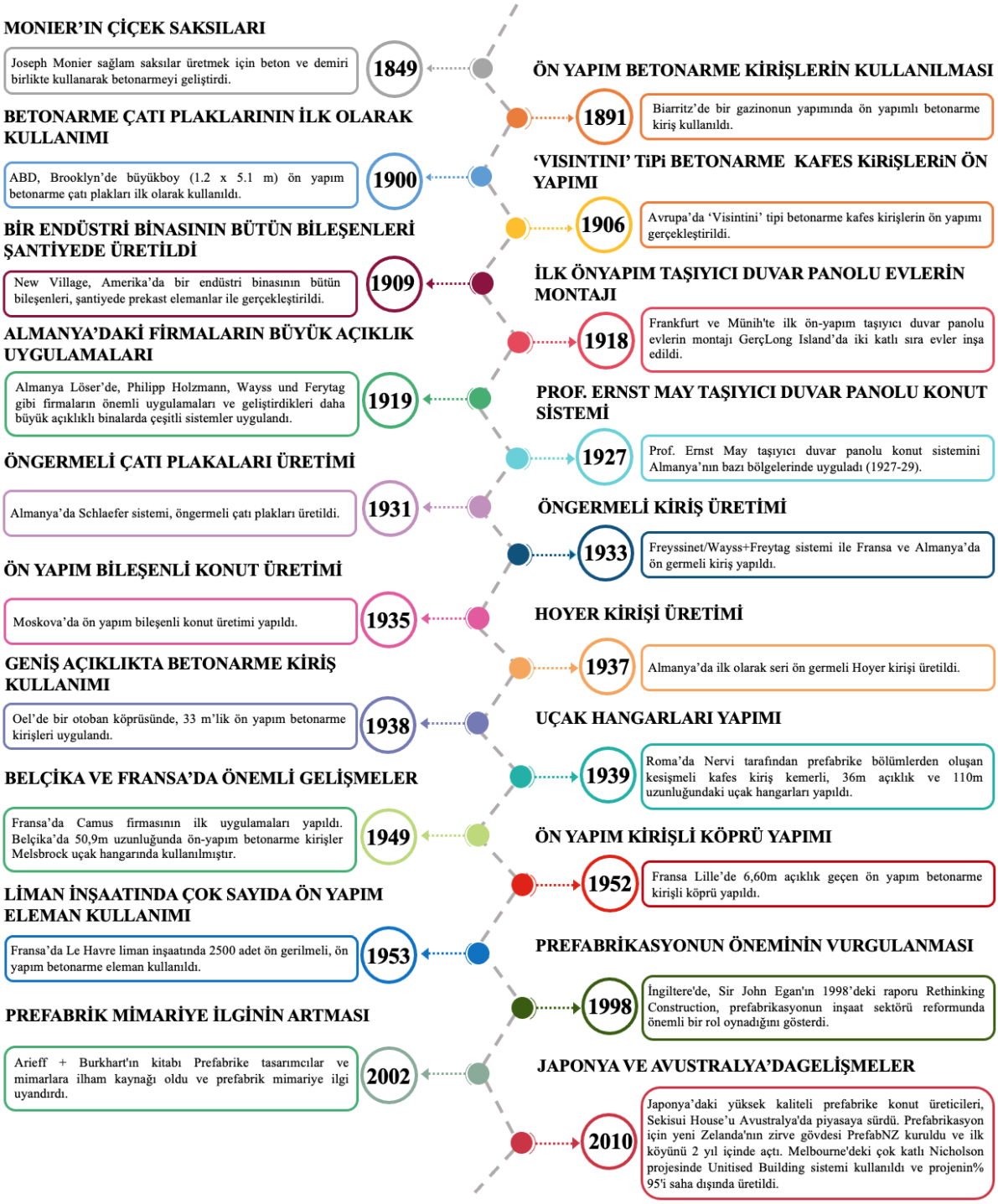
1. Kavramsal Çerçeve

1.1. Prefabrikasyonun Tarihi

Dünyanın endüstri çağına girmesiyle beraber yapı sektöründe de endüstrileşme yönünde bir gelişme olmuştur. Bu bağlamda yapıda ön üretim, ön yapım ya da prefabrike betonarme sistemler yapım sektöründeki endüstrileşmenin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Prefabrikasyon, bina bölümlerinin büyük bir kısmının veya tümünün atölye veya fabrikalarda, endüstriyel yöntemlerle üretilmesini öngören bir yapım sistemidir (Gültek, 2012). Beton prefabrike sistemlerin tarihçesi betonun ilk bulunduğu yıllara dayanmaktadır. Betonun ilk çıkış tarihi ise yaklaşık 2.000 yıl öncesine, antik Roma'ya kadar uzanmaktadır. Kireçtaşı, volkanik kül ve deniz suyundan oluşan ve "Roma Betonu" olarak adlandırılan bu karışım su kemerlerinin, otoyolların ve tapınakların inşasına olanak sağlamıştır (Souza, 2019).

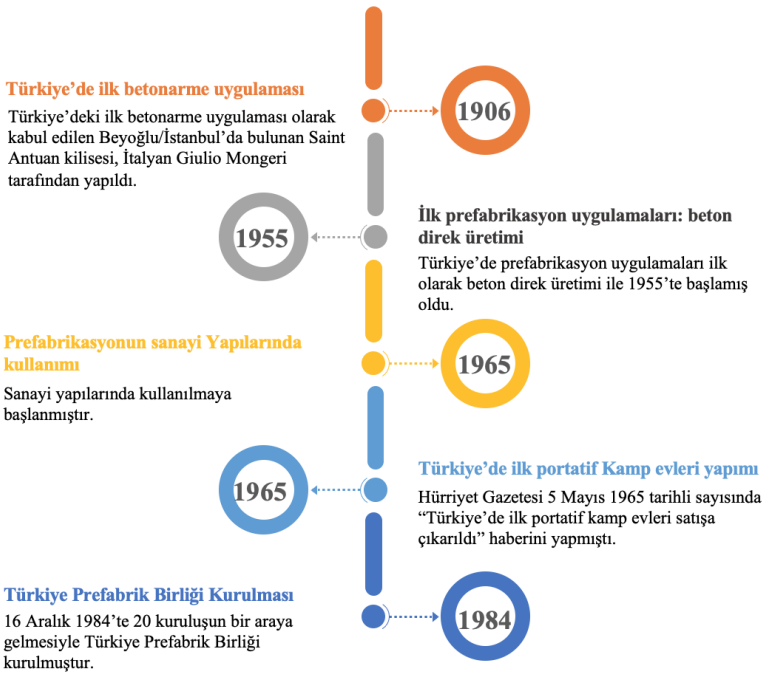
1849 yılında bir bahçıvan olan Joseph Monier tarafından betonarmenin geliştirilmesi modern yapı üretimi için bir dönüm noktası olmuştur. Bu şekilde iskelet sisteme geçilerek, duvarlar taşıyıcı olmaktan çıkmıştır (Güvenli, 2006). Sonrasında 1900'lü yıllarda betonarme döşeme plakları, kirişler gibi betonarme prefabrik elemanların üretimi başlamıştır. Prefabrikasyonun Dünya'daki gelişim aşamalarına bakıldığında, İngiltere Liverpool'da J. A. Brodie tarafından inşa edilen ilk prefabrike panelli binanın yapım yılı 1905 olarak bilinmektedir. Dünya'da prefabrike binaların yaygınlaşması ve popülarite kazanması İskandinav ve Doğu Avrupa ülkeleri aracılığıyla olmuştur (Hamid, 2017). Endüstrileşmeye doğru etkin adımlar ise ancak 1920'lere doğru atılmıştır. Le Corbusier, Gropius, Mies Van Der Rohe gibi mimarlar yapılarında prefabrike yöntemler kullanmaya başlamıştır. Bunlardan dikkat çekenlerden biri de Le Corbusier' in Dom-Ino (1914) sistemidir. Bu projede Le Corbusier ilk kez endüstrileşmiş şantiye yöntemini kullanmıştır (Ayazoğlu, 2003). Sonraki süreçte 1935'e gelindiğinde bir konut yapısına ait tüm elemanların şantiyede üretimi gerçekleşmiştir. Aynı zamanda prefabrik elemanlar geniş açıklık geçilen hangar gibi endüstri ve sanayi yapılarında da bu dönemde etkin olarak kullanılmıştır. 1950'lere gelindiğinde prefabrik yöntemlerin kullanımı artmakla beraber önemi, kullanım kolaylığı ve avantajları daha iyi anlaşılmış ve bu alanda büyük inşaat şirketlerinin yatırımları artmaya başlamıştır. İkinci Dünya savaşı sonrasında yıkılan binlerce konut ve evsiz kalan milyonlarca insanın konut ihtiyacını karşılayabilmek için çok hızlı bir yapım tekniğinin geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Bunun yanında teknik alanda yaşanan gelişmeler çeşitli olanaklar sunmaya başlamıştır. Bütün bu sürecin sonucu olarak da yapıda "prefabrikasyon" çağı başlamıştır (Gültek, 2012). Şekil 4'de yer alan Dünyadaki prefabrikasyonun tarihi oluşturulan zaman çizelgesinde görülmektedir (Seitablaiev ve Sev, 2018). Bu dönemde parasal kaynakların artması ve inşaat sektöründeki gelişmeler sebebiyle yapılarda endüstrileşme durumu kırsal alanlara da yayılmıştır (Gibb, 1999). Sonuç olarak prefabrikasyonun gelişimini hızlandıran dış etkenler şu şekilde özetlenmektedir:

- Binalar veya tesisler için zaman zaman ortaya çıkan acil talepler, örneğin İngiliz sömürgeciliği ve ardından gelen hızlı Avrupa tarzı konut ihtiyacı,
- 1980'lerin sonunda Londra'da hızlı ticari gelişmeye neden olan iş uygulamasındaki değişiklikler,
- Deprem gibi doğal afetlere hızlı müdahale edebilme ihtiyacı,
- Gelişmiş dünyadaki sanayi devrimi hem üretim kabiliyetlerini hem de sanayileşmiş ürünlerin tercih edilebilirliğine ilişkin kamu algısının değişmesi,
- Diğer sektörlerdeki teknoloji ilerlemeleri ile teknoloji transferi arzusu,
- İşgücü maliyetlerindeki artış, işgücü kullanımını ve verimliliği optimize etme arzusunu arttırması,
- İş sahasındaki vasıflı işgücünün azalması, üretim tesisinde istikrarlı bir vasıflı işgücüne ihtiyaç duyulması,
- Değişen müşteri beklentileri, örneğin proje sonuçlarında daha fazla öngörülebilirlik isteği,
- Çalışanların sağlık ve güvenliğine yönelik artan endişeler ile tehlikeli saha çalışmalarını azaltma isteği (Gibb, 1999).



Şekil 4. Prefabrikasyonun Tarihsel Gelişimi Zaman Çizelgesi (Seitablaiev ve Sev, 2018; Ayazoğlu, 2003'ten Uyarlanarak Yazarlar Tarafından Oluşturulmuştur)

Beton prefabrikasyonun ülkemizde kullanımı 1960'lı yıllara denk gelmektedir. 1968-1972 yılları arasında prefabrik yapı inşaatlarına beş yıllık kalkınma programında yer verilmiştir. İlk portatif kamp evleri 1965 yılında yapılmıştır (Hürriyet Gazetesi, 5 Mayıs 1965). Fakat prefabrikasyonun istihdamı olumsuz yönde etkileyeceği görüşünden ötürü yeterli destek ve ilgi sağlanamamıştır (URL-7). 1965 yılından sonra ise sanayi yapılarında kullanılmaya başlanmıştır. 16 Aralık 1984'te, 20 kuruluşun bir araya gelmesiyle beraber Türkiye Prefabrik Birliği kurulmuştur. Birliğin amacı prefabrik yapılarda gerekli kalite koşullarını ve denetimini sağlamaktır (Amani ve Niyazi, 2018). Deprem açısından risk taşıyan ülkemizde 1980'lerden itibaren prefabrik yapılara verilen önem artmaya başlamıştır. 1990'lı yıllardan sonra ise ülkemizde yapılan endüstri yapılarının büyük bölümü prefabrik olarak inşa edilmiştir (Hamid, 2017). Tüm bu gelişmeler Şekil 5'te yer alan Türkiye için prefabrikasyon zaman çizelgesinde görülmektedir.



Şekil 5. Prefabrikasyonun Tarihsel Gelişimi Zaman Çizelgesi (Seitablaiev ve Sev, 2018; URL-8'den Uyarlanarak Yazarlar Tarafından Oluşturulmuştur)

Dünya'da prefabrikasyonun en gelişmiş olduğu ülkeler %45 ile Danimarka ve %40 oranla Hollanda olarak bilinmektedir. Bu ülkelerde sağlık, yurt, ofis ve endüstri yapıları prefabrik sistemlerin uygulandığı yapı türleri olarak öne çıkmaktadır. Almanya'da konut piyasasında ortalama olarak %8-9 oranında prefabrike sistemler kullanılmaktadır. Hollanda'da bu oran %20'ye çıkmakta ve ahşap-betonarme sistemler ile birlikte kullanılmaktadır. Japonya'da konut sektöründe prefabrikasyon kullanım oranı %12-16 arasındadır. Avustralya'da kayıtlı veriler incelendiğinde prefabrikasyon kullanımı %3 seviyesindedir. ABD'de ise genel olarak modül ya da panel sistemler tercih edilmektedir (Amani ve Niyazi, 2018). Türkiye'deki duruma bakıldığında ise prefabrike sistemlerin ağırlıklı olarak %85 oranında endüstri yapılarında kullanılmaktadır. Ülkemizde prefabrik yapılarda strüktürel sistem açısından da panel ve hücre sistemler az kullanılırken, iskelet ve çubuk sistemler daha yaygın olarak tercih edilmektedir (Seitablaiev ve Umaroğulları, 2020). Bölgesel açıdan prefabrik yapıların kullanımı değerlendirildiğinde sırasıyla Marmara Bölgesi (%46), İç Anadolu (%26), Ege-Batı Akdeniz (%20), Doğu Akdeniz-Karadeniz (%3) ve Doğu-Güneydoğu Anadolu Bölgeleri izlemektedir (Amani ve Niyazi, 2018).

1.2. Beton Esaslı Prefabrike Cephe Panelleri

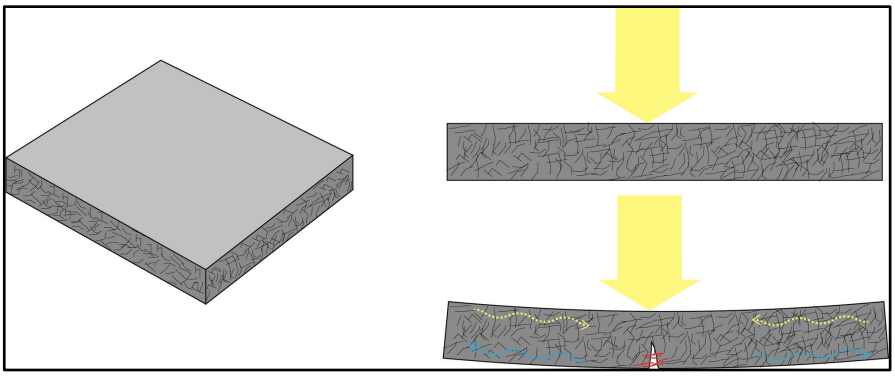
Prefabrikasyonda çerçeve sistemler, panel sistemler ve hücre sistemler olmak üzere üç tip sistem bulunmaktadır (Harris, vd., 2021). Hücre sistemler, paneller ile döşemelerin bir araya gelerek oluşturdukları sürekli sistemlerdir (Baghchesaraei, Kaptan & Baghchesaraei, 2015). Bu sistemde hücreler hem hacmi tanımlamakta hem de taşıyıcı fonksiyon üstlenmektedir. İskelet sistemler, yüzeyleri oluşturan elemanlarla taşıyıcı elemanların birbirinden ayrılmış olduğu sistemlerdir. Yapıdaki yükler iskelet sistem aracılığıyla temele aktarılmaktadır. İskelet sistemin oluşturduğu yüzeyler taşıyıcı olmayan panellerle kapatılmaktadır. Panel sistemlerde ise yapıyı oluşturan sistem elemanları duvar olarak kullanılan düşey paneller ile döşemeleri şekillendiren yatay panellerdir. Düşey paneller yapının iç ve dış kısımlarında kullanılmaktadır (Gunawardena & Mendis 2022). Çalışmada hem dış hem de iç faktörlere bağlı olarak şekillendikleri için cephe panellerine odaklanılmıştır.

Prefabrik cephe panellerinin üretiminde ahşap, beton, cam gibi çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Beton diğer malzemelere göre panel üretiminde ön plana çıkmaktadır. Betonun diğer malzemelere göre statik, termik ve konstrüktif ihtiyaçlara daha iyi cevap verebilmesi malzemenin tercih edilirliğinde etkili olmaktadır (Ayazoğlu, 2003).

Beton esaslı prefabrik cephe panellerinin üretim aşamalarına bakıldığında ise; hem fabrikalarda hem de yerinde özel imalat olarak şantiyelerde üretilmektedirler. Fabrikada üretilen paneller, gerekli nakliye tedbirleri alınarak şantiyelerde vinçler aracılığıyla yapıya monte edilirler. Paneller hem birbirlerine hem de yapıya monte edilecek şekilde önceden detaylandırılmaktadır. Beton paneller hem iç mekanlarda hem de cephelerde kullanılmaktadır. Cephelerde taşıyıcı sistem malzemesi olarak kullanılabildikleri gibi sadece yüzey kapatmak için de tercih edilmektedir. Cephelerde taşıyıcı olarak kullanıldıklarında demir donatılar da sisteme eklenmektedir. Genellikle yüzey alanları 1 m2 den büyük olan bu birimler bir araya gelerek bütün bir cepheyi oluşturmaktadır (Altınay, 2011).

Beton esaslı prefabrik cephe panellerinin içeriğine bakıldığında ise; beton, ısı yalıtımı, çerçeve sistem, bağlantı elemanları ile sızdırmazlık ve dayanım için çeşitli kimyasal takviyelerden oluşmaktadırlar. Paneller arasında ısı yalıtımı amacıyla taş yünü, cam yünü, XPS, EPS gibi malzemeler kullanılabileceği gibi gazbeton ve köpük beton da kullanılmaktadır. Çelik çerçeve sistem ve bağlantı elemanları ise cephe panellerinde panelin özgül ağırlığını taşımak ve panele gelen yükü binaya aktarmak için kullanılmaktadır. Panellerin çerçeve sistemi C ve/veya U profillerden meydana gelmektedir. Üretim aşamasında ise panele özel bağlantı elemanları ile cepheye monte edilmektedir. Bağlantı elemanları dış ortamda yağmur suyu, rüzgâr geçirimsizliği, ısı yalıtımı gibi görevleri üstlenirken, iç mekânda kalan bileşenler ise konstrüktif bağlantıyı sağlamaktadır (Dikici ve Kocagül, 2019).

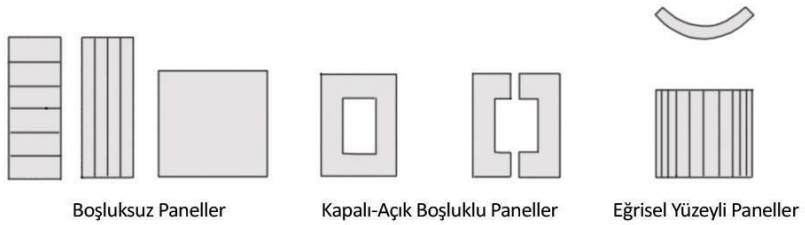
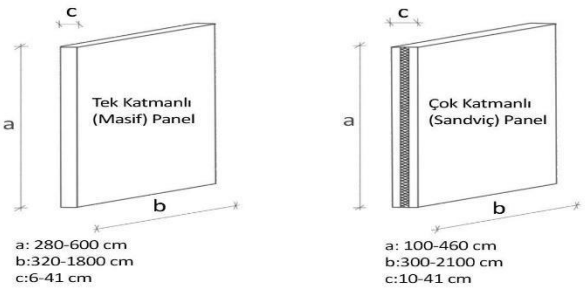
Geçmişte beton esaslı panellerin üretiminde yalnızca çimento kullanılırken günümüzde ise cam elyafı ya da karbon fiber elyaf gibi takviyelerle sistemler geliştirilmektedir. Elyaf ve tekstil katkılı betonlar; çimento, agrega, su ve kimyasal özel katkılar eklenerek oluşturulan bir malzemedir. Yüksek dayanıma sahip elyaf; esnek, hafif ve düşük maliyetli ince cam veya plastik esaslı tellerden üretilmektedir (Yıldız vd., 2018). Ayrıca elyaf malzemenin ana özelliklerinden biri olan plastisite, cephe panellerinin mimari tasarıma tam olarak uyacak şekilde kalıplanmasını sağlayarak daha ince ve dolayısıyla daha hafif parçaların üretilmesine olanak tanımaktadır. Cam elyaf takviyeli beton ise, çimento, agrega, su, kimyasal katkı maddeleri ve alkaliye dayanıklı cam elyafların bir karışımıdır. Karbon fiber (*Carbon fiber-reinforced*) elyaf takviyeli malzeme de güçlendirilmiş beton, beton ve karbon lifleri veya çubuklarından üretilen bir yapı malzemesidir. Karbon, betonun katmanları arasına yerleştirilen ağ benzeri tekstil hasırlar aracılığıyla ya da beton boyunca rastgele veya eşit şekilde dağılmış lifler olarak betona dahil edilmektedir. Bu sayede karbon elyaf, betonun çekme mukavemetini büyük ölçüde artırmaktadır (URL-9). Yapı dış yüklerden, sıcaklık veya nem değişikliklerinden kaynaklanan yüksek gerilime maruz kaldığında, içinden geçen lifler çatlakların genişlemesini önleyen yapısal mikro takviyeler oluşturmaktadır. Sonuç olarak, lifler normalde düşük direnç gösteren beton ve harçların çekme ve kayma gerilimi altındaki performansını önemli ölçüde artırmaktadır (Şekil 6) (Souza, 2019).



Şekil 6. Lifli Beton Direnci (Souza, 2019)

Cephe panelleri taşıyıcılıklarına, kesitteki katmanlarına, genişliklerine, yüksekliklerine, boyutlarına, biçimsel farklılıklarına ve taşıyıcılık özelliklerine göre çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır (Göçer, 2005). Katmanlarına göre paneller tek katmanlı, çift katmanlı veya çok katmanlı olarak adlandırıldıkları gibi masif veya sandviç paneller olarak da sınıflandırılmaktadır. Masif paneller, tek bir katmandan oluşan hazır paneller olarak tanımlanmaktadır. Sandviç paneller ise iki beton tabakanın arasına yerleştirilen bir ısı yalıtım tabakasından oluşan panellerdir. Taşıyıcılık özelliklerine göre paneller taşıyıcı olan, kendini taşıyan veya taşınan paneller olarak sınıflandırılmaktadır. Panelin taşıyıcılık özelliğine göre üretim detayları ve bağlantı biçimleri değişmektedir. Üretim biçimlerine göre de özel üretim paneller veya seri üretimli paneller olarak ikiye ayrılmaktadır. Panellerin sınıflandırılmasında biçimsel farklılıklar da belirleyici olmaktadır. Boşluklu (yekpare), açık, kapalı boşluklu ve eğrisel yüzeyli gibi çeşitli biçimlerde paneller bulunmaktadır. Ayrıca boyutsal farklılıklarına göre de paneller değişmektedir. Kat yüksekliğinden küçük olan paneller, kat yüksekliğinde veya birkaç kat yüksekliğinde paneller ile parapet panelleri olarak piyasada değişik boyutlarda paneller mevcuttur (Gibb, 1999). Beton esaslı prefabrik cephe panelleri kullanım amaçlarına göre de farklı ebatlarda üretilmektedir. Panellerin kalınlıkları yalıtım kullanılıp kullanılmamasına bağlı olarak değişmekle birlikte genellikle 6 ila 41 cm arasındadır. Panellerin uzunlukları ise tek katmanlı-masif panellerde 18 metreye kadar çıkabilirken, çok katmanlı-sandviç panellerde 21 metreye kadar üretilebilmektedir. Yükseklik olarak ise tek katmanlı-masif paneller 6 metre, çok katmanlı-sandviç paneller ise 4,6 metre yüksekliğe erişmektedir (Tablo 1) (Van de Voorde vd., 2015).

Tablo 1. Beton Esaslı Prefabrik Cephe Panellerinde Malzeme Birleşim Detayları (Gibb, 1999)

a	Panellerde biçimsel farklılıklar	
b	Katmanlarına Göre Panellerin Boyutları	

Buraya kadar ele alınan beton panel özellikleri farklı ülkelerden seçilen örneklerin analizlerinde kullanılmıştır. İncelenen örnekler ile beton panel kullanımının çeşitli kullanım biçimleri sunulmaktadır.

2. Materyal ve Metot

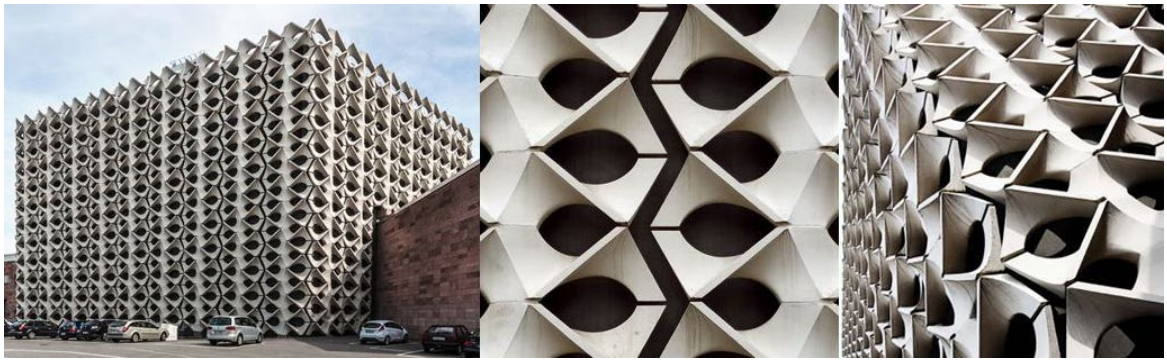
Çalışmada nitel araştırma yöntemi kullanılmıştır. Nitel araştırma yöntemi, üzerinde çalışılan veriyle ilgili anlam üretmek ve veri setinde neyin temsil edildiğine dair açıklamalar geliştirmek amacıyla yapılan bir sınıflandırma ve yorumlama sürecidir. Nitel araştırma yöntemi içerisinde gözlem tekniği yöntemine dayanan çalışmada, yapı örnekleri üzerinden gözlemler yapılmıştır. "Gözlem tekniği; veriden anlam üretilmesi, verilerin sınıflaması ve benzeri boyut indirgemelerle anlaşılırlığının sağlanması ve sonuçların yorumlanmasında, kolaylıklar sağlayarak analiz sürecinde üstünlüklerin elde edilmesine olanaklar tanıyan bir yöntemdir" (Çelik ve diğ., 2020).

Beton esaslı prefabrik cephe panel elemanlarını incelemeyi hedefleyen bu çalışmada ilk olarak literatür taraması ile Dünya'da ve Türkiye'de prefabrikasyonun tarihi incelenmiştir. Prefabrikasyonun tarihsel gelişimi, betonun tarihinden başlayarak ele alınmış, ikinci sanayi devrimi ile betonarmenin kullanılmaya başlanmasından sonraki süreçte etkin olan dış faktörlerle beraber prefabrik ön üretime geçiş, Dünya ve Türkiye için zaman çizelgesi yapılarak ortaya konulmuştur. Daha sonra prefabrikasyon strüktürel sistem türleri araştırılmış ve beton esaslı prefabrik cephe bölümünde malzeme özellikleri, bileşenleri ve teknik detayları hakkında bilgiler aktarılmıştır. Günümüzde kullanılan beton esaslı prefabrike panel cephe sistemleri bölümünde ise archdaily (URL-1), architizer (URL-2), dezeen (URL-3), archilovers (URL-4), architecturaldigest (URL-5), ArchEyes (URL-6) gibi mimari projeler hakkında bilgiler içeren web sayfaları taranmıştır. Bu taramalar sonucunda incelenecek örnekler belirlenmiş ve analiz edilmiştir. Analizlerde gözlem tekniği ile ulaşılan veriler sınıflandırılmış; yapının yeri, yapım yılı, panel bilgisi, uygulama sistemi, biçimsel özelliği ve katman niteliği incelenmiştir. Yapıların belirlenmesinde panel kullanımı açısından yenilikler sunan, sürdürülebilir, özgün form ve kurguya sahip ve teknolojik açıdan gelişmiş yapılar tercih edilmiştir. Yapılara ait değerlendirmeler bir tablo içerisinde özetlenmiştir.

3. Bulgular

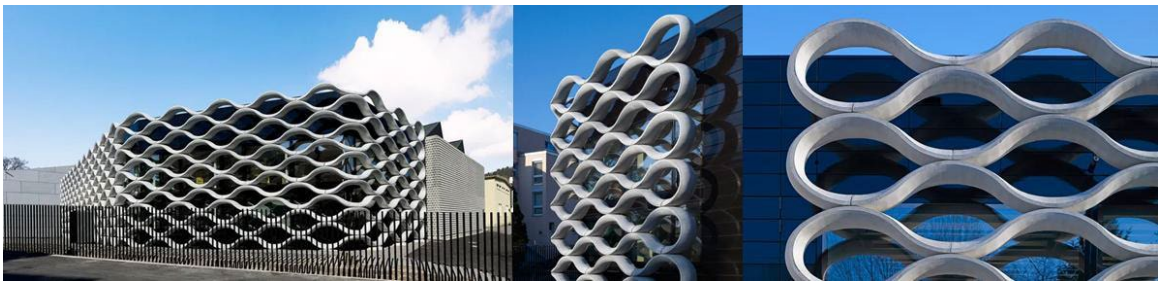
3.1. Beton Esaslı Prefabrike Panel Cephe Sistemlerinin Örnekler Üzerinden İncelenmesi

Çalışma kapsamında beton esaslı prefabrik cephe panellerinin kullanıldığı örnek yapılar incelenerek, geçmişten günümüze olacak şekilde sunulmuştur. Bu bağlamda ilk örnek olarak incelenen Chemnitz Belediye Binası (Şekil 7), özel bir poligonal beton prekast kiremit tasarımıyla inşa edilmiştir. 1974 yılında inşa edilen bu beton kalıplı cephenin her bir tekil unsuru, bükülmüş çiçek yaprakları gibi görünmektedir (Doshi, 2012; URL-11). Bu yapıda kullanılan beton esaslı prefabrike paneller, çift cidarlı bir cepheye sahip olan binanın ikinci kabuğunu oluşturmaktadır. Bununla birlikte yapıda kullanılan cephe panelleri tek katmanlı ve eğrisel yüzeylidir.



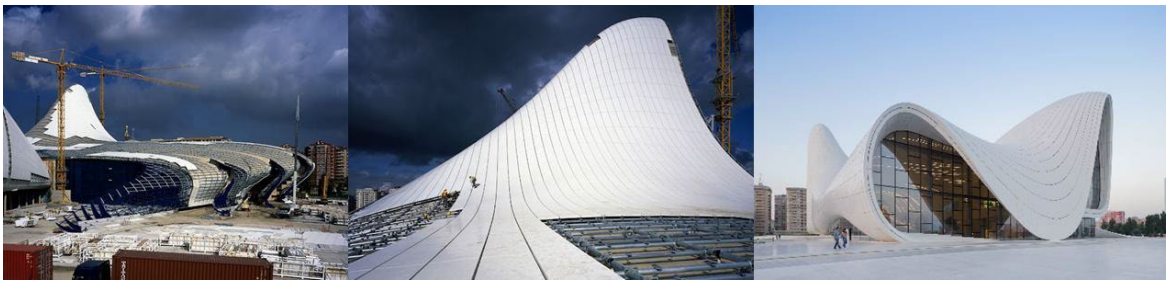
Şekil 7. Chemnitz Belediye Binası, Almanya, Rudolf Weber-Hubert Schiefelbein, 1974 (Doshi, 2012; URL-11)

İsviçre'nin Männedorf kentinde yer alan Wellenhalle Galerisi (Şekil 8) ise Baier Bischofberger tarafından tasarlanmıştır. Yapının cephesi, betonun yaratıcı bir uygulamasının önemli bir örneğini temsil etmektedir. Galeri cephesinde, betonun sertliği akışkan ve dalga şeklinde sunulmaktadır. İnce ve esnek bir şeritte desen oluşturmaya yönelik bu yaklaşım, malzemenin ağır ve sert görünümünü hafifletmektedir (Doshi, 2012). Cephede kullanılan paneller tek katmanlı masif olup, eğrisel yüzeyli olarak şekillendirilmiştir.



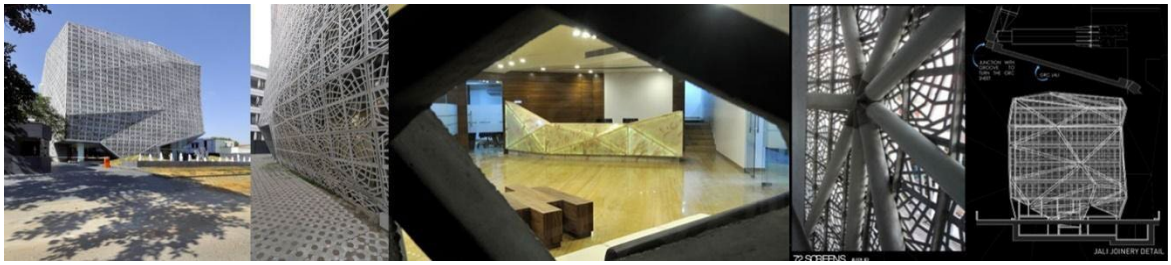
Şekil 8. Wellenhalle Galerisi, İsviçre, Baier Bischofberger Architekten, 2012 (URL-12)

Azerbaycan'ın başkenti Bakü'de yer alan ve Zaha Hadid mimarlık ofisi tarafından tasarlanan Haydar Aliyev Merkezi'nde (Şekil 9), cam elyaf katkılı beton cephe paneller kullanılmıştır. Malzemenin plastik özelliği, cephenin istenilen amorf formlarda tasarlanabilmesine olanak sağlamıştır. Yapı akışkan yüzeyleri ile beton panellerin form biçimlenmesinde sınırların ötesine geçerek yeni bir yaklaşım geliştirmiştir (Souza, 2019). Yapıdaki beton paneller ise yalıtımla birlikte çift katmanlı olup, eğrisel bir yüzey oluşturmaktadır.



Şekil 9. Heydar Aliyev Center, Zaha Hadid Architects, Azerbaycan, 2013 (URL-13; URL-14)

Bir başka yapı örneğinde ise çöl iklimine karşı güneş kırıcı olarak beton paneller kullanılmıştır. Bina cephesinde aşırı sıcaklara karşı cam elyaf katkılı beton paneller ile önlem alınmıştır. Bölgenin mimari mirası olan geleneksel 'jali' perdelerinden ilham alan beton perde, binayı her yönden sararak ısı kazancını azaltmakta ve binayı enerji açısından daha verimli hale getirmektedir (URL-15). Aynı zamanda beton paneller gürültüye karşı izolasyon da sağlamaktadır (Puri, 2013). Binanın ana strüktürel sistemi betonarmedir. Betonarme sisteme ankre edilen çelik borulara paneller bağlanmaktadır. Panellerin derinliği yapının üç boyutlu etkisinden dolayı yer yer değişmekle birlikte, iki metreye kadar çıkmaktadır (Şekil 10) (URL-16). Yapı cephesinde kullanılan paneller çok katmanlı olup, açık-kapalı boşluklu olarak tasarlanmıştır.



Şekil 10. 72 Screens, Sanjay Puri Architects, India, 2013 (URL-17)

Portekiz'deki Minho Üniversitesi Biyo-Sürdürülebilirlik-Bilim ve Yenilik Enstitüsünde (Şekil 11), binanın dış cephesinde elyaf takviyeli prefabrik beton paneller kullanılmıştır. Bu paneller uzun ömürlü, sünek, plastik ve akışkan özelliklere sahiptir (Zapartan, 2016). Cláudio Vilarinho tarafından tasarlanan cephede, titanyum nanotüplerden esinlenilmiştir. Genişliği 200 cm, boyu ise 180 ile 380 cm arasında değişen paneller cephede bir ritim oluşturacak şekilde delikli olarak kurgulanmıştır. Yeşil pigmentler ve oksitlerden oluşan bir karışım, üretim esnasında betona entegre edilerek cephenin mevcut yüzey rengi elde edilmiştir. Bununla birlikte beton paneller, cephenin ısı kazanımını kontrol ederek yapının sürdürülebilirliğine de katkı sağlamaktadır (Dick-Agnew, 2017). Cephede kullanılan paneller tek katmanlı ve açık-kapalı boşluklu olarak düzenlenmiştir.



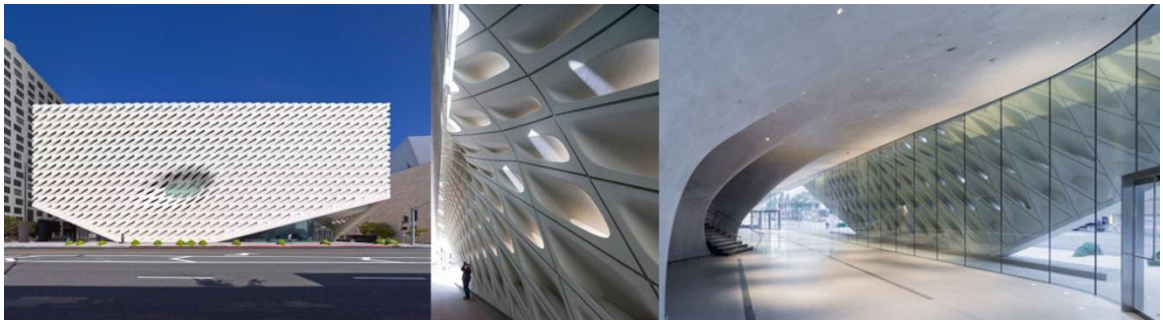
Şekil 11. Biyo-Sürdürülebilirlik, Bilim ve Yenilik Enstitüsü, Portekiz, Cláudio Vilarinho, 2015 (URL-18)

Almanya'nın Düsseldorf kentindeki eski bir ulaşım merkezine eklenen Ballet am Rhein bale prova binasında (Şekil 12) ise camlı girişin üzerinde beton panellerden oluşan bir kat yer almaktadır. Betoshell olarak adlandırılan tekstil ve karbon fiber takviyeli beton paneller, yapıda taşıyıcı özelliğe sahip olmayıp yalnızca kaplama malzemesi olarak kullanmışlardır (Griffiths, 2015). Binada 1500 metrekarelik yüzey alanına sahip olan paneller 240 cm* 120 cm ebatlarında olup, 40 mm kalınlığındadır (URL-19). Bu yapıda kullanılan beton cephe panelleri çok katmanlı olup, açık-kapalı panel sınıfına girmektedir.



Şekil 12. Ballet am Rhein, Gmp Architects, Almanya, 2015 (URL-20)

Los Angeles, Amerika'da inşa edilen The Broad çağdaş sanat müzesi, Diller Scofidio + Renfro ile ARUP işbirliği ile tasarlanmıştır (Şekil 13) (URL-21). Binanın cephesinde cam elyaf katkılı beton paneller kullanılmıştır. Yapıda kullanılan malzeme; yüksek performanslı çimento, cam elyafı, ince agrega, mineraller, isteğe bağlı olarak polimer ve bazı yapı kimyasallarının karıştırılmasıyla elde edilen dayanıklı ve güçlü bir malzeme olarak ifade edilmektedir (URL-22). Üç boyutlu yüzeyler, beton esaslı panellerin yapılarda kullanımına özgün bir örnek oluşturmaktadır. Yapının panel bilgisi ise tek katmanlı ve eğrisel yüzeyli olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 13. Broad Müzesi, Diller Scofidio & Renfro, 2015 (URL-23)

Meksika'da inşa edilen bir başka örnekte ise masif cepheler, beton paneller ile oluşturulmuştur. Toyo Ito tarafından tasarlanan Uluslararası Barok sanat ve kültür müzesinde (Şekil 14) yapının dış yüzeyinde çok az açıklık olup, pencere ve kapılar bir iç avlu etrafında şekillendirilmiştir (Tardiff, 2016). Yapının dış duvarları ve döşemeleri prekast olup, iç duvarlar ise yerinde döküm betondur. Dış yüzeyi oluşturan paneller sandviç panel olup, 65 mm kalınlığındadır (URL-24). Yapının cephe sistemi çok katmanlı ve eğrisel yüzeyli yapıya sahiptir.



Şekil 14. Uluslararası Barok Sanat ve Kültür Müzesi (URL-25; (URL-26)

Amerika'nın Chelsea kentinde yer alan çok katlı bir yapıda panellerin kullanımı görülmektedir. Kentin kuzey sınırında yer alan The Maverick yapısı (Şekil 15), 20 katlı bir kuledir. Yapıda asit yıkama tekniğiyle oluşturulan paneller, üç boyutlu olup katlar arasında bağlanmaktadır. Koyu renkli paneller kiralık konutları ifade ederken, açık renkli panellerden oluşan kısım ise kat mülkiyetli alanları içermektedir (Marani, 2020). Yapı cephesinde kullanılan paneller çok katmanlı ve açık-kapalı sistemde düzenlenmiştir.



Şekil 15. The Maverick, Amerika, DXA Studio, 2022 (Marani, 2020; URL-27)

Buraya kadar değinilen tüm örnek yapılar konum, yıl, beton panel bilgisi, katman ve biçimsel özellikleri bağlamında Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Prefabrik Beton Panel Cephe Sistem İncelemeli Özet Tablo

Bina Adı	Görsel	Yer	Yıl	Beton panel bilgisi	Panel Özelliği	Panel Katman Özelliği	Panel Biçimsel Özelliği
Chemnitz Belediye Binası		Almanya	1974	İkinci cephe elemanı olarak uygulanmış-tır.	Çiçek yaprağına benzer bir doğal geometrik desen	Tek katmanlı masif panel	Eğrisel yüzeyli panel
Wellenhall e Galerisi		İsviçre	2012	İkinci cephe elemanı olarak uygulanmış-tır.	Uzun ve eğrisel beton elemanlar, malzemenin ağır ve sert görünüşünün hafifletilmesi	Tek katmanlı masif panel	Eğrisel yüzeyli panel
Haydar Aliyev Kültür Merkezi		Azerbaycan	2013	Cam elyaf takviyeli beton bir ikinci cephe olarak şantiyede çelik çerçeveye takılmıştır.	Eğrisel kabuk tasarımı	Çok katmanlı sandviç panel	Eğrisel yüzeyli panel
72 Screens		Hindistan	2013	Cam elyaf takviyeli beton bir ikinci cephe olarak şantiyede çelik çerçeveye takılmıştır.	Cam elyaf takviyeli beton ile dantelsi görünüm, sürdürülebilir tasarım	Tek katmanlı masif panel	Açık-kapalı boşluklu panel
Biyo-Sürdürüle bilirlik - Bilim ve Yenilik Enstitüsü		Portekiz	2015	Beton çerçeveli binaya metal desteklerle ikinci cephe elemanı olarak monte edilmiştir.	Elyaf takviyeli prefabrik beton, sünek, akışkan ve plastik özellik, titanyum nanotüplerden esinlenme	Tek katmanlı masif panel	Açık-kapalı boşluklu panel
Ballet am Rhein bale prova binası		Almanya	2015	Karbon fiber takviyeli beton cephe elemanları kullanılmıştı r.	İnce beton levha giydirme cephe kullanımı	Çok katmanlı sandviç panel	Açık-kapalı boşluklu panel
Broad Müzesi		Amerika	2015	Cam elyaf katkılı beton ikinci cephe	Eğrisel, dinamik görsel etki,	Tek katmanlı masif panel	Eğrisel yüzeyli panel

				olarak kullanılmaktadır.	sürdürülebilir tasarım		
Uluslararası Barok sanat ve kültür müzesi		Meksika	2016	Dış duvarlar ve döşemeler prefabrik olarak şantiyeye getirilmiştir.	Kıvrımlı, bükülmüş, eğimli duvarlar, plastik tasarım	Çok katmanlı sandviç panel	Eğrisel yüzeyli panel
The Maverick		Amerika	2022	Pencerelerin yer aldığı duvar yüzeyi üretilip şantiyede montajı sağlanmıştır.	Modüler sistem, geometrik desen	Çok katmanlı sandviç panel	Açık-kapalı boşluklu panel

4. Sonuç ve Tartışma

Beton esaslı prefabrik cephe panelleri farklı renk, doku ve yüzey seçenekleri ile yapılarda giderek daha çok kullanım alanı bulmaktadır. Çünkü, panellerin cephelerde kullanımı ile pek çok avantaj elde edilmektedir. Ayrıca prefabrik cephe panelleri, projelerin tasarım ve inşaat aşamalarında atık oluşumunu azaltmak için bir çözüm olarak kabul edilmektedir (Osmani, Glass & Price, 2006; Jaillon, Poon & Chiang, 2009; Gunawardana & Mendis, 2022). Sahip olduğu hızlı ve kolay kurulum sayesinde işçilik maliyeti azalmakta ve iskele kurulumu gerekmemektedir. Kullanım ömürleri uzun olup yangın, ısı ve ses yalıtımı açısından gerekli teknik koşulları sağlamaktadır. Hafif olmaları ve büyük ebatlarda üretilebilmeleri zamandan tasarruf edilmesine olanak tanımaktadır.

Bunların yanı sıra cephelerde panel kullanımının birtakım dezavantajları da bulunmaktadır. Montaj işleminden sonra yapılara müdahale edilme olanağının olmaması ve yanal yüklerin aktarımı açısından eksenel olmayan kuvvetlere maruz kalma olasılıklarının geleneksel sistemlere göre daha yüksek olması dezavantajlarıdır Mimari tasarımı bilinçli yapılmış bir prefabrik beton panel yapılar taşıyıcı sistem seçimi ve bağlantı detayları doğru kurgulandığı takdirde depreme dayanıklı olup, deprem bölgelerinde güvenle kullanılabilmektedir. Bu sistemlerde kullanılacak olan bağlantı profillerinin civatalı, kaynaksız ve galvanizli tercih edilmesi deprem güvenliği açısından doğru bir tercih olacaktır (Dağ ve diğ., 2022). Sonuçta deprem riski çok olan ülkemizde getirdiği statik avantajlardan dolayı prefabrik yapım sistemleri ile prefabrik beton cephe panellerinin kullanımının artması için devlet politikalarıyla da desteklenmesi sonucunda mimar-mühendis ve tasarımcıların teşvik edilmesi önem arz etmektedir.

Çalışma kapsamında incelenen örneklerde, panellerin yalnızca iki boyutlu düzlemsel yüzeyler sunmadığı, özgün ve farklı geometrik desenlere sahip tasarımlar da sunduğu görülmektedir. Özellikle son yıllarda üretilen beton cephe elemanlarının içerisinde eğrisellik, dinamiklik, süneklik kazandırmak ve betonun sürdürülebilir olması için içerisine cam elyaf ve karbon fiber takviyesinin yapıldığı görülmüştür. Bununla birlikte beton cephe elemanlarının gölgeleme ve enerji korunumu için ikinci cephe elemanı olarak kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda mimarlar, tasarımcılar ve mühendisler için, cam elyaf, plastik ve karbon takviyeli beton türleri, herhangi bir biçim, şekil, yüzey yapısı ve rengi yüksek kalitede üretmek için kullanım olanağı tanıdığından tasarım özgürlüğü sağlamaktadır (Roik vd., 2022). Bu incelemeler sonucunda prefabrik beton cephe panellerinin işlevsel olduğu kadar estetik açıdan da tercih edildiği tespit edilmiştir. Çünkü bu paneller son derece özelleştirilebilir olup, mimarların esnek tasarımlar oluşturmasına olanak tanımaktadır. Bununla birlikte yenilikçi, sürdürülebilir ve enerji verimli bina uygulamalarına yönelik talep artmaya devam ettikçe, prefabrik cephe panellerinin kullanımının önümüzdeki yıllarda daha da yaygınlaşması beklenmektedir.

Referanslar

Altınay, G. (2011). Beton Esaslı Prekast Cephe Panellerinin Üretimi, Uygulaması, Yapısal Performansının Değerlendirilmesi ve Bir Alan Araştırması ile İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İst.

Amani, A., & Niyazi, A. Q. (2018). Türkiye'de PrefabrikYapı Sektörünün Hızlı Gelişimi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(3), 487-494.

Ayaydın, Y. (1987). Taşıyıcı duvar perdeli prefabrike yapılar, Yılmaz offset matbaası, İstanbul.

Ayazoğlu, İ. (2003). Prefabrike panel sistemlerle konut üretiminde mimari tasarım sorunları, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İst, s.34.

Baghchesaraei, A., Kaptan, M. V., & Baghchesaraei, O. R. (2015). Using prefabrication systems in building construction. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(24), 44258-44262.

Baş, Y.G., Vural, N. (2019). Prefabrike beton panel sistemlerin konut üretiminde kullanım olanakları. Online Journal of Art and Design, 7(4), 124-133.

Çelik, H., Baykal, N.B., Memur, H.N. (2020). Nitel Veri Analizi ve Temel İlkeleri. Eğitimde Nitel Araştırmalar Dergisi, 8(1), 379-406.

Dağ, I., Kuruşcu, A.O., Parsa, A.R. (2022). Architectural and Structural System Design of Precast Concrete Structures in Earthquake Zones. *International Journal of Scientific Research and Management*, 10(7), 2445-2458.

Dick-Agnew, D. (2017). A Holey, Green Facade Inspired by Science Covers a Campus Building in Portugal. https://www.azuremagazine.com/article/nanotube-inspired-facade/

Dikici, A., Kocagül, M. (2019). Isı Yalıtımında Kullanılan Eps, Xps ve Taş Yünü İzolasyon Malzemelerinin Deneysel Olarak Karşılaştırılması, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(1), 129-136.

Doshi, A. (2019). 6 concrete facades with solid waves and beyond, as captivating as the material itself. designwanted: https://designwanted.com/concrete-facades/

Esin, T. ve Coşgun, N. (2004). Betonarme yapım sistemlerinin ekolojik açıdan değerlendirilmesi. II. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi, Ankara 1-8.

Gibb, A.G.F. (1999). Off-Site Fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularisation, Whittles Publishing, Scotland, UK, 54-82.

Göçer, C. (2005). Beton Esaslı Prefabrike Cephe Panellerinde Yüzey Özellliklerine Bağlı Atmosferik Kirlenme Etkisi. 2. Ulusal Çatı & Cephe Kaplamalarında Çağdaş Malzeme ve Teknolojiler Sempozyumu, İstanbul.

Gültek, M. (2012). Prefabrikasyon Ders Notları, PowerPoint slaytı, Gazi Üniversitesi Mimarlık Bölümü.

Güvenli, Ö. (2006). Tarihsel süreç içinde malzeme cephe ilişkisi ve giydirme cepheler. (Master's thesis, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı).

Gunawardena, T., & Mendis, P. (2022). Prefabricated building systems—design and construction. *Encyclopedia*, 2(1), 70-95.

Griffiths, A. (2015). GMP Architekten's ballet facility features materials that reference its industrial setting. https://www.dezeen.com/2015/09/12/gmp-architekten-deutsche-oper-am-rhein-ballet-facility-dusseldorf-germany/

Jaillon, L., Poon, C. S., & Chiang, Y. H. (2009). Quantifying the waste reduction potential of using prefabrication in building construction in Hong Kong. *Waste Management*, 29(1), 309-320.

Hamid, K. M. H. (2017). Betonarme Prefabrik Endüstri Yapılarında Cephe Panellerinin Bağlantısı İçin Özel Bir Elemanın İncelenmesi (Master's thesis, Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü).

Harris, F., McCaffer, R., Baldwin, A., & Edum-Fotwe, F. (2021). Modern construction management. John Wiley & Sons.

Kahveci, B. (2019). Beton bünyeli prefabrike panel sistemler ve düğüm noktalarının tasarım sorunları (Master's thesis, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı).

Marani, M. (2020) DXA Studio's 'The Maverick' wraps up facade install of acid-etched precast concrete panels. https://www.archpaper.com/2020/08/facades-dxa-studios-the-maverick-acid-etched-precast-concrete-panels/

Nirmalkumar, K., Chandrasekaran, P. ve Rathipraba, M. (2021). Prefabricated Structures and Its Components. Advances in Civil Engineering. Delhi: Hindistan, AkiNik Publications, s. 111.

Osmani, M., Glass, J., & Price, A. (2006, May). Architect and contractor attitudes to waste minimisation. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-waste and resource management (Vol. 159, No. 2, pp. 65-72). Thomas Telford Ltd.

Puri, S. (2013). 72 Screens | Sanjay Puri Architects, https://www.archilovers.com/projects/208480/72-screens.html

Roik, M., Tietze, M., & Kahnt, A. (2022). A revival in façades: Textile reinforced concrete panels are light, safe and aesthetically pleasing. Acta Polytechnica CTU Proceedings, 33, 497–503. DOI: https://doi.org/10.14311/APP.2022.33.0497

Seitablaiev, M. Ö. ve Sev, A. (2018). Beton Prefabrikasyonun Sürdürülebilirliğini Geliştirmeye Yönelik Gelişmeler, Dicle Üniversitesi 1. Uluslararasi Mimarlik Sempozyumu, 3-4 Ekim 2018, Aykal, D.F., Kejanli, T., Özbudak Akça B., Koç, C., Aras Baylan, B. (Editörler), Çevreden Mekana, ss. 5-19, https://www.researchgate.net/publication/331432571_BILDIRI_KITABI_PROCEEDINGS_BOOK adresinden 23.05.2023 tarihinde erişilmişir.

Seitablaiev, M. Ö., ve Umaroğulları, F. (2020). Dünya'da ve Türkiye'de Betonarme Prefabrikasyon. *Journal of Architectural Sciences and Applications*, 5(2), 309-320.

Souza, E. (2019). How Fiber-Reinforced Concrete Can Make for More Resistant and Lighter Architecture.https://www.archdaily.com/921833/how-fiber-reinforced-concrete-can-make-for-more-resistant-and-lighter-architecture, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-1: https://www.archdaily.com/, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-2: https://architizer.com/, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-3: https://www.dezeen.com/, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-4: https://www.archilovers.com/, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-5: https://www.architecturaldigest.com/, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-6: https://archeyes.com/, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-7: https://www.mavitasprefabrik.com.tr/prefabrik/prefabrik-yapilarin-tarihcesi, Erişim Tarihi: 24.05.2023

URL-8: https://www.mavitasprefabrik.com.tr/prefabrik/prefabrik-yapilarin-tarihcesi, Erişim Tarihi: 24.05.2023

URL-9: https://theconstructor.org/building/carbon-concrete/565362/, Erişim Tarihi: 25.05.2023

URL-10: https://www.neteren.com/tr/Urunler/Markalar/Cretox-Brut-Beton-Panel/

URL-11: https://architectuul.com/architecture/city-hall-chemnitz, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-12: https://www.california-architects.com/en/projects/view/wellenhalle, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-13: http://architect-1.blogspot.com/2015/09/structure-design-of-Heydar-Aliyev-Center-Zaha-Hadid.html, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-14: https://www.archdaily.com/448774/heydar-aliyev-center-zaha-hadid-architects?ad_medium=gallery, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-15: https://architizer.com/projects/72-screens/, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-16: https://dcpd6wotaa0mb.cloudfront.net/comp1st-cms/redactor_assets/documents/47/Cem-FIL_Architects_Case_Study_Shree_Cement_Office_11-2013_Rev0_approved.pdf, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-17: https://www.idesignawards.com/winners/zoom.php?eid=9-8993-15, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-18: https://www.archdaily.com/798576/institute-of-science-and-innovation-for-bio-sustainability-claudio-vilarinho?ad_medium=gallery, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-19: https://www.heringinternational.com/en/news/detail/n/betoshellr-textile-reinforced-concrete-facade-for-the-rehearsal-building-ballett-am-rhein-in-dusseld/, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-20: https://www.archdaily.com/773368/ballet-am-rhein-gmp-architekten?ad_medium=gallery, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-21: https://www.arup.com/projects/the-broad, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-22: https://www.ekoyapidergisi.org/geleneksel-oldugu-kadar-da-inovatif-cam-lifi-takviyeli-beton-grc, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-23: https://www.archdaily.com/772778/the-broad-diller-scofidio-plus-renfro, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-24: https://www.archdaily.com/786104/museo-internacional-del-barroco-toyo-ito-and-associates-architects, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-25: https://archeyes.com/international-baroque-museum-puebla-toyo-ito/, Erişim Tarihi: 23.05.2023Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-26: https://arquitecturayempresa.es/noticia/creatividad-innovacion-y-hormigon-arquitecto-toyo-ito, Erişim Tarihi: 23.05.2023

URL-27: https://architizer.com/projects/maverick-chelsea-1/, Erişim Tarihi: 23.05.2023

Tardiff, S. (2016). Toyo Ito's Museum for Baroque Art Opens in Mexico. https://www.architecturaldigest.com/gallery/toyo-ito-museum-baroque-art-opens-in-mexico

Yıldız, S., Kıvrak, S., Arslan, G. (2018). Built Environment Design-Economic Sustainability Relationship in Urban Renewal, *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation*, 1(1), 33-42.

Van de Voorde, S., Wouters, I., Berters, I., Verswijver, K., Belmans, B., Verdonck, A., Descamps, F. (2015). Post-War Building Materials in Housing in Brussels, Vrije Universiteit Brussel, s. 370-426.

Zapartan, T. (2016). A Facade Inspired By Titanium Nanotubes At The IBS In Guimarães. http://inspirationist.net/a-facade-inspired-by-titanium-nanotubes-at-the-ibs-in-guimaraes/

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

UMAGD, (2023) 15(3), s250-s256.

10.29137/umagd.1367522

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:3 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue

Araştırma Makalesi / Research Article

Proaktif Trafik Kaza Risk Değerlendirme Yaklaşımı ve Türkiye İçin Uygulanabilirliğinin Tartışılması

Proactive Traffic Accident Risk Assessment Approach and Discussion of its Applicability for Türkiye

Erdem DOĞAN*[1], Ersin KORKMAZ [1]

[1]*Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,71450, Kırıkkale, Türkiye*

***Başvuru/Received**: 27/09/2023* ***Kabul / Accepted**: 26/10/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Öz

Trafik kazaları, tüm yaş grupları için ölüm nedenleri listesinin ilk sıralarında yer almaktadır. Yıllık olarak dünya genelinde yaklaşık 1,35 milyon ölümlü trafik kazası kaynaklı olay meydana gelmektedir. Uzmanlar bir yol kesiminin risk düzeyini değerlendirmek amacıyla, sıklıkla Reaktif Yaklaşım (ReY) tabanlı metotlar kullanmaktadır. ReY, kazaların oluşmasını bekleyen ve ardından kaza verilerini analiz ederek önlemler öneren bir yaklaşım olup, bu yöntem için yeterli verinin toplanması gereken süre uzun olabilir. Diğer taraftan, Proaktif Yaklaşımlarda (ProY) ise trafik akışı içindeki taşıtların risk potansiyeli olan hareketleri incelenmekte ve bu hareketlerin analizinden elde edilen vekil güvenlik ölçütleri kullanılmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, risk analizi için gereken süre önemli ölçüde kısalmaktadır. Türkiye Cumhuriyeti Karayolu Trafik Güvenliği Strateji Belgesinde trafik kazası kaynaklı ölümlerin 2030 yılına kadar %50 azaltılması hedeflenmektedir. Mevcut karayolu risk değerlendirmesi için kullanılan ReY yöntemlerinin eksik veri kaynaklı yavaş kalabileceği ve belirtilen hedefe zamanında ulaşılamayabileceği göz önüne alınmalıdır. Bu çalışmanın temel amacı, Dünya genelinde kullanılan ProY yöntemleri hakkında bilgi sunmak ve ProY yönteminin Türkiye karayolları için risk değerlendirmesinde kullanılmasının tartışılmasıdır. Bu bağlamda, öncelikle mevcut ReY yöntemleri açıklanmış ve ardından ProY yöntemleri ile ilgili bilgilere odaklanılmıştır. Son olarak ProY örnekleri ele alınarak ülkemizde uygulama potansiyeli taşıyan uygulamalardan söz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

"Proaktif risk değerlendirme, Trafik kazaları, Türkiye, Vekil güvenlik ölçütleri"

Abstract

Traffic accidents rank among the top causes of death across all age groups. Approximately 1.35 million fatal traffic accidents occur annually worldwide. Experts often use Reactive Approach (ReA)-based methods to assess the risk level of a road section. ReA is an approach that waits for accidents to occur and then recommends precautions by analyzing accident data. The time required to collect sufficient data for this method may be long. On the other hand, in Proactive Approaches (ProA), the potentially risky movements of vehicles in the traffic flow are examined and proxy safety measures obtained from the analysis of these movements are used. Thanks to this approach, the time required for risk analysis is significantly shortened. In the Highway Traffic Safety Strategy Document of the Republic of Turkey, it is aimed to reduce deaths caused by traffic accidents by 50% by 2030. It should be considered that the ReA methods currently used for road risk assessment might be slow due to insufficient data, potentially hindering the timely achievement of this goal The main purpose of this study is to provide information about ProY methods used worldwide and to discuss the use of ProY method in risk assessment for Turkish highways. In this context, existing ReA methods are first explained, followed by a focus on ProA methods. Finally, ProA examples are discussed, highlighting potential applications in Turkey.

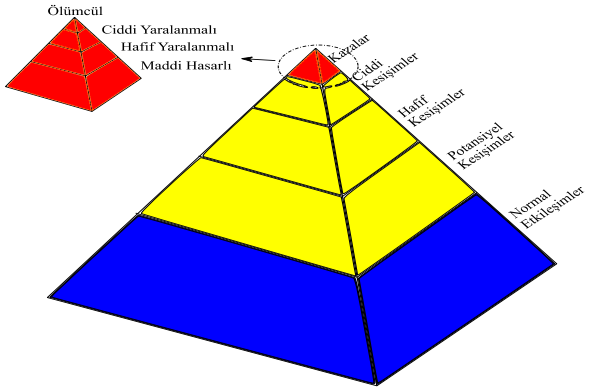
Key Words

""Proactive Risk Assessment, Traffic Accidents, Turkey, Surrogate Safety Measures"

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

1. Giriş

Karayollarında meydana gelen trafik kazalar ciddi kayıplar ortaya çıkaran önemli bir problemdir. Bu kazaların sayı ve ciddiyetinin azaltılması için önemli miktarda çalışma yapılmasına rağmen, bu çalışmaların sayısı ne yazık ki istenilen seviyelere ulaşılamamıştır. Bir trafik kazasının oluşmasında birçok faktör etkili olmakta ve bu faktörlerin tamamının tespit edilmesi çoğu zaman yüksek maliyet, işgücü ve zaman gerektirmektedir. Diğer taraftan risk barındıran karayolu kesimlerinin tespit edilmesi ve gerekli önlemlerin alınması bir zorunluktur. Bu nedenle hızlı ve düşük maliyetli Karayolu Risk Değerlendirme (KRD) metotlarının geliştirilmesi ve uygulanması kritik derecede önemlidir.
Hydén (1987) trafik akışından meydana gelen etkileşim ve kesişim olaylarının güvenlik açısından hiyerarşini, Şekil 1' de verilen güvenlik piramidi ile ortaya koymuştur. Bu yapıdan anlaşılmaktadır ki, trafik akışı içindeki etkileşimlerin sayısı göz önüne alındığında, trafik kazaları çok nadir gözlenen olaylardır. Bu nedenle sadece kaza verilerine bağlı yöntemlerin risk değerlendirme görevinde kullanılması durumunda, analizin tamamlanması için uzun zaman periyotlarına ihtiyaç duyulacaktır. Diğer taraftan, kaza potansiyeli taşıyan taşıt ve/veya yaya kesişim olayları sıkça gözlenmektedir. Bu olayların analizlerde göz önüne alınması halinde, risk değerlendirme görevleri için gereken zaman önemli ölçüde kısalacaktır.



Şekil 1. Trafik olaylarına ait güvenlik piramidi (Hydén, 1987; Laureshyn ve diğ., 2010)

Dünya'da karayolu Kaza Risk Değerlendirmesi (KRD) süreci için kullanılan yöntemlere bakıldığında Reaktif Metot (ReM) ve Proaktif Metot (PoM) olarak iki ana yaklaşımın olduğu görülmektedir. ReM temel olarak geçmiş çarpışma verilerine dayandırılarak yapılan KRD süreçlerini kapsar. ReM genel kabul gören bir yöntem olup, hâlihazırda birçok ülkenin tercih ettiği temel bir yaklaşımdır. Diğer taraftan kaliteli ve detaylı kaza verilerine ihtiyaç duyması ve bu verilerin oluşmasının uzun zaman alması en büyük dezavantajıdır. PoM ise kaza oluşumuna sebep olabilecek kesişimleri, yani vekil olayları, kullanarak yapılan bir KRD sürecidir. Bu nedenle kazaların oluşmasına ihtiyaç duymamakta ve istenilen veri, gözlemlerle sahadan elde edilebilmektedir. PoM'lerin güvenlik analizleri için kullanılma fikri 1970'li yıllarda Amundsen ve Hyden (1977) tarafından ortaya atılmasına rağmen, vekil olayların gözlenmesinin geçmiş zamanlardaki zorluğu bu yaklaşımın en büyük dezavantajı olmuştur. Günümüzde gelişen görüntü alma, haberleşme ve yol teknolojileri sayesinde artık bu dezavantaj önemli ölçüde ortadan kalkmış bulunmakta, gelişmiş ülkelerde PoM'lerin dâhil olduğu KRD süreçleri de yaygınlaşmaktadır. Avrupa ülkelerinin çoğundan büyük karayolu ağına sahip bir ülke olan Türkiye'nin PoM'lerin avantajlarından faydalanması gerekmektedir.

Proaktif trafik güvenliği alanında son yıllarda yapılan bazı önemli çalışmalar, farklı perspektiflerden ele alındığında, güvenlik önlemlerinin geliştirilmesi ve kazaların önceden tahmin edilmesi konusunda PoM kullanımının giderek arttığını işaret etmektedir. Hassanpour ve Hadadi'nin (2022) çalışması, iki şeritli yolların güvenliğini etkileyen altyapı faktörlerini önceliklendirerek, altyapı iyileştirmelerinin trafik güvenliği üzerindeki etkisini proaktif yöntemler kullanarak değerlendirmektedir. Dimitrijevic, Khales, Asadi ve Lee'nin (2022) çalışması, kısa vadeli segment düzeyinde kazaları tahmin etmek için geliştirdikleri veri modellemesiyle, proaktif ve reaktif stratejilerin etkili bir şekilde nasıl entegre edilebileceğini göstermektedir. Noh ve Yeo'nun (2022) geliştirdikleri yöntemle çarpışma risk bölgelerini belirlemek için proaktif çözümler öne sürmüşlerdir. Du, Dash, Li, Wei ve Wang'ın (2023) kapsamlı literatür taraması, trafik yönetim sistemlerinde güvenlik konusunda mevcut olan geniş bilgi birikimimizi derinleştirmekte olup, gelecekteki araştırmalara rehberlik etmektedir. Badi ve Bouraima'nın (2023) çalışması, çok ölçütlü karar verme tabanlı bir çerçeve geliştirerek, özellikle Libya gibi riskli bölgelerde taşımacılık kazalarının proaktif bir şekilde yönetilmesi için rehberlik sağlamaktadır. Kar, Venthuruthiyil ve Chunchu'nun (2023) araştırması, kırsal alanlarda karışık trafik koşullarının analiziyle, proaktif güvenlik yaklaşımlarının pratik uygulamalarını ortaya koymaktadır. Mishra, Rajendran, Vecchietti ve Har'ın (2023) çalışması, şehir manzaralarındaki kaza riskli özelliklerin algılanması için geliştirdikleri yöntemle, sürücülere ve trafik güvenliği sistemlerine proaktif bir kat sunmaktadır. Bu bağlamda, bu çalışmalar bir araya geldiğinde, trafik güvenliği alanında proaktif yaklaşımların geliştirilmesi ve uygulanmasının önemli bir potansiyel taşıdığı ortaya çıkmaktadır.

Türkiye Cumhuriyeti Karayolu Trafik Güvenliği Strateji Belgesinde 2030 yılına kadar trafik kazası sonucu ölümleri ve ciddi yaralanmaları %50 azaltma hedefi konulmuştur (EGM, 2021). Bu hedef doğrultusunda, KRD süreçlerinin süratle gerçekleştirilmesi ve gerekli düzenlemelerin yapılması gerekecektir. Bu hedefin gerçekleştirilebilmesi için hızlı bir KRD yaklaşımına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'nin bu ihtiyacını karşılama potansiyeli taşıyan, PoM yaklaşımlarını tanıtmak ve bir tartışma ortamının oluşmasını sağlamaktır. Bu amaçla öncelikle Türkiye uygulanan ReM'leri kısaca tanıtılacak, ardından PoM'ler hakkında bilgiler verilerek avantaj ve dezavantajları tartışılacaktır.

2. Türkiye'de Kullanılan Reaktif Risk Değerlendirme Yaklaşımı (Kaza Kara Nokta Yöntemi)

Reaktif karayolu risk değerlendirme yaklaşımı, hâlihazırda gerçekleşmiş olan kaza verilerinin analizine dayanarak yoldaki sorunlu alanları tespit etme, karşı önlemleri inceleme ve bunları uygulama faaliyetlerini içermektedir (FHWA, 2006). Bu yaklaşım genellikle geçmiş kaza verilerinin analizi yapılarak Kaza Kara Noktası (KKN) olarak ifade edilen yol kesimlerinin tespit edilmesi sürecini kapsamaktadır. Ülkemizde, KKN tespiti için Emniyet Genel Müdürlüğü (EGM), Jandarma Genel Komutanlığı (JGK) ve Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) beraber çalışmaktadır. Emniyet güçleri tarafından toplanan kaza verileri yılsonunda KGM'ye teslim edilmekte ve KGM bünyesinde bulunan Trafik Şube Müdürlüğü tarafından işlenerek KKN'ler tespit edilmekte veya güncellenmektedir.

KKN tespiti için kaza tekrarı, kaza tekrarı oranı, tablo yöntemi, eşdeğer ağırlık ve KGM'nin kullandığı Oran Kalite Yöntemi (OKY) sayılabilir. KGM, alt yapı eksiklileri ve uygulama zorlukları sebebiyle yöntemin uygulamasında üç adet kabul yapmaktadır. Bunlar: (i) Köprü, tünel, kavşak gibi yol yapıları ayrıca ele alınmaz. (ii) Karayolları üzerindeki her 1 km. bir kesim olarak değerlendirilir. (iii) Sadece devlet yolları için analizler yapılır. Ölümlü ve yaralanmalı kazaların en fazla oluştuğu bölgelerin kavşaklar olduğu Elvik ve diğ (2009) çalışması incelendiğinde, bu bölgeler için özel bir değerlendirmenin yapılamaması önemli bir dezavantajdır. Türkiye'nin yaklaşık 68 bin km'lik yol ağının yaklaşık yarısının devlet yolu olarak ele alındığını düşünüldüğünde, yol ağının yarısının için risk değerlendirme işlemi dışında tutulduğu anlaşılmaktadır.

OKY'de Türkiye genelinde 1 km'lik kesimlerde oluşan kaza tekrar sayılarının Poisson dağılımına uygun dağıldığı kabul edilmekte ve bu kabulle kritik değerler hesaplanmaktadır. Denklem 1-3' verilen ve açıklanan R,F ve S değerleri, Denklem 4-6 da yardımıyla hesaplanan kritik değerleri (K_R,K_F,K_S) geçmesi durumunda ilgili kesim kaza kara noktası olarak değerlendirilmektedir. İlk adımda, Denklem 1-3'te verilen bağıntılarla, ilgili kesim için sırasıyla kaza tekrarları (R), kaza tekrar oranı (F) ve eşdeğer ağırlık değerleri (S) belirlenir.

$$R = \frac{A.10^6}{365.T.V.L} \tag{1}$$

$$F = \frac{A}{L} \tag{2}$$

$$S = 9F + 3I + P \tag{3}$$

Bu denklemlerde ilgili kesim için,

A: Kaza sayısı, T: Analiz süresi, V: Yıllık ortalama günlük trafik değeri, L: Kesim uzunluğu, I: Yaralı sayısı, F: Ölü sayısı.

İlgili kesime ait oluşan güvenlik değerleri hesaplandıktan sonra, her bir güvenlik değerinin ilişkilendirileceği kritik değerler hesaplanır. Bu kritik değerler, Denklem 4-6'da ifade edilen kritik kaza tekrar değeri (KR), kritik kaza tekrar oranı (KF) ve kritik eşdeğer ağırlık değeridir (KS).

$$K_R = R_{ort} + k\sqrt{\frac{R_{ort}}{M_{ort}}} + \frac{1}{2M_{ort}} \tag{4}$$

$$K_F = F_{ort} + k\sqrt{\frac{F_{ort}}{M_{ort}}} + \frac{1}{2M_{ort}} \tag{5}$$

$$K_S = S_{ort} + k\sqrt{\frac{S_{ort}}{M_{ort}}} + \frac{1}{2M_{ort}} \tag{6}$$

Bu denklemlerde kullanılan ve olasılık faktörü olarak isimlendirilen (k) değeri %99,5 güvenlik düzeyi için 2,576 alınarak işlemler yapılmaktadır. $R_{ort}, F_{ort}, S_{ort}$ ve bütün kesimler için ortalama trafik yoğunluğu (M_{ort}) değerlerinin hesaplanması Denklem 7-10'da sunulmuştur. Bu denklemlerde, (n) ülke genelinde incelenen toplam kesit adedini ifade etmektedir. Herhangi bir kesimin trafik yoğunluk değeri ise Denklem 11 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$R_{ort} = \frac{\sum R}{n} \tag{7}$$

$$F_{ort} = \frac{\sum F}{n} \tag{8}$$

$$S_{ort} = \frac{\sum S}{n} \quad (9)$$

$$M_{ort} = \frac{\sum M}{n} \quad (10)$$

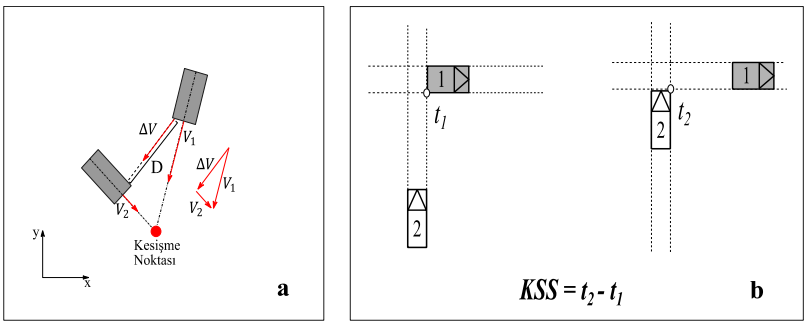
$$M = 10^{-6} \cdot 365 \cdot YOGT \quad (11)$$

Bir kesitin kaza kara noktası olarak tespiti için ise $R>K_R$, $F>K_F$ ve $S>K_S$ karşılaştırmaları yapılmakta ve her üç eşitsizliğin sağlanması halinde ilgili kesit kaza kara noktası olarak ilan edilmektedir.

Bu yöntem geçmiş kaza verilerinin bulunması halinde kazaların hangi bölgelerde toplandığına dair önemli bilgiler sunmaktadır. Fakat reaktif yöntemlerin yapısı gereği bu yöntemin uygulanabilmesi için kaza istatistiklerinin oluşmuş olması gerekmektedir. Herhangi bir kaza oluşmamış bir kesimde bu yöntem kullanılarak herhangi bir analiz yapılamaz. Diğer bir sorunlu nokta ise kabul edilen %99,5'lik anlamlılık düzeyidir. Bu yüksek değer bir kesimin kaza kara noktası olmadığı halde kaza kara noktası olarak ilan edilmesini ciddi ölçüde engellese de, aksi durum için yani kaza kara noktası olduğu halde kara nokta ilan edilmeyen noktalar olabileceğini işaret etmektedir. Bu değerin bilimsel bir yaklaşımla Türkiye karayolları için uygunluğunun analiz edilmesi isabetli olacaktır.

3. Proaktif Trafik Kaza Risk Değerlendirme Yaklaşımı

Proaktif yaklaşım ile bir karayolu kesimi veya özel bir noktanın risk değerIendirmesinin yapılmasında genellikle kaza oluşmasına sebep olacak olayların incelenmesi yapılmaktadır. Bu olaylar, bir kavşak için kırmızı ışık ihlallerinin frekansı, bir yol kesimi için hız limitlerinin aşılma sıklığı veya agresif sürücülerin sayısı olabilir. Fakat bu tür olayların sürekli gözlenmesi veya uygun ölçütlerin ne olacağının tespit edilmesi karmaşık veya yanıltıcı olabilir. Bu nedenle, araştırmacılar, "vekil olay" olarak ifade edilen trafik etkileşimlerinden elde edilen sayısal değerleri, yani Vekil Güvenlik Ölçütlerini (VGÖ), karayolu risk değerlendirme görevlerinde kullanmaya başlamıştır. Trafik akışı içindeki bir olayın vekil olay alarak isimlendirilmesi için sık gözlenmesi ve kazalar ile mantıksal bir ilişkisinin olması gerekmektedir (Chang ve diğ., 2017). Bu tanıma giren ve en popüler VGÖ'ler, Çarpışmaya Kalan Süre (ÇKS; İng: Time-to-Collision) ve Kesişim Sonrası Süre (KSS; İng: Post-Encroachment Time) olarak isimlendirilmektedir. ÇKS, yol kullanıcılarının hız ve doğrultularını değiştirmemesi halinde potansiyel bir çarpışmaya kalan süre olarak tanımlanır (Hayward, 1972). Şekil 2(a)' da iki taşıt için bu değerin hesaplanması resmedilmiştir. ÇKS değerinin "0" olması kesin çarpışma anlamına gelirken, belirli bir eşik değerinden daha küçük VGÖ değerlerinin sık gözlenmesi durumunda, kaza oluşma riskinin arttığı kabul edilmektedir.



Şekil 2. (a) Çarpışmaya Kalan Süre; **(b)** Kesişim Sonrası Süre.

Kesişim Sonrası Süre (KSS), Şekil 2(b)'de görüldüğü gibi, yörüngeleri kesişen iki yol kullanıcının, kesişim noktasından geçiş zamanları arasındaki farkla ölçülür. Yine ÇKS'ye benzer biçimde, bir kesim içinde küçük KSS değerlerinin sık gözlenmesi, bu kesimin kaza riski barındırdığını işaret etmektedir.

Görüntü alma ve bu görüntülerden ölçüt çıkarma yeteneğinin gelişen teknolojilerle gelişmesi sayesinde, ÇKS ve KSS dışında, yavaşlama ivmesi (Mahmud ve diğ., 2017), şerit değiştirme sıklığı (Park ve diğ., 2018) gibi olaylara bağlı VGÖ'ler de literatürde bulunmakta ve bu konuda yeni çalışmalar yapılmaktadır. Bu ölçütlerin elde edilmesi son yıllarda gelişen teknoloji sayesinde kolaylaşmış olsa da, karayolu risk değerlendirmesinde kullanılması için aşağıda kısaca açıklanan konularda çalışmaların yapılarak bilgi derinliğinin arttırılması gerekecektir.

Vekil olay kavramını netleştirilmesi gereklidir; Bir olayın vekil olay olarak kabul edilmesi için sahadan kısa zaman periyodunda içinde gözlenebilmesi, çarpışmalarla mantıksal bir ilişkisinin olması, kazaya neden olan olaylar dizisinin bir parçası olması gerektiği belirtilmiş olsa da (Tarko, 2018b), standartlaştırılmış ve doğrulanmış kriterlerin belirlenmesine halen ihtiyaç duyulmaktadır.

Çarpışma şiddetini vekil olaylar yardımıyla tahmin edecek metotlar geliştirilmelidir; Güvenlik değerlendirme analizlerinde çarpışma frekansı kadar, şiddeti de özellikle ölümlü kazaların azaltılması için gerekli olmaktadır. Kaza şiddetinin yüksek olduğunun tespiti halinde, hızların azaltılması, görüş uzunluklarının iyileştirilmesi, uygun işaret veya kontrol sistemlerinin uygulanması gibi kaza şiddetini azaltmaya yönelik önlemelerin alınması öncelikli olacaktır.

VGÖ'lerin güçlü ve zayıf yönleri ve en uygun oldukları durumların tespit edilmelidir; Farklı durum ve koşullar altında kullanılacak VGÖ tipinin doğru seçilmesi analiz kalitesini arttıracaktır. Literatürde bu konuda yapılmış geçmiş çalışmalar (Johnsson ve diğ., 2018; Mahmud ve diğ., 2017; Zheng ve diğ., 2014) bulunmasına rağmen konu hakkında üstünde mutabık olunan bir yaklaşımın mevcut olmadığı anlaşılmaktadır. Diğer taraftan, belirli bir yaklaşım öne sürülse dahi, ülkelerin farklı trafik koşulları olması göz önüne alındığında, geliştirilen bir yaklaşımın diğer ülkelere doğrudan uygulaması sakıncalı olabilir. Bu nedenle, proaktif sistemlerin Türkiye'de kullanılmasına karar verilmesi halinde, Türkiye trafik koşulları için uygun VGÖ'lerin tespiti, geliştirilmesi ve test edilmesi gerekli olacaktır.

Eşik değerlerin farklı koşullar için uygun değerleri tespit edilmelidir; Bir olayın vekil olay olarak adlandırılması için ölçülen VGÖ değerinin önceden belirlenen bir eşik değerin altında ve üstünde olması şartı aranmaktadır. Tarko (2018a), bu değerin hatalı seçilmesi halinde analizin geçersiz sonuçlar vereceği konusunda uyarmaktadır.

Eşik değer için düşük değerler kullanıldığında çarpışma olasılığı yüksek olaylar kolaylıkla tespit edilmekte fakat bu durumda trafik akışı içinde tehlike arz edebilecek olaylar değerlendirme dışı kalabilmektedir. Yüksek seçilmesi halinde ise, aslında değerlendirme dışı kalması gerekli olaylar analizlere katılmaktadır. Bu durumda ise yol kesiminin aslında olduğundan daha yüksek risk içerdiği gibi hatalı sonuçlara ulaşılmaktadır. Bu sebeple, Ülkemiz trafik koşulları için uygun eşik değerlerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli çalışmaların yapılması gerekecektir. Bu çalışmalar sonucunda, eşik değerin tespit edilmesi için bir metot veya yol kesimleri için belirli eşik değer aralıkları önerilebilir. Böylece, proaktif sistemin eşik değer kaynaklı hatalı değerlendirme yapma olasılığı azaltılabilir.

4. Yaklaşımların Karşılaştırılması ve Türkiye için Proaktif Sistemin Uygulanabilirliği

Reaktif sistem kazalar oluştuktan sonra çarpışma uygulanabilen bir yöntem iken proaktif sistemler çarpışma verisine ihtiyaç olmadan risk değerlendirmesi yapabilmekte olup, bu özelliği yaklaşımın en önemli avantajıdır. Diğer taraftan yöntemin Dünyada, proaktif risk değerlendirme uygulamaları son zamanlarda hızlansa da, açığa kavuşturulması gerekli çeşitli konuları bulunmaktadır. Tablo 1'de bu konular iki yaklaşım karşılaştırılarak sunulmuştur.

Tablo 1. Proaktif ve Reaktif risk değerlendirme yaklaşımlarının farklı yönlerden karşılaştırılması

Konu	Proaktif	Reaktif
Risk Ölçütü	• Belirlenen vekil olayların analizinden elde edilen vekil güvenlik ölçütleri kullanır. • Vekil olaylar, çarpışmalardan çok daha sık gözlendiğinden ihtiyaç duyulan veri, reaktif yaklaşıma göre çok kısa sürede elde edilebilir.	• Çarpışma verilerinin çeşitli analitik ve istatistik yöntemlerle analizi sonucunda elde edilen değerler kullanılır. Bunlar arasında kaza sayısı frekansı, ölü ve yaralı sayıları bulunmaktadır. • Kullanılan parametrelerin Ülkemize uygunluğu için ileri çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.
Veri Toplama	• Saha yerleştirilen kameralarla veya insansız hava araçları yardımıyla trafik akış görüntüleri veri toplanmaktadır. • Geliştirilen bilgisayar programları ile görüntülerin analizi yapılmaktadır. • Büyük ölçüde veri işlenme görevi gerektiğinden güçlü bilgisayar donanımlarına ihtiyaç duyulur.	• Güvenlik güçlerinin hazırladığı çarpışma raporlarından gerekli veri toplanır. • Çarpışmanın oluşmasına neden olan etkenlerin tespiti için detaylı ve iyi hazırlanmış raporlara ihtiyaç duyulur. • Kaza raporlarının yetkin kişiler tarafından hazırlanmaması halinde olumsuz etkilenir. • Önlem alma kararı için çarpışma verilerinin oluşması uzun süreler alır.
Analiz Detayı	• Herhangi bir yol kesim veya düğümünün analizi detaylı olarak gerçekleştirilebilir ve gerekli önlemler özel olarak tespit edilebilir.	• Genellikle kaza verileri düşük detay barındırdığından kazaların yoğunlaştığı bölgelerin tespiti yapılabilir.

		• Bu bölgelerde ihtiyaç duyulan önlemler için, yeniden detaylı inceleme gerekebilir.
Diğer Konular	• Proaktif yaklaşımın temelleri 1970'li yıllara dayansa da uygulama tarafında çözümlenmesi gerekli konular mevcuttur. • Yöntemin Ülkemizde uygulanabilmesi için eğitilmiş personel ve ileri araştırmalar gereklidir.	• Uzun yıllardır kullanılan bir yaklaşım olduğu için risk değerlendirme süreçleri büyük oranda açığa kavuşmuş durumdadır. • Yöntemin geliştirilmesi ve Ülkemiz şartları için özelleştirilmesi için ileri çalışmalara halen ihtiyaç var.

Tablo 1'den anlaşılmaktadır ki, her iki yöntemin çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Proaktif yaklaşımın en önemli avantajı hızlı bir analiz yapılması iken, reaktif yaklaşım uzun yıllardır kullanılmasının getirdiği avantaja sahiptir. Bu durumda, her iki yöntemin avantajlarını kullanabilecek hibrit bir yöntemin geliştirilmesi veya proaktif yöntem sonuçlarının reaktif sistemlerle yıllar içinde doğrulayacak ve proaktif sistem performansını gidererek iyileştirecek çalışmalar yapılabilir. Bu çalışmalar uzun zaman periyotlarına ihtiyaç duysa da, giderek artan isabet oranı sayesinde makul bir zaman periyodu içinde yol risk değerlendirmeleri için kullanılacak önemli bir araç haline gelmesi kuvvetle muhtemeldir.

Proaktif yaklaşımın uygulanması için başlangıçta sahadan elde edilen görüntülere ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllarda Türkiye'de akıllı ulaşım sistemlerine yapılan yatırımlar ciddi düzeyde artış göstermiş ve bu sistemler kapsamında önemli karayolu noktalara kamera ve detektörler yerleştirilmiştir. Bu hazır donanımlar sayesinde elde edilen veya daha önceden elde edilen görüntüler yardımıyla analizler yapılabilir. Kaldı ki kamera olmayan yol kesimleri için uygun görüntü alma sistemleri geçici olarak yerleştirilebilir veya insansız hava araçları kullanılarak bu görüntüler temin edilebilir.

Geliştirilecek olan proaktif sistemde hangi vekil olayların kullanılacağı ve parametrelerin ne olması gerektiği konusunda çalışmaların yapılması gerekecektir. Bu çalışmalara erken başlanması sayesinde Türkiye, karayolu risk düzeylerini trafik kazaları oluşmadan belirleme kabiliyetine sahip bir sisteme sahip olacaktır. Türkiye'de bu bilimsel araştırmaları yürütebilme kabiliyetine sahip bilim insanları ve trafik alanında uzman kişiler bulunmaktadır. Bu bilgilerden yola çıkarak, yetkili kurum ve kuruluşların öncü rol üstlenmesi sayesinde Türkiye için özelleştirilmiş proaktif risk değerlendirme yaklaşımını kullanan sistemlerin geliştirilmesinin önünde ciddi bir engel bulunmadığı anlaşılmaktadır.

5. Sonuç

Trafik kazaları bütün Dünyada öncelikli sorunlardan biridir. Ülkemizde bu problemin çözümü için yol kullanıcılarının eğitimi, yol standartlarının iyileştirilmesi ve etkin kontrollerin yapılmasının yanında, yol kesimlerinin risk analizinin hızlı biçimde yapılması gerekmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü, risk analizleri için reaktif yöntemler kullanmakta fakat bu yöntemin uygulanması için geçmiş çarpışma verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer taraftan proaktif yöntemlerle geçmiş çarpışma verisine ihtiyaç duymadan risk analizleri gerçekleştirilebilir ve riskli bölgelerde alınacak önlemlerle potansiyel çarpışmaların önüne geçilebilir. Bu çalışmada KGM tarafından kullanılan reaktif yöntem hakkında bilgiler verilmiş ve proaktif yöntemle karşılaştırılarak tartışılmıştır. Halen proaktif yöntemlerle ilgili çeşitli araştırma problemleri bulunmakla birlikte, bu sorunların ülkemiz özelinde çözümünü amaçlayan çalışma ve proje sayılarının artmasının önünde önemli bir engelin olmadığı anlaşılmaktadır. Bu araştırmaların kısa sürede sonuç vereceği düşünüldüğünde, proaktif risk değerlendirme sistemlerinin hayata geçirilmesi sayesinde ülkemiz alternatif risk değerlendirme yaklaşımına sahip olabilir. Dahası iki yaklaşımının birbirini destekleyeceği hibrit yaklaşımların geliştirilmesinde sayesinde riski bölge tespit görevinin gerçekleşme hızı ve başarı oranı önemli ölçüde artacaktır. Bu sonuçlar çerçevesinde alınacak önlemlerle de kaza sayıları önemli ölçüde azaltılabilecektir.

Referanslar

Amundsen, F. H., & Hyden, C. (1977). Proceedings of first workshop on traffic conflicts. Oslo, TTI, Oslo, Norway and LTH Lund, Sweden, 78.

Badi, I., & Bouraima, M. B. (2023). Development of MCDM-based Frameworks for Proactively Managing the Most Critical Risk Factors for Transport Accidents: A Case Study in Libya. Spectrum of engineering and management sciences, 1(1), 38-47.

Chang, A., Saunier, N., & Laureshyn, A. (2017). Proactive methods for road safety analysis. SAE International, 5. http://papers.sae.org/wp-0005/

Dimitrijevic, B., Khales, S. D., Asadi, R., & Lee, J. (2022). Short-term segment-level crash risk prediction using advanced data modeling with proactive and reactive crash data. Applied Sciences, 12(2), 856.

Du, W., Dash, A., Li, J., Wei, H., & Wang, G. (2023). Safety in Traffic Management Systems: A Comprehensive Survey. Designs, 7(4), 100.

EGM.(2021). 2021-2030 Karayolu Trafik Güvenliği Strateji Belgesi. https://www.trafik.gov.tr/2021-2023-karayolu-trafik-guvenligi-strateji-belgesi-ve-2021-2023-karayolu-trafik-guvenligi-eylem-plani

Elvik, R., Vaa, T., Hoye, A., & Sorensen, M. (2009). The Handbook of Road Safety Measures. Emerald Group Publishing.

FHWA. (2006). FHWA Road safety audit guidelines. In Fhwa-Sa-06-06.

Hassanpour, S., & Hadadi, F. (2022). Prioritization of infrastructure factors affecting on the safety of two-lane roads using proactive and reactive methods (Case study: Ahar-Tabriz road). Amirkabir journal of civil engineering, 54(4), 1419-1440.

Hayward, J. C. (1972). Near miss determination through use of a scale of danger.

Hydén, C. (1987). The development of a method for traffic safety evaluation: The Swedish Traffic Conflicts Technique. Bulletin Lund Institute of Technology, Department, 70.

Johnsson, C., Laureshyn, A., & De Ceunynck, T. (2018). In search of surrogate safety indicators for vulnerable road users: a review of surrogate safety indicators. Transport Reviews, 38(6), 765–785.

Kar, P., Venthuruthiyil, S. P., & Chunchu, M. (2023). Assessing the crash risk of mixed traffic on multilane rural highways using a proactive safety approach. Accident Analysis & Prevention, 188, 107099.

Laureshyn, A., Svensson, Å., & Hydén, C. (2010). Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data: Theoretical framework and first implementation. Accident Analysis & Prevention, 42(6), 1637–1646.

Mahmud, S. M. S., Ferreira, L., Hoque, M. S., & Tavassoli, A. (2017). Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review of recent developments and research needs. IATSS Research, 41(4), 153–163.

Mishra, S., Rajendran, P. K., Vecchietti, L. F., & Har, D. (2023). Sensing accident-prone features in urban scenes for proactive driving and accident prevention. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.

Noh, B., & Yeo, H. (2022). A novel method of predictive collision risk area estimation for proactive pedestrian accident prevention system in urban surveillance infrastructure. Transportation research part C: emerging technologies, 137, 103570.

Park, H., Oh, C., Moon, J., & Kim, S. (2018). Development of a lane change risk index using vehicle trajectory data. Accident Analysis & Prevention, 110, 1–8.

Tarko, A. P. (2018a). Estimating the expected number of crashes with traffic conflicts and the Lomax Distribution–A theoretical and numerical exploration. Accident Analysis & Prevention, 113, 63–73.

Tarko, A. P. (2018b). Surrogate measures of safety. In Safe mobility: challenges, methodology and solutions (Vol. 11, pp. 383–405). Emerald Publishing Limited.

Zheng, L., Ismail, K., & Meng, X. (2014). Traffic conflict techniques for road safety analysis: open questions and some insights. Canadian Journal of Civil Engineering, 41(7), 633–641.

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development
UMAGD, (2015) 15(3), s257-s269.
10.29137/umagd.1364512
Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:3 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue
Araştırma Makalesi / Research Article

Bilinmeyen PLC Programının Makine Öğrenmesi Yöntemleriyle Taklit Edilmesi

Imitating of an Unknown PLC Program with Machine Learning Methods

Faruk Ulamış*[1], Yasin Yüce [2], Bülent Cesur[3]

[1]*Kırıkkale Üniversitesi Hacılar Hüseyin Aytemiz MYO, 71010 Kırıkkale, TÜRKİYE*
[2]*Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 58020 Sivas, TÜRKİYE*
[3]*Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 06520 Ankara, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 22/09/2023 **Kabul / Accepted**: 31/10/2023 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Öz
Programlanabilir Mantık Denetleyiciler (PLC) uzun yıllardır endüstrinin hemen her alanında kullanılmaktadır. Kullanılan bu PLC' lerin eskimesi, bozulması veya şifreyle korunması gibi durumlarda PLC programlarının yedeklenmesi mümkün olmamaktadır. Herhangi bir arıza sonucu PLC programının silinmesi durumunda veya PLC' nin yenilenmesi ihtiyacı oluştuğunda programın yeniden yazılması gerekir. Böyle bir durumunda sistemin çalışma adımlarının detaylı bir şekilde bilinmesi gerekir ve program yazılması esnasında atlanacak bir adım sistemin tamamında çok büyük problemlere sebep olabilir. Bu çalışmada, çeşitli makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak PLC içerisinde çalışan ve bilinmeyen bir programın çalışma adımlarının taklit edilmesi işlemi yapılmıştır. Bunun için ilk olarak bir veri günlüğü oluşturularak PLC' nin giriş ve çıkış bilgileri kaydedilmiştir. Daha sonra bu giriş-çıkış verileri Makine Öğrenmesi algoritmaları ile eğitilmiştir. Eğitilen bu algoritmaların giriş veri setine karşılık verdiği çıktıları, PLC çıkışlarıyla paralel olarak izlenmiştir. Makine öğrenmesi algoritması olarak karar ağacı, k-en yakın komşu ve rastgele orman algoritmaları kullanılmıştır. Algoritmaların performans ölçüm metriği olarak doğruluk puanı (accuracy score) kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonunda Rastgele Orman algoritmasının daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler
"Programlanabilir Mantık Denetleyiciler, Makine Öğrenmesi, Bilinmeyen PLC Programının Modellenmesi"

Abstract
Programmable Logic Controllers (PLC) have been used in almost every field of industry for many years. It is not possible to back up PLC programs in cases such as aging, deterioration or password protection of these PLCs. If the PLC program is deleted as a result of any malfunction or when the PLC needs to be replaced, the program must be rewritten. In such a case, the working steps of the system must be known in detail, and a step that is skipped during the writing of the program can cause major problems in the entire system. In this study, various machine learning algorithms are used to imitate the execution steps of an unknown program running in a PLC. For this purpose, a data log was first created and the input and output information of the PLC was recorded. Then, these input-output data were trained with Machine Learning algorithms. The outputs of these trained algorithms in response to the input data set were monitored in parallel with the PLC outputs. Decision tree, k-nearest neighbor and random forest algorithms were used as machine learning algorithms. Accuracy score was used as the performance measurement metric of the algorithms. At the end of the studies, it was observed that the Random Forest algorithm gave better results than the Machine Learning algorithms.

Key Words
"Programmable Logic Controller, Machine Lerning, Modeling of an Unknown PLC Program"

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

1. Giriş

Sanayi devriminin başlaması ile birlikte insan gücünün yerini alan ve üretimi hızlandıran çok çeşitli makineler geliştirilmiştir. Üretilen bu makineler için ortaya çıkan ilk problem otomatik çalışma ihtiyacı olmuş ve bu ihtiyaç röleli kontrol devreleriyle (Relay Ladder Logic -RLL) çözülmüştür (Erikson, 1996). Rölelerin açık ve kapalı kontaklarının kullanılması ile kurulan kontrol devreleri çok uzun yıllar endüstrinin çeşitli alanlarında kullanılmıştır (W. Bolton, 2015). Otomatik kontrol ile çalışan cihazlarda büyük bir kolaylık sağlayan RLL' li sistemler, özellikle birkaç farklı çalışma moduna sahip makinelerde, her çalışma modu için RLL devrelerinin tamamının değiştirilmesi gerekliliği bu sistemi çok dezavantajlı bir hale getirmiştir. Bu durum 1960 lı yılların sonunda programlanabilir mantık denetleyicilerin (PLC) üretilmesiyle son bulmuştur (L de MBA Dib, 2017). PLC ile kurulan devreler RLL ile kurulan kontrol devreleriyle karşılaştırıldığında önemli avantajlarının olduğu görülmüştür. Bu avantajlardan bazıları;

- Kablo kullanımı %50 den fazla olacak şekilde azalmıştır,
- Zamanlayıcı, sayıcı gibi ekstra ekipmanların kullanılmasına gerek kalmamıştır,
- Güç tüketimi önemli ölçüde azalmıştır,
- Kontrol akışını değiştirilmesi gerektiği durumlarda tüm sistemin değişmesine gerek kalmamıştır,
- Kötü çevresel koşulların çalışan sistem üzerindeki etkisi azalmıştır,
- Operasyon hızı milisaniyeler seviyesine düşmüştür. (Zimmerman, 2008)

PLC, röleli kontrol sistemlerindeki "merdiven diyagramı" mantığını taklid eden, bilgisayar tabanlı ve tek işlemcili elektronik ekipmanlardır (A. Rullan, 1997). İlk olarak Dick Morley ve arkadaşları tarafından 1968 yılında üretilmiştir (B.C. Brusso, 2018). Ortaya çıktığı ilk günden beri yoğun bir şekilde kullanılan PLC' ler günümüzde de endüstrideki otomatik kontrol sistemlerinin temel ekipmanıdır (R. Bayındır, & Y. Cetinceviz, 2011). Endüstriyel otomasyonun temelini oluşturan PLC' ler kullanıldıkları sistemlerde üç temel işlevi yerine getirir. Bunlar; otomasyonu yapılan sistemin süreçlerini izlemek ve kontrol etmek, gerekli yerlerden ölçüm alma ve test etme ile ilgili görevleri yerine getirmek ve son olarak sürekli çalışan sistemlerde süreçleri birbirini takip edecek şekilde yürütmektir (M. Dobosz, 2020).

PLC'ler, bahsi geçen bu üç temel işlevi yerine getirmek için çalışma akışına ve mantığına dayalı olarak karar vermesi için ihtiyaç duyduğu verileri sensörler ve diğer giriş ekipmanları aracılığıyla alır. Bu giriş ekipmanlarından aldıkları sinyalleri, içerisinde programa uygun olacak şekilde peryodik taramalar ile kontrol ederek çıkış elemanlarını aktif eder ve bu işlemleri sürekli döngüler şeklinde tekrar ederek girişlerin durumuna göre çıkışların durumunu günceller (Özerdem, 2016) Bu kullanım şekliyle düşünüldüğünde hem belleğini hemde giriş-çıkış verilerini işleyen bir "gömülü sistem" olarak tanımlanabilir (J.I. Lee, 2002).

PLC programlama için çeşitli programlama dilleri mevcuttur. Bu programlama dillerinin standart hale getirilmesi için ilk olarak Aralık 1993'te IEC 61131 açık uluslararası standart geliştirilmiştir. Mevcutta Şubat 2013'te yayınlanan 3. baskı bulunmaktadır (B.G. Silva & M. De Sousa, 2016). Bu programlama dilleri seti, endüstri tarafından geniş çapta benimsenmiştir ve endüstriyel otomasyon sistemlerinin çoğu bu dilleri temel almaktadır (D. Soliman, 2012). IEC standardı üç grafiksel ve iki metinsel programlama dili standardı tanımlar. Bunlar; Merdiven Diyagramı (Ladder Diagram) (LD), Fonksiyon Blok Diyagramı (Function block diagram) (FBD), Komut Listesi (Instruction list) (IL), Yapılandırılmış Metin (Structured text) (ST), Sıralı Fonksiyon Tablosudur (Sequential function chart) (SFC).

PLC içerisine yazılan programlar çeşitli şekillerde yazılabilmesine rağmen en çok kullanılan yöntem "Merdiven Diyagramı" (LD) yöntemidir (Liu, J., & Darabi, H., 2002). LD, röleli kontrol sistemleriyle yapılan devrelere çok benzemektedir. Bu benzerlikten dolayı, otomatik kontrolün temelini oluşturan röleli kontrolden LD' ye geçiş çok kolay olmaktadır. Bunun yanında PLC' nin PC tabanlı bir ekipman olmasından dolayı, PLC içerisine çeşitli komutlar entegre edilerek program yazılmasının kolaylaştırılması sağlanmıştır. PC tabanlı olması ve program yazmayı kolaylaştıracak komutlar kullanılmasına rağmen uzun bir programın anlaşılması ve hata ayıklaması gibi işlemlerin yapılması zor olmaktadır (Guasch, A., 2000). Çünkü genellikle LD ile yazılan programlarda, program kodlarının tamamı tek bir ekran üzerinden görüntülenemez. Sistemin aksadığı noktanın tespit edilmesi için tüm program satırları adım adım kontrol edilmek durumunda kalınabilir. Bu durum ise arıza durumlarının uzamasına sebep olur. Bu ise işletme maliyetlerini artıran bir durumdur.

Hata ayıklama işleminin daha kolay olması için Durum Diyagramları (Otto, H. P., & Rath, G. (1996), Akış Şemaları (Lobov, A., 2003), Belirleyici Otomatlar (Carayol, A., & Nicaud, C., 2012), Petri Ağları (Kaid, H., 2020) vb gibi yöntemler kullanılır. Bu yöntemler sayesinde, LD ile programı yazılmış olan PLC programlarının görsel bir şekilde görülmesi sağlanır ve bu durum hata-arıza arama gibi işlemleri oldukça kolaylaştırır. Ayrıca bu yöntemler ayrık olayları içerdiği için, programın akış işlemi görselleştirildikten sonra LD' ye geçiş oldukça kolay olmaktadır. Her ne kadar LD ile yazılmış bilinen bir PLC programından bahsi geçen yöntemler kullanılarak programın akışının görselleştirilmesi sağlanabilse de bilinmeyen bir PLC programının giriş ve çıkışlarının izlenerek akış şemasının yazılması, program içerisinde özellikle sayıcı ve zamanlayıcı varsa oldukça zorlayıcı bir durumdur ve literatürde bu konularla ilgili çalışmalar devam etmektedir.

Kullanım kolaylıkları, güvenilir çalışma şekilleri ve her tür endüstriyel ortama uyum sağlayabilme özelliklerinden dolayı uzun yıllardır kullanılan PLC' ler; günümüzdeki internet tabanlı sensörlerle ve "büyük veri" sistemlerine olan uyumluluğundan dolayı Endüstri 4.0 gibi sistemlerinde vazgeçilmez bir ekipmanı olmaya devam edecektir (Wan, 2016). Bunun yanında endüstriye 1960' lı yıllarda girmesi ve yıllar içerisinde kullanılan yazılımların, dokümantasyonların ve işletim sistemlerinin değişmesi gibi sebeplerden dolayı belirli zaman aralıklarında güncellenme ihtiyacı duyulmaktadır (Barthelmey, 2014). Yazılımların eskimesi, işletim sistemlerinin yenilenmesi gibi sebepler PLC programına ulaşmayı engellemektedir. Bunun yanında bazı PLC' lerin programlarına şifre konulması veya işlemcinin zarar görmesi gibi durumlarda da ulaşılamamaktadır. Bu durumlarda sistemin programının yeni baştan yazılması gerekmektedir.

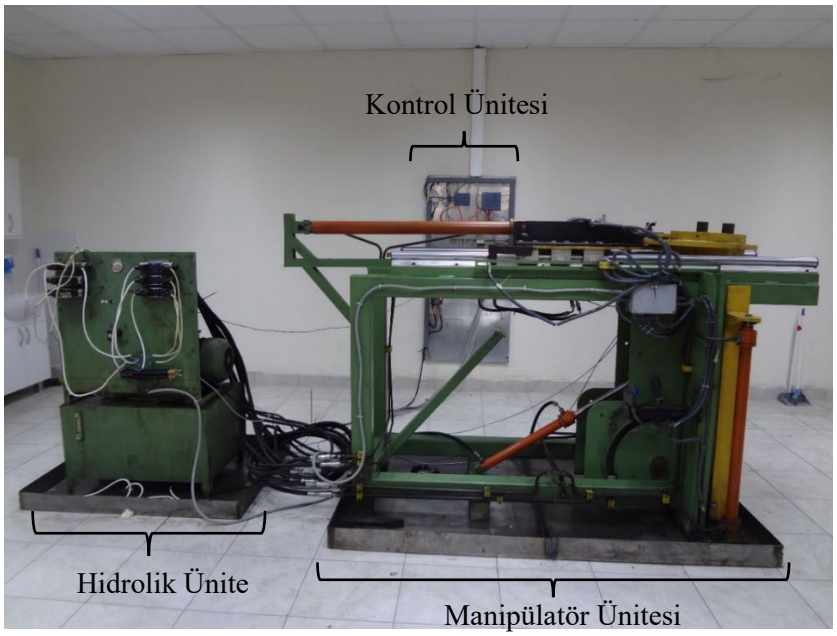
Bu çalışmada, PLC içerisinde çalışan ve akış şekli bilinmeyen bir programın çalışma adımlarının taklit edilmesi için makine öğrenmesi modelleri kurulmuştur. Bu bağlamda ilk olarak bir veri günlüğü oluşturularak sistemin normal çalışması esnasındaki PLC' nin giriş ve çıkış verileri kaydedilmiştir. Elde edilen giriş verilerine karşılık gelen çıkış verileri çeşitli makine öğrenmesi algoritmasından geçirilmiş ve giriş durumlarına karşılık gelen çıkış değerlerinin öğrenilmesi sağlanmıştır. PLC programında analog sensör ve aktüatörler kullanılmamış; sadece dijital giriş-çıkış elemanları kullanılmıştır. PLC çıkışı 0 veya 1 olacağı için makine öğrenmesinde "sınıflandırma yöntemleri" üzerinde durulmuştur. Ayrıca kullanılan deney düzeneği üzerinde 8 giriş ve 8 çıkış elemanı olduğu için çoklu sınıf-çoklu çıkış sınıflandırmaya uygun olan karar ağacı, k-en yakın komşu ve rastgele orman algoritmaları uygulanmıştır. Yapılan çalışmanın uygulanması için, hidrolik bir presin manipülatör ünitesi test düzeneği olarak kullanılmıştır. Test düzeneği üzerinde çeşitli zaman dilimlerinde veriler alınarak makine öğrenmesi algoritması verileri elde edilmiştir. Test düzeneği ve sistemin çalışması için kullanılan makine öğrenmesi algoritması ile ilgili detaylar github[1]' da internete açık olarak yayınlanmıştır.

2. Materyal

Endüstriyel ortamlarda yüksek sıcaklık veya ağırlıktaki malzemelerin taşıma işlemleri genellikle endüstriyel robotlar veya manipülatörler vasıtasıyla yapılır. Robotlar, gövde boyutlarına oranla uzak bir mesafeye taşıma işlemi yaparlarken; manipülatörler taşıma işlemini birden fazla eklemin birbirine bağlandığı kollar aracılığıyla yapar (Sönmez, 2005). Manipülatörlerde sistemin yük gereksinimleri göz önüne alınarak; servo motorlar, hidrolik sistemler veya pnömatik sistemler kullanılabilir. Bu sistemlerin birbirleri üzerinde çeşitli avantajları olsa da özellikle yüksek ağırlıklı ekipmanların taşınması genellikle hidrolik sistemler vasıtasıyla gerçekleşir. Bu çalışmada hidrolik sistemle çalışan bir manipülatör, test ekipmanı olarak kullanılmıştır. Kullanılan test ekipmanı ile ilgili detaylar ilerleyen kısımlarda verilmiştir.

2.1. Tasarlanan Test Düzeneği

Tasarlanan test düzeneği Şekil 1' de görüldüğü gibidir. Bu deneysel sistem; sıcak presleme işlemi yapılan hidrolik presler arasında malzeme taşıma görevini yapan hidrolik bir ekipmandan çıkartılarak yenilenmiş ve deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere yeniden düzenlenmiştir. Bu sistemde bulunan giriş ve çıkışlar Tablo 1' de görüldüğü gibidir.



Şekil 1. Tasarlanan Test Düzeneği

[1] https://github.com/mesleki2017/plc-laboratuvar/blob/master/colab/sep_02.ipynb

Tablo 1. Kullanılan PLC' nin Giriş-Çıkış Adresleri

Sıra No	Kayıt İsmi	Açıklama	PLC Veri tipi	PLC Adresi
1	Araba İleride	Taşıyıcı Araba Geride	Dijital Giriş	I0.0
2	Araba Geride	Taşıyıcı Araba İleride	Dijital Giriş	I0.1
3	Çene-açık	Tutma Çenesi Açık	Dijital Giriş	I0.2
4	Çene-kapalı	Tutma Çenesi Kapalı	Dijital Giriş	I0.3
5	Devirme-yukarıda	Devirme Tertibatı Yukarıda	Dijital Giriş	I0.4
6	Devirme-asağıda	Devirme Tertibatı Aşağıda	Dijital Giriş	I0.5
7	Kaldirici-asağıda	Kaldırma Tertibatı Aşağıda	Dijital Giriş	I0.6
8	Kaldirci-yukarıda	Kaldırma Tertibatı Yukarıda	Dijital Giriş	I0.7
9	Kaldiric-iyukari	Kaldırma Tertibatı Yukarı	Dijital Çıkış	Q0.0
10	Kadirici-asağı	Kaldırma Tertibatı Aşağı	Dijital Çıkış	Q0.1
11	Araba-ileri	Taşıyıcı Araba İleri	Dijital Çıkış	Q0.2
12	Araba-geri	Taşıyıcı Araba Geri	Dijital Çıkış	Q0.3
13	Çene-kapa	Tutma Çenesi Kapama	Dijital Çıkış	Q0.4
14	Çene-aç	Tutma Çenesi Açma	Dijital Çıkış	Q0.5
15	Devirme-yukari	Devirme Tertibatı Yukarı	Dijital Çıkış	Q0.6
16	Devirme-asağı	Devirme Tertibatı Aşağı	Dijital Çıkış	Q0.7

Otomatik kontrol ile yapılan işlemler birbirini takip eden operasyonlar şeklinde devam eder. Bir işlemi sona erdiren bir olay, bir diğer işlemin başlangıcını oluşturur. Böylece birbirinden bağımsız kesikli olaylar dizisi, birbiri ardınca devam eden sıralı olaylar şeklinde sistemin dinamik davranışını belirler (Glavaš, 2021). Bu çalışmada kullanılan test düzeneği, hidrolik ünite üzerinde bulunan yön valfleriyle kesikli olaylar dizisi şeklinde kontrol edilmektedir. Yön valfleri PLC tarfından gönderilen çıkış sinyaller vasıtasıyla pistonlara hareket vermektedir. Ayrıca her bir hareketin sonunda o işleme ait bir giriş sensörü bulunmaktadır. Bu giriş sensörleri sayesinde yapılması gereken hareketin tamamlandığı ve diğer harekete geçilebileceği bilgisine ulaşılmaktadır. Bu bağlamda test ekipmanı hem tek bir döngü ile çalışmaya hemde otomatik olarak sürekli çalışmaya uygun bağımsız kesikli olaylar dizisine uygundur. Sistem tahriki güçlü bir hidrolik ünite aracılığıyla verildiği için, sistemin algoritmasının doğru sırayla çalışması çok önemlidir. Çalışma sırasındaki herhangi bir sıra değişikliği tüm sistem için onarılması zor bir mekanik arızasına sebep olabilir. Tasarlanan test düzeneği için çalışma durum diyagramı Şekil 2'de görüldüğü gibidir.

Tasarlanan test düzeneği, Şekil 1'de görüldüğü gibi üç kısım üzerinde incelenebilir. Bu ünitelerden manipülatör ünitesi sistemin temel işlevine uygun bir şekilde mekanik olarak tasarlanmış, tüm sistemin kontrolü ise PLC tabanlı bir kontrol ünitesi tarafından kontrol edilmektedir.

2.1.1. Manipülatör ünitesi

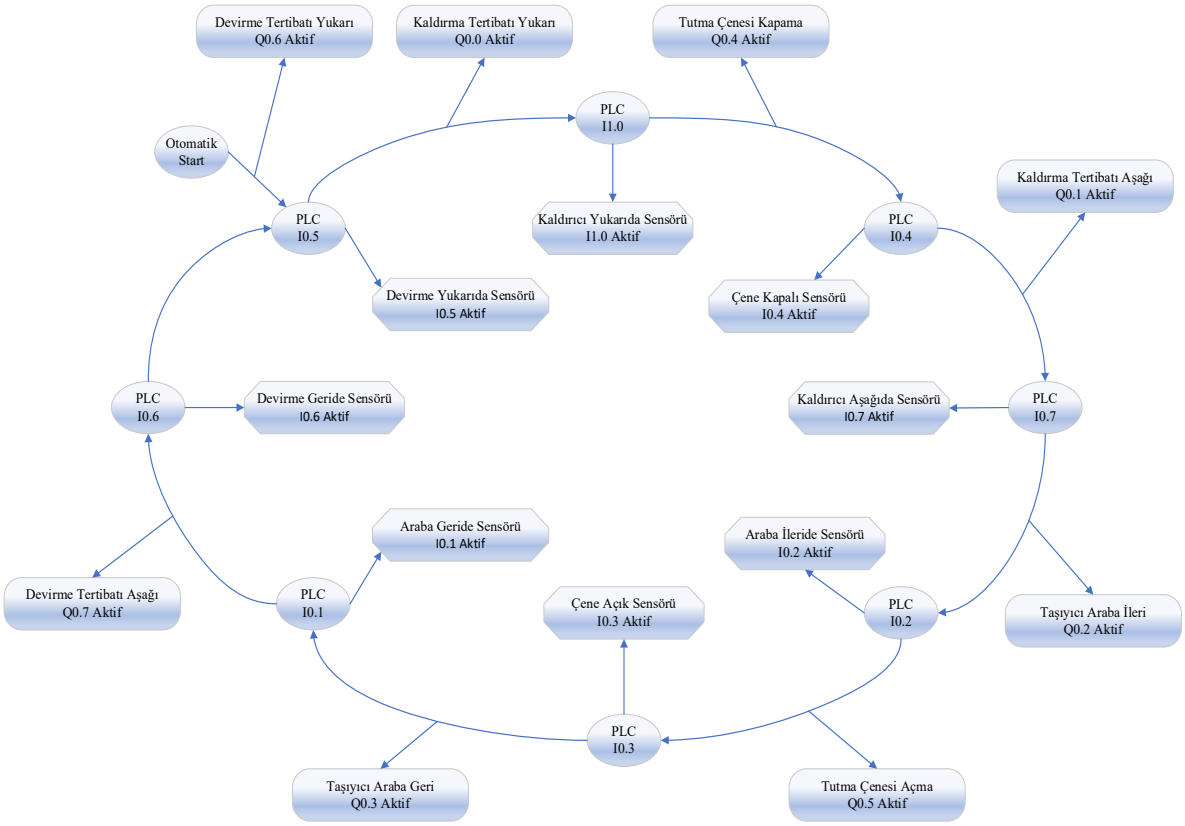
Bu ünite üzerinde 5 adet hidrolik piston, bu pistonların sınırlarının kontrol edildiği 8 adet endüktif sensör, bir adet ileri hareketin kontrol edildiği incremental lineer encoder (lineer cetvel), bir adet aşağı yukarı hareketin kontrol edildiği analog sınır sensörü (analog cetvel) bulunmaktadır. Bu sensörlerden incremental lineer cetvel ve analog sınır sensörü bu çalışma kapsamında olmadığı için program içeriside kullanılmamıştır.

2.1.2. Hidrolik ünite

Hidrolik ünite, manipülatör pistonlarının hareketleri için gerekli olan hidrolik yağın ve yön valflerinin bulunduğu bölümdür. Kontrol ünitesinden gelen komutlara göre valfler vasıtasıyla manipülatör ünitesine hareket veren pistonların kontrol edilir. Hidrolik ünite için gerekli güç, test düzeneğine eklenmiş bir adet 5.5 KW asenkron motor ile verilmektedir. Bu motorun yanında ayrıca bir adet hidrolik pompa ve 6 adet yön valfi bulunmaktadır.

2.1.3. Kontrol ünitesi

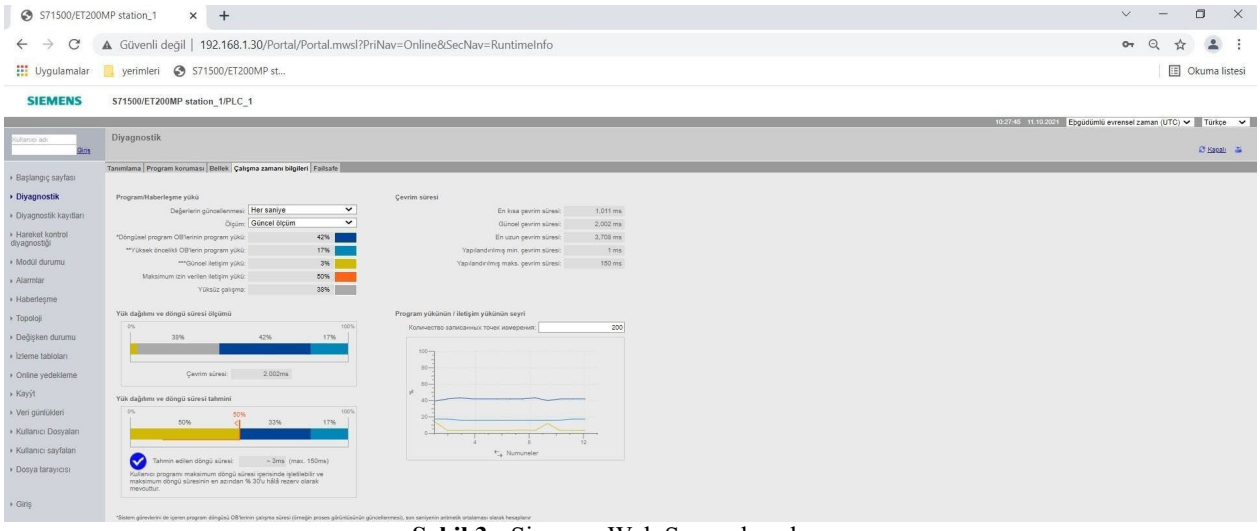
Tüm deney setinin kontrolünün yapıldığı kısımdır. Kontrol işlemi bir PLC vasıtasıyla yapılmıştır. PLC olarak S7-1215 CPU kullanılmıştır. PLC nin giriş ve çıkışlarının bilgisinin veri günlüğünde oluşturulması için bir adet hafıza kartı bulunmaktadır. Çalışma esnasında hafıza kartına kaydedilen giriş-çıkış verileri .csv uzantılı olarak bilgisayara alınmıştır.



Şekil 2. Sistemin çalışma adım diyagramı

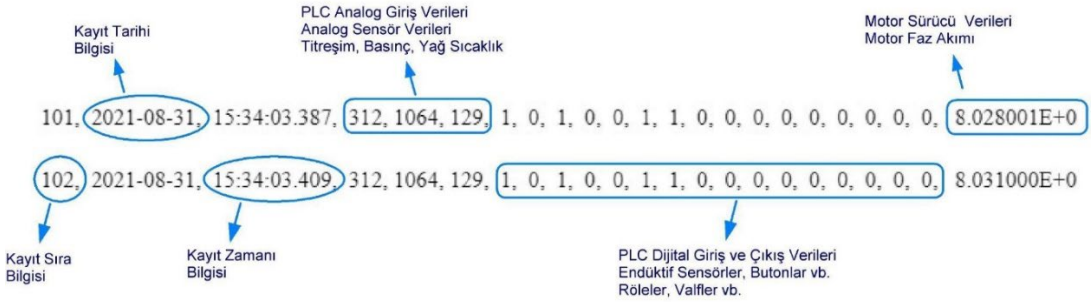
2.2. Verilerin Alınması

Makine öğrenmesi algoritmasının eğitilmesi için gerekli olan PLC' nin giriş ve çıkış verileri, kurulan bir endüstriyel ethernet haberleşme protokolü kullanılarak gerçekleştirilmiş ve kablosuz veri alışverişi olan bir router üzerinde toplanmıştır. Bu sayede PLC programı dahil olmak üzere tüm sisteme kablosuz bir şekilde erişim özelliği sağlanmıştır. Ayrıca Siemens Web Server kullanılarak internet genel ağa da bağlanılmış (Şekil 3) ve tüm sistem her türlü mobil araç ile takip edilebilir hale gelmiştir.



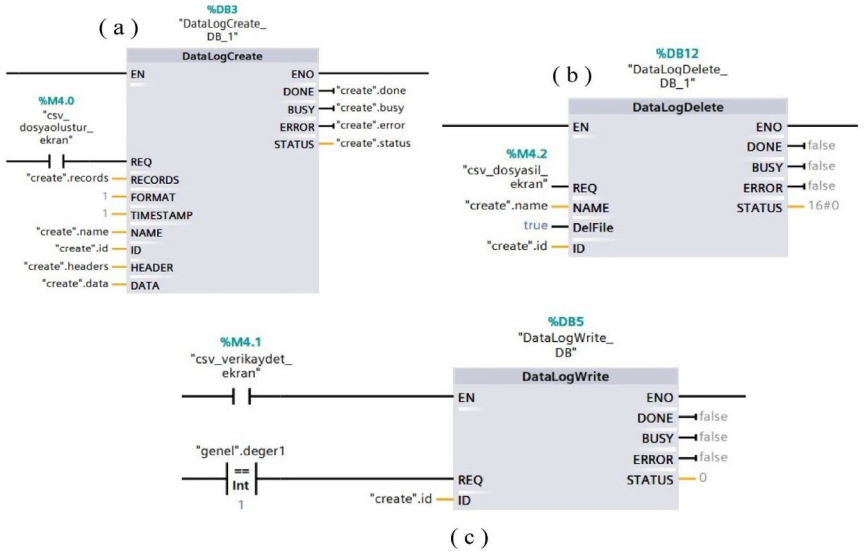
Şekil 3: Siemens Web Server kurulması

Bu donanım ve yazılımsal alt yapı sayesinde kurulan ağ üzerinden PLC giriş-çıkış veri kayıtlarına ".csv" dosyası olarak erişim sağlanmıştır. Dokümanın uzantısının ne olacağı ve hangi verileri kaydetmesi gerektiği ile ilgili ayarlar Şekil 5' de görüldüğü gibidir. Bu çalışmada makine öğrenmesi uygulaması Python programı ile eğitileceği için csv dosya şekli belirlenmiştir. Ayrıca, Şekil 4'de kurulan ağ üzerinden çekilen bir csv dosyası ve bu dosyadaki verilerin türleri hakkında bilgi görülmektedir.



Şekil 4: Veri kayıt açıklamaları

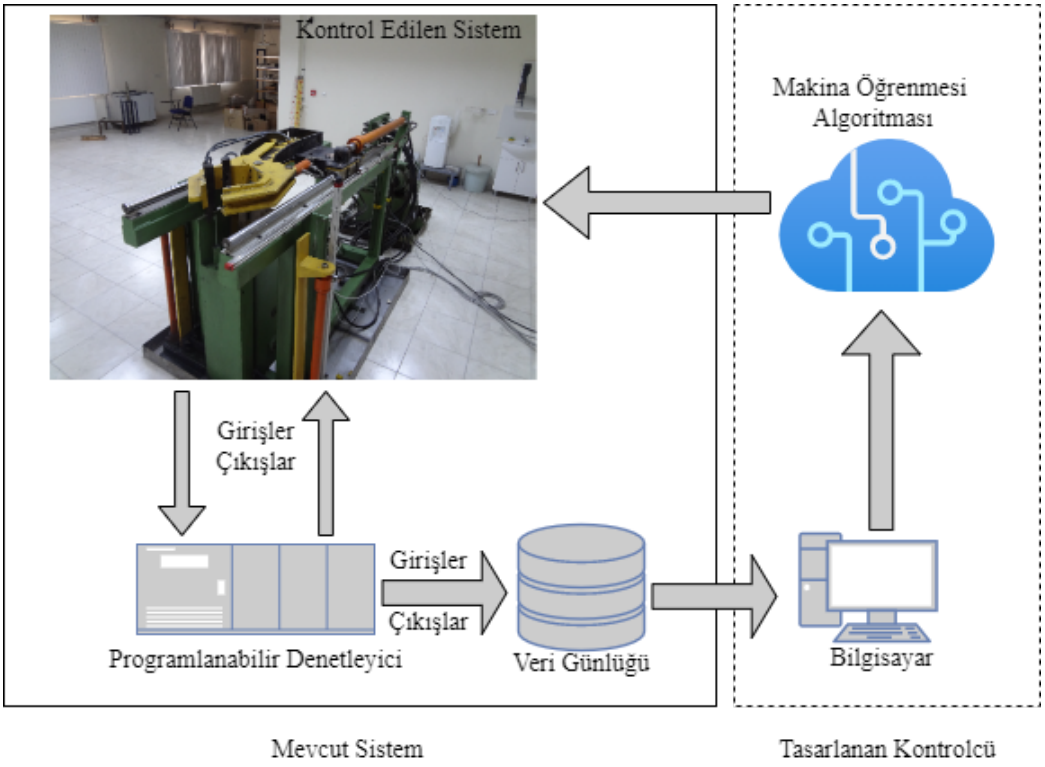
PLC giriş-çıkış kayıtlarının oluşturulabilmesi için Siemens TIA Portal üzerinden çeşitli fonksiyonlar kullanılmıştır. Bu fonksiyonlar Şekil 5'te görüldüğü gibidir.



Şekil 5: (a) PLC programında .csv veri kayıt dosyası oluşturma fonksiyonu, (b) PLC programında veri kayıt dosyası silme fonksiyonu, (c) PLC programında veri kayıt dosyasına istenilen veriler yazma fonksiyonu

3. Metot

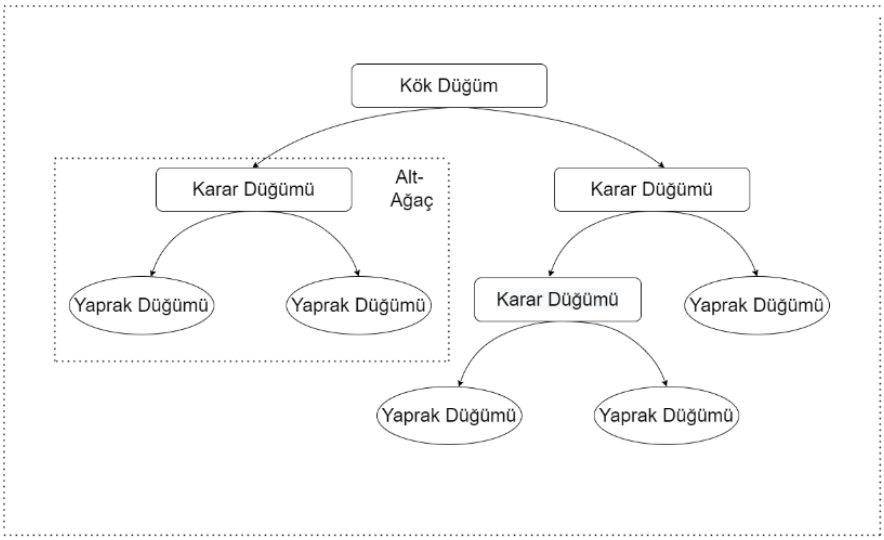
Bu çalışmada, makine öğrenmesi yöntemi ile PLC programının taklit edilmesi işlemi için kullanılan deneysel sistem tasarlanmıştır. İlk olarak sistemin giriş ve çıkış bilgileri bir veri günlüğü ile kaydedilmiştir. Kaydedilen bu veriler karar ağacı, k-en yakın komşu ve rastgele orman makinası algoritmaları tarafından eğitilerek giriş durumuna göre çıkışların tahmin edildiği bir sistem tasarlanmıştır. Daha sonra tasarlanan sisteme, girişlerin durumu verilerek çıkışları tahmin etmesi beklenmiş ve bu çıkışlar sistemin gerçek çıkışlarıyla karşılaştırılmıştır. Tasarlanan sistemin akış şeması Şekil 6'daki gibidir.



Şekil 6. Tasarlanan sistemin akış şeması

3.1. Karar Ağacı Algoritması

Karar ağacı algoritması parametrik olmayan bir denetimli öğrenme algoritmasıdır. Her ne kadar regresyon algoritmalarında kullanılabilse de genellikle sınıflandırma algoritmalarında kullanılır (Charbuty, B., & Abdulazeez, A., 2021). Karar ağacı algoritması; Şekil 7' de görüldüğü gibi kök düğüm, dallar, iç düğümler ve yaprak düğümlerden oluşan hiyerarşik bir ağaç yapısına sahiptir. Bir karar ağacı, bir iç düğümün özelliği (veya özniteliği), dalın bir karar kuralını temsil ettiği ve her yaprak düğümün sonucu temsil ettiği akış şeması benzeri bir ağaç yapısıdır. Bir karar ağacındaki en üstteki düğüm, kök düğüm olarak bilinir. Bu kök düğüm öznitelik değeri temelinde bölümlenir. Bu akış şeması benzeri yapı, karar verilmesine yardımcı olur (IBM). Böylelikle insan seviyesindeki bir düşünceyi kolayca taklit edilebilen bir akış şeması diyagramı olarak görselleştirilebilir. Bu nedenle karar ağaçlarının anlaşılması ve yorumlanması kolaydır.



Şekil 7: Karar Ağacı Algoritması çalışması.

Karar ağacı algoritmasının bir çok çeşidi olsa da en çok kullanılanları; dallanmaları değerlendirmek için ölçüm olarak entropi ve bilgi kazancından yararlanılan "Yinelemeli İkilemler 3" (ID3), karar ağaçlarındaki ayrık noktaları değerlendirmek için bilgi kazancını veya kazanç oranlarını kullanan (C4.5) ve "Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı" (CART) algoritmalarıdır (Brodley, C. E., & Utgoff, P. E., 1995).

Karar ağacında veri kümesinin safsızlığını (impurity) ve rastgeleliğini (randomness) belirlemek önemlidir. Bu iki durumun belirlenmesi için Entropi kullanılır ve entropi Eşitlik 1' de görüldüğü gibi hesaplanır.

$$\text{Entropi}(S) = -\sum_{c\in C}^{n} p(c)\log_2 p(c) \quad (1)$$

Bu eşitlikte S, entropinin hesaplandığı veri setini, c kümedeki sınıfları, p(c), c sınıfına ait veri noktalarının kümedeki toplam veri noktalarının sayısına oranını temsil eder. Entropi 0 ile 1 arasında değer alır.

S veri setindeki tüm örnekler bir sınıfa aitse, entropi sıfır olur. Benzer bir şekilde örneklerin yarısı bir sınıfta, diğer yarısı başka bir sınıftaysa, entropi en yüksek 1'de olacaktır. Ayrılacak en iyi özelliği seçmek ve en uygun karar ağacını bulmak için en az entropili öznitelik kullanılmalıdır. Bilgi kazancı, belirli bir özellikteki bir bölünmeden önce ve sonra entropideki farkı temsil eder ve genellikle Eşitlik 2' de görüldüğü gibi hesaplanır. Burada a, belirli bir özelliği veya sınıf etiketini temsil ederken, |Sv| / |S| Sv'deki değerlerin veri kümesindeki değerlerin sayısına oranını temsil eder.

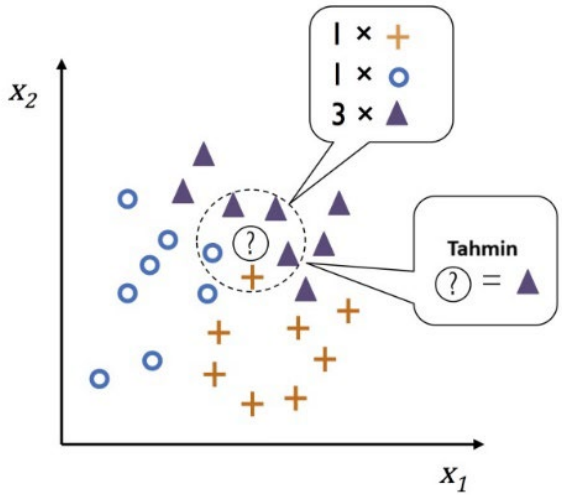
$$\text{Bilgi Kazancı}(S,a) = \text{Entropi}(S) - \sum_{v\in v}\frac{|S_v|}{|S|}\text{Entropi}(S_v) \quad (2)$$

Karar Ağacı, beyaz kutu tipi bir makine öğrenmesi algoritmasıdır (Hulstaert, L., 2019) Sinir Ağı gibi kara kutu tipi algoritmalarda bulunmayan dahili karar verme mantığını paylaşır. Eğitim süresi, sinir ağı algoritmasına göre daha hızlıdır. Karar ağaçlarının zaman karmaşıklığı, verilen verilerdeki kayıtların ve özniteliklerin sayısının bir fonksiyonudur. Karar ağacı, olasılık dağılımı varsayımlarına bağlı olmayan, dağılımdan bağımsız veya parametrik olmayan bir yöntemdir. Karar ağaçları, yüksek boyutlu verileri iyi bir doğrulukla işleyebilir. Bu çalışmada, bahsi geçen avantajlarından dolayı karar ağacı algoritması kullanılmıştır.

3.2. K-En Yakın Komşu Algoritması

K-En yakın komşu sınıflandırıcı algoritması parametrik olmayan ve hem regresyon hemde sınıflandırma problemlerinde kullanılabilen bir algoritmadır. Sınıflandırmaları veya tahminleri yapmak için bireysel noktaların aralarındaki yakınlıklarını kullanır.

Sınıflandırma problemleri için "çoğunluk oyu" olarak adlandırılan bir sınıf etiketi atanır. Bu çoğunluk oyu belirli bir veri noktası çevresinde en sık temsil edilen etikettir. Birden fazla sınıf olduğunda; örneğin dört sınıf için bir sınıf hakkında bir sonuca varmak için mutlaka oyların %50'sine ihtiyaç yoktur; %25'in üzerinde oyu olan bir sınıf etiketi atanabilir. 3 farklı sınıf için 5 en yakın komşulu bir sistemin gösterimi Şekil 8' de görüldüğü gibidir.



Şekil 8: 3 farklı sınıfta k=5 için knn algoritması

k-en yakın komşu algoritmasında amaç sınıf etiketi atayabilmek için, bir sorgu noktasının en yakın komşularını tanımaktır. Bunu yapabilmek için sorgu noktası ile diğer veri noktaları arasındaki mesafenin hesaplanması gerekir. Bu mesafe ölçümleri sorgu noktalarını farklı bölgelere ayıran karar sınırlarını oluşturur. Bir çift nokta arasındaki karar sınırı düz bir çizgi iken küresel düzeydeki en yakın komşu modellerinde dışbükey bir çok yüzlüdür. Mesafe hesaplanması için çok çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemlere öklid mesafesi, manhattan mesafesi, minkowski mesafesi örnek verilebilir.

3.2.1. Öklid Mesafesi: İki nokta arasındaki mesafe ölçümü için en çok kullanılan yöntemdir. Eşitlik 3 kullanılarak sorgu noktası ile ölçülen diğer nokta arasındaki düz bir çizgiyi ölçer.

$$d(x,y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - x_i)^2} \quad (3)$$

3.2.2. *Manhattan Mesafesi:* Öklid mesafesinden sonra en popüler mesafe ölçüm yöntemlerinden birisidir. Taksi mesafesi veya şehir bloğu mesafesi olarak da adlandırılır. İki nokta arasındaki mutlak değeri ölçer (Eşitlik 4).

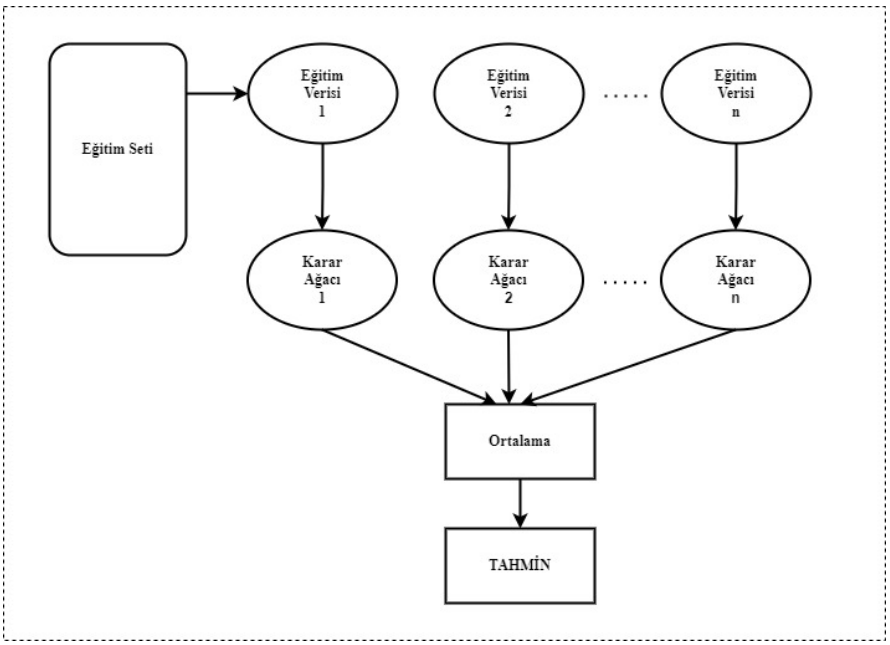
$$d(x,y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{m}(|x_i - y_i|)} \quad (4)$$

Miknowski Mesafesi: Bu mesafe ölçüsü, Öklid ve Manhattan mesafe ölçümlerinin genelleştirilmiş şeklidir. Eşitlik 5'te yer alan p parametresi diğer mesafe metriklerinin oluşturulmasına olanak sağlar.

$$d(x,y) = (\sum_{i=1}^{n}|x_i - y_i|)^{\frac{1}{p}} \quad (5)$$

3.3. Rastgele Orman Algoritması

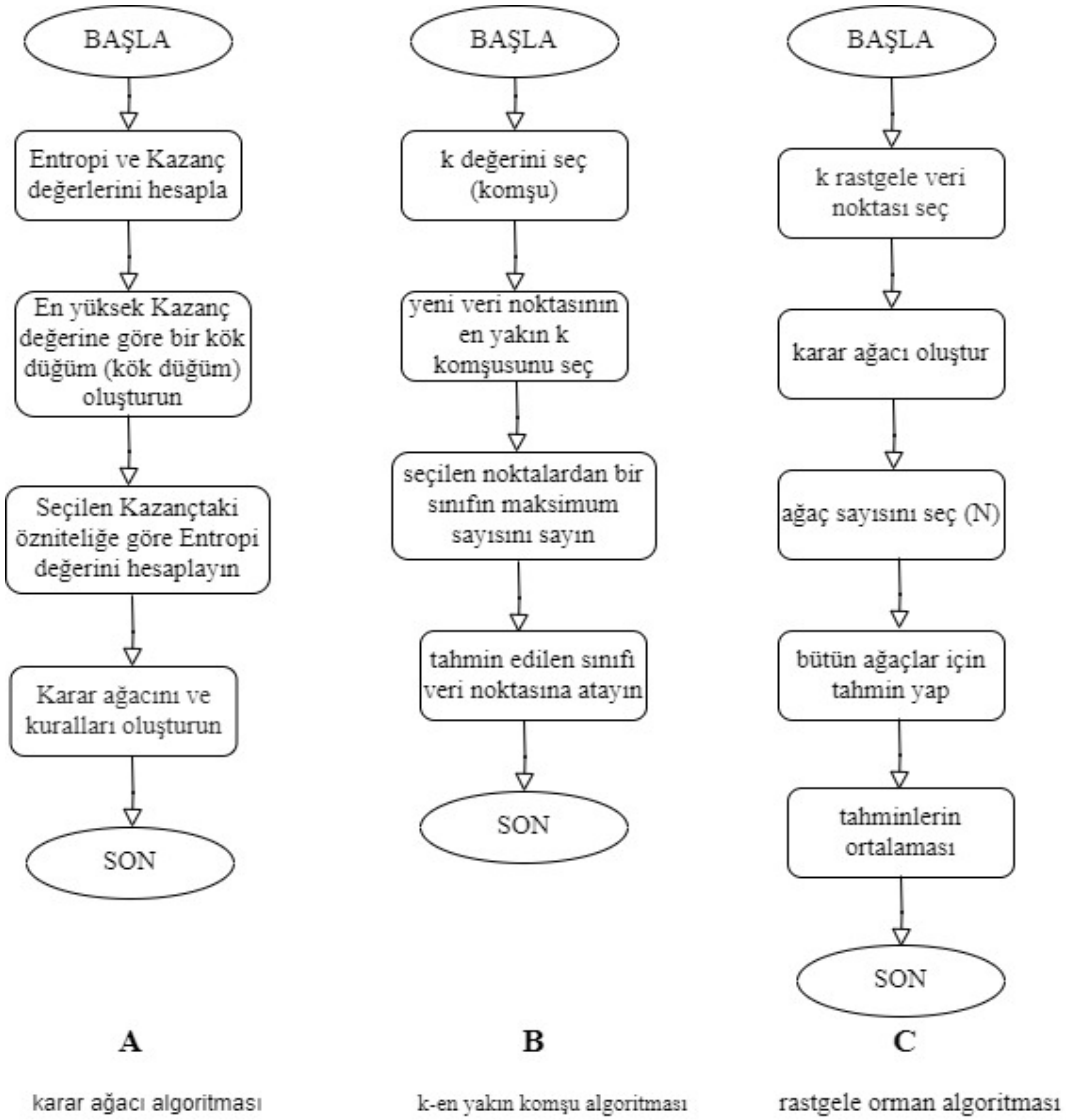
Rastgele orman algoritması, torbalama (bagging) yöntemi kullanan ve birden fazla sayıda karar ağacı algoritmasının birlikte çalışacak şekilde oluşturulduğu topluluk öğrenme yöntemidir. Bu algoritma, birden fazla olan bu karar ağaçlarının çıktılarını birleştirir ve daha doğru bir sonuç sunar. Rastgele orman algoritmasının çalışması Şekil 9' da görüldüğü gibidir.



Şekil 9: Rastgele Orman Algoritması çalışması.

3.4. Algoritmaların Akış Şemaları

Deney seti üzerinde bulunan PLC' nin 8 adet girişi ve 8 adet çıkışı olduğu olduğu için "çok sınıf-çok çıkış sınıflandırma" kullanılmıştır. Bu sınıflandırma yöntemine uygun oldukları için makine öğrenmesi algoritması olarak karar ağacı, k-en yakın komşu ve rastgele orman algoritmaları kullanılmıştır. Kullanılan bu makine öğrenmesi algoritmaları için akış şemaları Şekil 10' da görüldüğü gibidir.



Şekil 10: Kullanılan algoritmaların çalışma akış şemaları.

4. Bulgular

4.1. Giriş-Çıkış Kayıt Günlükleri

PLC ile tasarlanmış ve programı mevcut olan sisteme, 3.2. bölümünde detayları verilen yöntemle csv dosyası olarak giriş çıkış verileri alınmıştır. Makine öğrenmesi yöntemlerinde en önemli kısım veri olduğu için, mevcut sistem normal çalışma koşullarında çalışırken giriş çıkış verileri uzun süreli olarak kaydedilmiştir. Kaydedilen verilerin örneği Tablo 2 de görüldüğü gibidir.

Test düzeneği üzerinde sıcaklık, basınç ve titreşim gibi analog veri üreten analog sensörler bulunmaktadır. Analog sensörler bu çalışma kapsamında olmadığı için bu veriler kullanılmamıştır. Bu çalışmada sadece dijital giriş ve dijital çıkış verileri kullanılmıştır.

Tablo 2. Kaydı yapılan PLC giriş-çıkış veri örnekleri

Sıra No	I0.0	I0.1	I0.2	I0.3	I0.4	I0.5	I0.6	I0.7	I1.0	Q0.0	Q0.1	Q0.2
1	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

4.2. Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Çalıştırılması

Bu çalışmada kullanılmak üzere 7006 adet veri seti kaydedilmiştir. Bu veri seti üzerindeki Tablo 1' de gösterilmiş olan PLC giriş verileri makine öğrenmesi algoritmalarının girişi, PLC nin çıkış verileri de seçilen makine öğrenmesi algoritmalarının çıkışı olarak belirlenmiştir. Bu giriş ve çıkış setlerine ek olarak test düzeneğinin çalışmaya başlama durumu da önemli olduğu için 'zaman' bilgisi de algoritmaya giriş olarak eklenmiştir.

7006 adet veri setinin 5600 adedi karar ağacı algoritmasını eğitmek için kullanılmış, geri kalan kısmıda test verileri olarak kullanılmıştır. Bunun yanında makine öğrenmesinde en önemli durumlardan birisi veri setlerindeki bilgilerin kategorik ve nümerik olak ayrılmasıdır. Bu çalışmada kullanılan veriler PLC nin dijital giriş çıkış verileri olduğu için herhangi bir kategorik veri yoktur. Ayrıca sistem üzerinden veriler anlık olarak kaydedildiği için herhangi bir eksik veri de bulunmamaktadır. Ayrıca giriş-çıkış verileri içerisinde herhangi bir eksik veri de bulunmamaktadır.

Çalışmada kullanılan algoritma Python programı ile yazılmış olup github linki eklenmiştir. Bu çalışmanın sonucu olarak ortaya çıkan doğruluk puanları karar ağacı, k-en yakın komşu ve rastgele orman algoritmaları için sırasıyla 0.914, 0.905 ve 0.948 çıkmıştır.

PLC ile tasarlanan sistemlerde pano üzerinde röleler kullanılır. PLC lerin işlem hızları milisaniyeler cinsinden olup (transistör çıkışlılar) röleler için bu süre 0,5 saniye civarındadır. Bazı durumlarda (özellikle asenkron motorların ani yön değiştirilmesi gibi) PLC ile rölelerin işlem hızlarının farklı olduğunda sistemlerde faz çakışmaları yaşanabilmektedir. Bu çalışmadaki kullanılan algoritmalar her ne kadar iyi çalışıyor olsa da anlık bazı çıkış değerleri problem oluşturabileceği göz önüne alınmalıdır. Test düzeneğindeki aynı anda aktif olduğunda mekanik probleme sebep olacak iki hareket belirlenip, bu hareketlerin aynı anda olmaması için röleler üzerinden önlem alınmıştır (kapalı kontaklarını açık kontakları üzerinden geçirerek). Bu adım sistemsel güvenliğin sağlanması için yapılmıştır.

5. Sonuç

Bu çalışmada, bilinmeyen bir PLC programının makine öğrenmesi tabanlı modellemesi yapılmıştır. Bu işlemin yapılabilmesi için ilk olarak bir test düzeneği kurulmuş, kurulan test düzeneğinin üzerinden Siemens web server aracılığıyla giriş çıkış veri günlüğü tutulmuştur. Alınan giriş verileri makine öğrenmesi algoritmasının giriş değişkenleri olarak atanmıştır. Bu giriş değerlerine ek olarak PLC programlarında işlemlerin oluş sırası önemli olduğu için zaman bilgisi de bir giriş olarak sisteme eklenmiştir. PLC nin çıkış verileri makine öğrenmesi algoritmasının çıkışları olarak atanmış ve algoritma çalıştırılmıştır. Makine öğrenmesi algoritması olarak karar ağacı, k-en yakın komşu ve rastgele orman sınıflandırıcı algoritmaları kullanılmış ve algoritmaların değerlendirilmesi için doğruluk puanı metriği ile yapılmıştır. Karar ağacı, k-en yakın komşu ve rastgele orman algoritmaları için doğruluk puanları sırasıyla 0.914, 0.905 ve 0.948 olarak elde edilmiş ve en iyi sonucu rastgele orman algoritması vermiştir.

Bu çalışma kapsamında PLC nin sadece dijital giriş ve çıkışları kullanılmıştır. Analog giriş ve çıkışlar kullanılmamıştır. Ayrıca PLC programı içerisinde zamanlayıcı-sayıcı gibi programlama ekipmanları da kullanılmamıştır. İlerleyen çalışmalarda analog sensör verileri ve zamanlayıcı- sayıcı gibi ekipmanlar kullanılarak da çalışmalar yapılabileceği öngörülmektedir.

Referanslar

Barthelmey, A., Störkle, D., Kuhlenkötter, B., & Deuse, J. (2014). Cyber physical systems for life cycle continuous technical documentation of manufacturing facilities. Procedia Cirp, 17, 207-211.

Bayindir, R., & Cetinceviz, Y. (2011). A water pumping control system with a programmable logic controller (PLC) and industrial wireless modules for industrial plants—An experimental setup. ISA transactions, 50(2), 321-328.

Bolton, W. (2015). Programmable logic controllers. Newnes.

Brodley, C. E., & Utgoff, P. E. (1995). Multivariate decision trees. Machine learning, 19(1), 45-77.

Brusso, B. C. (2018). 50 Years of Industrial Automation [History]. IEEE Industry Applications Magazine, 24(4), 8-11.

Carayol, A., & Nicaud, C. (2012). Distribution of the number of accessible states in a random deterministic automaton. In STACS'12 (29th Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science) (Vol. 14, pp. 194-205). LIPIcs.

Charbuty, B., & Abdulazeez, A. (2021). Classification based on decision tree algorithm for machine learning. Journal of Applied Science and Technology Trends, 2(01), 20-28.

de MBA Dib, L., Fernandes, V., Filomeno, M. D. L., & Ribeiro, M. V. (2017). Hybrid PLC/wireless communication for smart grids and internet of things applications. IEEE internet of things Journal, 5(2), 655-667.

Erickson, K. T. (1996). Programmable logic controllers. IEEE potentials, 15(1), 14-17.

Glavaš, M., Krčmar, I., & Marić, P. (2021, March). Modelling of a sequential system. In 2021 20th International Symposium Infoteh-Jahorına (INFOTEH) (pp. 1-6). IEEE.

Guasch, A., Quevedo, J., & Milne, R. (2000). Fault diagnosis for gas turbines based on the control system. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 13(4), 477-484.

Hulstaert, L., (2019). Black-box vs. white-box models. https://towardsdatascience.com/machine-learning-interpretability-techniques-662c723454f3

IBM, What is a Decision Tree?, https://www.ibm.com/topics/decision-trees.

Kaid, H., Al-Ahmari, A., Nasr, E. A., Al-Shayea, A., Kamrani, A. K., Noman, M. A., & Mahmoud, H. A. (2020). Petri net model based on neural network for deadlock control and fault detection and treatment in automated manufacturing systems. IEEE Access, 8, 103219-103235.

Lee, J. I., Chun, S. W., & Kang, S. J. (2002). Virtual prototyping of PLC-based embedded system using object model of target and behavior model by converting RLL-to-statechart directly. Journal of systems architecture, 48(1-3), 17-35.

Liu, J., & Darabi, H. (2002, October). Ladder logic implementation of Ramadge-Wonham supervisory controller. In Sixth International Workshop on Discrete Event Systems, 2002. Proceedings. (pp. 383-389). IEEE.

Lobov, A., Lastra, J. L. M., Tuokko, R., & Vyatkin, V. (2003). Methodology for modeling visual flowchart control programs using net condition/event systems formalism in distributed environments. In EFTA 2003. 2003 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings (Cat. No. 03TH8696) (Vol. 2, pp. 329-336). IEEE.

Marzena Dobosz, (2020). The Role of PLCs in Industrial IoT. (https://knowhow.distrelec.com/automation/the-role-of-plcs-in-industrial-iot/).

Otto, H. P., & Rath, G. (1996). State Diagrams A New Programming Method for Programmable Logic Controllers. In Software Engineering for Manufacturing Systems (pp. 27-37). Springer, Boston, MA.

Özerdem, Ö. C. (2016). Design of two experimental setups for programmable logic controller (PLC) laboratory. International Journal of Electrical Engineering Education, 53(4), 331-340.

Rullan, A. (1997). Programmable logic controllers versus personal computers for process control. Computers & industrial engineering, 33(1-2), 421-424.

Silva, B. G., & De Sousa, M. (2016, September). Internal inconsistencies in the third edition of the IEC 61131-3 international standard. In 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) (pp. 1-4). IEEE.

Soliman, D., Thramboulidis, K., & Frey, G. (2012). Transformation of function block diagrams to Uppaal timed automata for the verification of safety applications. Annual Reviews in Control, 36(2), 338-345.

Sönmez, M., Nil, M., & Kandilli, U. İ. (2005). Üç serbest dereceli endüstriyel bir robotun yapay sinir ağları İle denetimi

Wan, J., Tang, S., Shu, Z., Li, D., Wang, S., Imran, M., & Vasilakos, A. V. (2016). Software-defined industrial internet of things in the context of industry 4.0. IEEE Sensors Journal, 16(20), 7373-7380.

Zimmerman, G. P. (2008). Programmable logic controllers and ladder logic. Rapid City: Dr. Alfred R. Boysen, Department of Humanities, South Dakota School of Mines and Technology.

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

UMAGD, (2023) 15(3), s270-s288.

10.29137/umagd.1370297

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:3 Aralık/December 2023 Özel Sayı/Special Issue

Araştırma Makalesi / Research Article

Taşıma Gücü Düşük Farklı Zeminlerde CPT Değerlerine Göre Yüzeysel Temel Tasarımı

Shallow Foundation Design According to CPT Value on Different Soils with Low Bearing Capacity

Tuğçe Bekdemir*[1], Baran Toprak [1]

[1]*Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,71450, Kırıkkale, Türkiye*

***Başvuru/Received**: 02/10/2023* ***Kabul / Accepted**: 05/10/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Öz

Koni Penetrasyon Deneyi (CPT), geçmişten günümüze kullanılan ve uygulayıcısına çeşitli zemin parametrelerinin elde edilmesi imkânını sunan bir arazi deneyidir. Uygulama maliyetinin düşük olması ve deney boyunca sürekli olarak veri elde edilmesinin sağlanması, bu parametrelere bağlı olarak zeminin taşıma gücü, oturma hesabı gibi hesapların yapılmasına olanak sağlayan bir deneydir. Ülkemizde arazi deneyleri arasında en sık kullanılan deney Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)' dir. SPT testinin uygulama aşamasında hatalara açık olması ve elde edilen verilerin yorumlanması aşamasında karşılaşılan birtakım zorluklar, birçok düzeltme faktörüne bağlı olarak deneyin gerçekleştirilmesini sağlar. Sürekli elde edilen veri akışı, CPT deneyini SPT deneyine kıyasla daha güvenilir bir hale getirmektedir. Bu çalışmada CPT deneyi sonrasında elde edilen uç direnci (q_u), sürtünme direnci (q_s) ve boşluk suyu basıncı (u) değerleri kullanılmıştır. Birbirinden farklı zeminlerde dizayn edilecek olan yüzeysel temeller için, değişken ve düşük değerlere sahip CPT verilerine bağlı olarak farklı hesap modüllerine göre, Geo5 Geoteknik Hesap Programı Yüzeysel Temel Tasarımı modülüyle tasarımları yapılmıştır. Tüm hesap modüllerinin birbirleri ile kıyaslanması incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler

"Koni Penetrasyon Testi, Yüzeysel temeller, Geo5, Taşıma kapasitesi"

Abstract

Cone Penetration Test (CPT) is a field test that has been used from past to present and provides the opportunity to obtain various soil parameters for the practitioner. It's low implementation cost and continuous data acquisition during the test allow for calculations related to soil properties such as bearing capacity and settlement analysis. Among soil tests in our country, the most commonly used test is the Standard Penetration Test (SPT). The SPT test is susceptible to errors during implementation, and there are challanges in interpreting the obtained data, which require various correction factors for the test to be conducted. The continuous data flow during the CPT test makes it more reliable compared to the SPT test. In this study, the values of tip resistance (qu), sleeve friction resistance (qs) and pore water pressure (u) obtained after the CPT test were used. For shallow foundations to be designed in different soil types, designs were carried out based on different calculation modules depending on CPT data with varying and low values, using the Geo5 Geotechnical Desing Program's Shallow Foundation Design module. A comparison of all calculation modules was investigated.

Key Words

"*Cone Penetration Test (CPT), Shallow foundation, Geo5, Bearing capacity*"

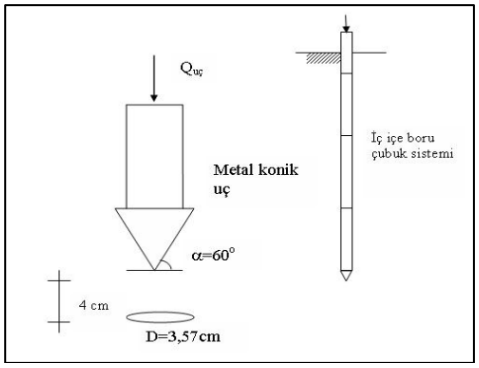
***Sorumlu Yazar:** tugcebekdemirr@gmail.com*

1. Giriş

Koni Penetrasyon Deneyi (CPT), zeminlere ait veri elde edilmesini sağlayan bir arazi deneyidir. Kumlu, siltli, killi zeminlerde uygulanabilmektedir. CPT testinin bu zeminlerde kullanılmasının sebebi bu zeminlere konik ucun kolayca penetre olabilmesi ve istenilen derinlikten veri alınabilmesidir. Konik uç kısımda oluşan uç direnç (q_u), koninin ceket kısmı boyunca oluşan sürtünme direnci (q_s) ve boşluk suyu basıncı (u) deney sırasında direkt elde edilen zemin parametreleridir. Bu verilere bağlı olarak da taşıma gücü, oturma hesabı gibi hesaplar kolaylıkla yapılabilmektedir. SPT' nin yetersiz kaldığı noktalarda uygulaması kolay olan CPT testi ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada 3 adet zayıf CPT değerine sahip zemin verileri programa tanımlanmış olup yeraltı suyu, moment etkisi, farklı düşey yük değerleri ve farklı analiz yöntemleri gibi değişkenlere bağlı olarak dizayn edilecek olan yüzeysel temellerde ne gibi değişiklikler meydana geleceği incelenmiştir.

2. Koni Penetrasyon Deneyi

Koni Penetrasyon Deneyi (CPT), yaklaşık 35 milimetrelik, 60º lik konik bir ucun iç içe geçirilmiş çubuk boru sistemiyle belli bir hızla zemine penetre edilmesi ve bu şekilde zemin verilerinin elde edilmesini sağlayan bir arazi deneyidir. Koni Penetrasyon Deney yöntemi ilk kez Hollanda'da 1934'te kumların bağıl birim hacim ağırlığını ölçerek kazık hesaplaması yapılması amacıyla kullanılmıştır (Önalp, Sert, 2006). Günümüzde ise birçok geoteknik hesap için kullanılabilmektedir. CPT deneyinden elde edilen uç direnç (q_u), sürtünme direnci (q_s) ve boşluk suyu basıncı (u) Geo5 Geoteknik Hesap Programı yardımıyla boyutlandırma, donatılandırma ve buna bağlı oturma ve taşıma gücü sonuçları elde edilebilmektedir. CPT deney düzeneğine ait basit bir gösterim Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. CPT düzeneği basit gösterimi

2.1 Koni Penetrasyon Deneyi Verilerinin Kullanılması

2.1.1 Zemin Parametrelerinin Belirlenmesi

CPT deneyi verileri yardımıyla zemine ait birçok parametre belirlenebilmektedir. Zemin sınıfı ve davranışı, kohezyonlu zeminlerde birim hacim ağırlık, drenajsız kayma mukavemeti, drenajsız deformasyon modülü, odometrik deformasyon modülü; kohezyonsuz zeminlerde bağıl yoğunluk, kayma direnci açısı, deformasyon parametreleri bu parametrelere örnektir.

2.1.2 Sıvılaşma Analizi

CPT deneyi verileri ile kohezyonsuz zeminlerin mevcut etkiye bağlı zemin direncini belirten devirsel dayanım oranı (DDO) ve yine aynı etkiye bağlı olarak zeminde oluşan gerilmeyi ifade eden devirsel gerilme oranı (DGO) belirlenebilmektedir. DDO/DGO ile de sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü elde edilir. Güvenlik faktörünün 1'den büyük olması zeminde sıvılaşma olmayacağını, 1'den küçük olması ise zeminde sıvılaşma meydana gelebileceğini ifade eder.

2.1.3 Kazıklı Temel Tasarımı

Kazıklı temel tasarımında öncelikle zeminin uç direnci ve sürtünme direncinin belirlenmesi gerekmektedir. CPT deneyi ile bu değerlere ulaşmak mümkündür. Bustamante ve Gianeselli, De Ruiter ve Beringen ve Schmertmann uç direnci ve sürtünme direncinin CPT verilerinden belirlenmesine yönelik çalışmalar yapmışlar, çeşitli bağıntı ve abaklar oluşturmuşlardır.

2.1.4 Yüzeysel Temel Tasarımı

Yüzeysel temellerde tasarım yapabilmek için zeminin taşıma gücünü ve oturma kriterini belirlemek gerekir. Bu noktada hem taşıma gücünün hem de oturma miktarının belirlenebilmesi için CPT deneyi verilerinden yararlanılmıştır. Schmertmann, Skempton, Meyerhof bu konuda çalışma yapan isimlerdendir. Bu çalışmada CPT deneyi verilerine bağlı olarak taşıma gücü ve oturma hesabından yararlanılarak yüzeysel temel tasarımında ne gibi değişikliklere gidilmesi gerektiği incelenmiştir. Geo5 programı

Schmertmann, Skempton ve Meyerhof yöntemi olmak üzere 3 şekilde yüzeysel temel tasarımı imkânı sunmaktadır. Bu 3 yöntem ve farklı değişkenler kullanarak birçok analiz yapılmış, sonuçlar incelenmiştir.

2.2 Geo5 ile CPT Verilerine Bağlı Yüzeysel Temel Tasarımı

Elde edilen CPT verileri Geo5 Geoteknik Hesap Programı yardımıyla kesit oluşturmak amacıyla kullanılmıştır. Her bir veri uç direnci (q_u), sürtünme direnci (q_s) ve boşluk suyu basıncı (u) değerini gösterecek şekilde tablo haline getirilerek programa aktarılmıştır. Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3' te hazırlanan tablolar verilmiştir.

Tablo 1. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-2 numaralı veriler

TEKNOPARK ASELSAN ŞANTİYESİ			
CPT-2			
Derinlik	Uç Direnci	YAS	BSB
	qc	fs	u2
	mpa	kpa	kpa
-1	6,75	15	0,04
-2	5,25	27	0,08
-3	4	18,5	0,08
-4	4,5	17	0,08
-5	4,5	17	0,08
-6	3,75	15	0,1
-7	5,25	11	0,14
-8	21	33	0,42

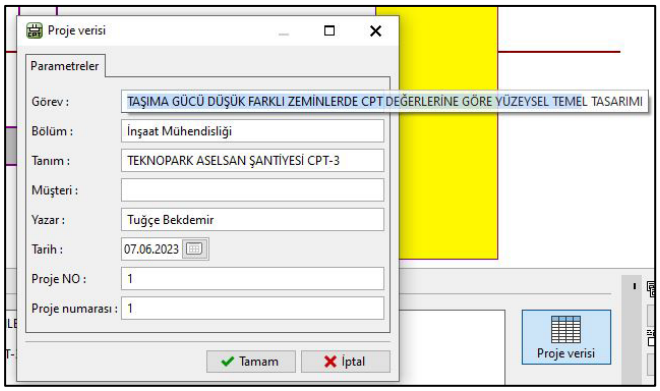
Tablo 2. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-3 numaralı veriler

TEKNOPARK ASELSAN ŞANTİYESİ			
CPT-3			
Derinlik	Uç Direnci	YAS	BSB
	qc	fs	u2
	mpa	kpa	kpa
-1	4,5	22	0,08
-2	3,75	21	0,06
-3	3	17	0,04
-4	3	17	0,04
-5	5,25	17	0,08
-6	12	31	0,06
-7	2,25	16	0,02
-8	3	9	0,06

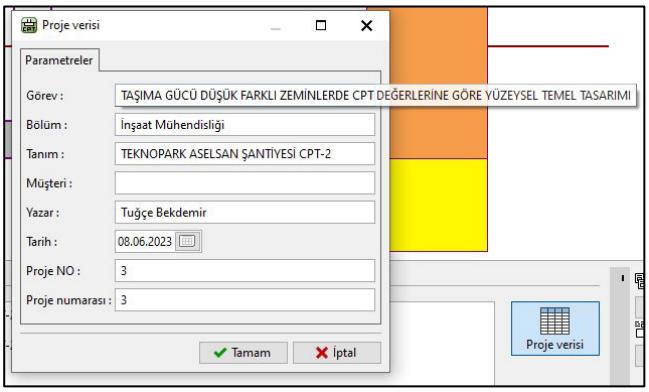
Tablo 3. Kuzey Marmara Otoyoluna ait CPT verileri (KMO-2)

Kuzey Marmara Otoyolu (KMO)			
GEÇİŞ ZEMİNLERİNDE KONSOLİDASYON ÖZELLİKLERİNİN TAHMİNİ İÇİN CPTU KULANIMI			
Derinlik	Uç Direnci	YAS	BSB
	qc	fs	u2
	mpa	kpa	kpa
7,44	1,864	40,8	0,7
10,44	1,547	89,5	-0,2
13,44	1,346	31,4	-0,5
16,44	1,153	65	-0,9
19,44	1,91	95,8	-0,7
22,44	0,564	15	-0,7
25,44	2,193	16,7	0,4

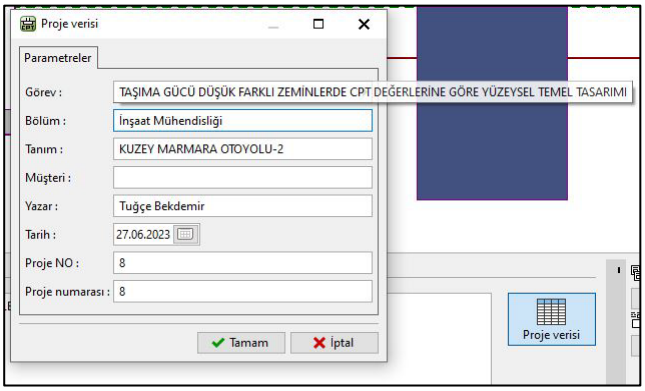
Her bir veri sırasıyla Geo5 Geoteknik Hesap Programı Yüzeysel Temel CPT modülü kullanılarak programa aktarılmıştır. Öncelikle Proje sekmesindeki proje verisi kısmı, her bir proje için Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'teki gibi doldurulmuştur.



Şekil 2. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-3 proje verileri

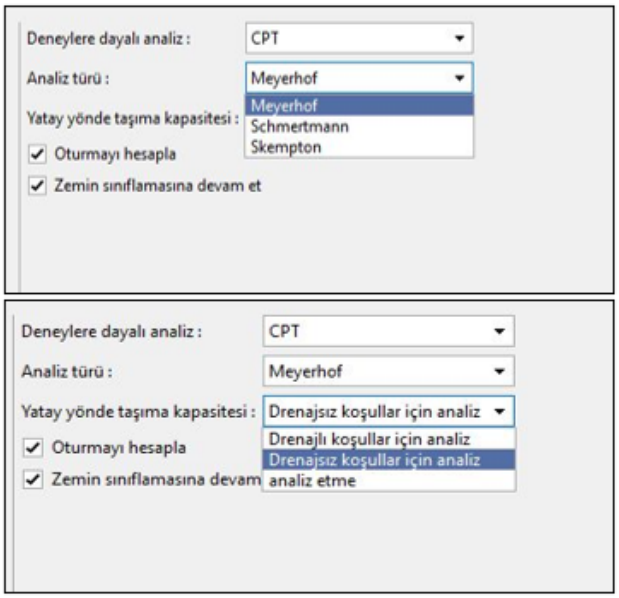


Şekil 3. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-2 numaralı veriler



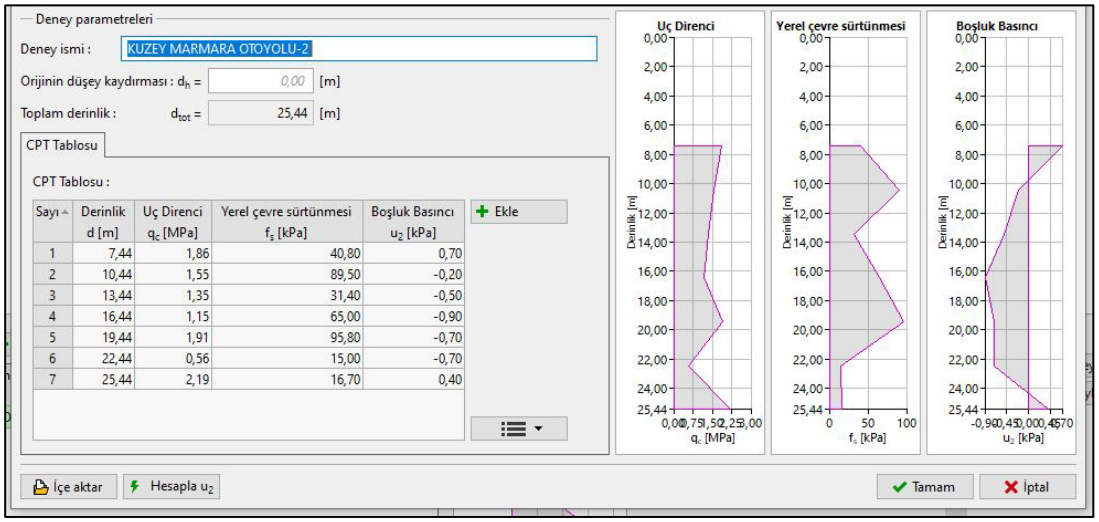
Şekil 4. Kuzey Marmara Otoyoluna ait CPT verileri (KMO-2)

Sonrasında deneye dayalı analiz kısmı CPT olarak seçilmiştir. Analiz türü kısmına gelindiğinde Meyerhof, Schmertmann ve Skempton olmak üzere 3 farklı yöntem seçeneği bulunmaktadır. Bu çalışmada her 3 yöntem de tüm verilerin analizi için kullanılmıştır. Yatay yönde taşıma kapasitesi için de zemin türüne bağlı olarak drenajlı/drenajsız durum belirlenerek işaretlenmiştir. Bu seçenekler Şekil 5'te gösterilmektedir.



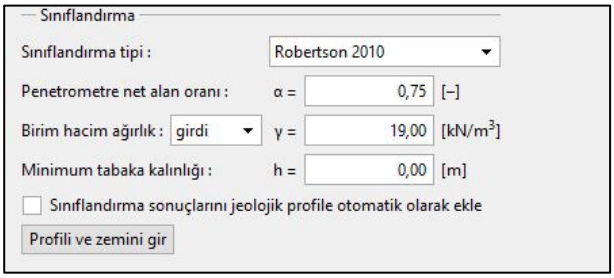
Şekil 5. Analiz için kullanılacak yöntemlerin tayini

Daha sonra her bir veriye ait değerler tablodan alınarak CPT sekmesine veri olarak aktarılmıştır. Geo5 Geoteknik Hesap Programı işlenen verileri Şekil 6'daki gibi grafik haline getirmektedir. Bu sayede verilere ait grafikler de elde edilmiştir.



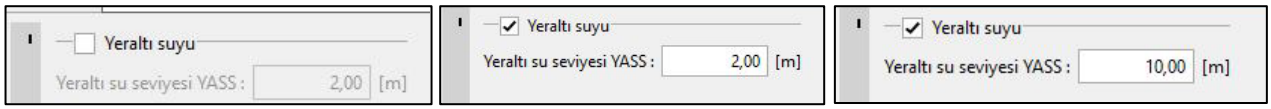
Şekil 6. CPT verilerinin girilmesi

Zemin sınıflandırması sekmesinde, sınıflandırma tipi olarak Robertson 1986 ve Robertson 2010 olmak üzere 2 tip sınıflandırma seçeneği bulunmaktadır. Bu çalışmada yapılan tüm analizlerde Robertson 2010 tipi sınıflandırma yapılmıştır. Diğer veriler ise Şekil 7'deki gibi her analizde sabit tutulmuştur.



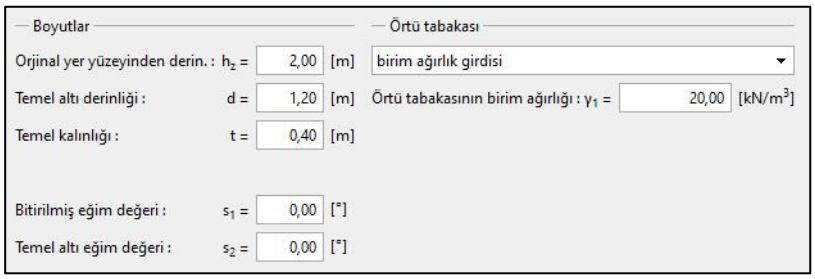
Şekil 7. Verilerin sınıflandırılmasına dair parametrelerin tayini

Yeraltı suyu aşamasında her veri Şekil 8'deki gibi 3 yeraltı suyu seviyesi için analiz edilmiştir. Bunlar yeraltı suyu olmaması durumu, -2.00 metrede ve -10.00 metrede yeraltı suyu olması durumudur.



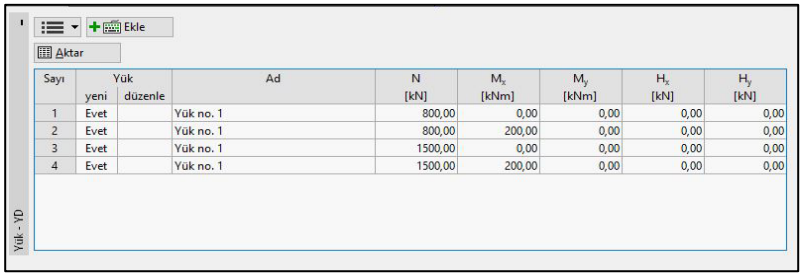
Şekil 8. Yeraltı su seviyesinin 3 farklı tayini

Temel için derinlik değerleri Şekil 9'daki gibi sabit tutulmuş olup zımbalama durumunun etkisinden kurtulmak için temel kalınlığı bazı analizlerde arttırılmıştır.



Şekil 9. Temel derinliğinin/boyutlarının tayini

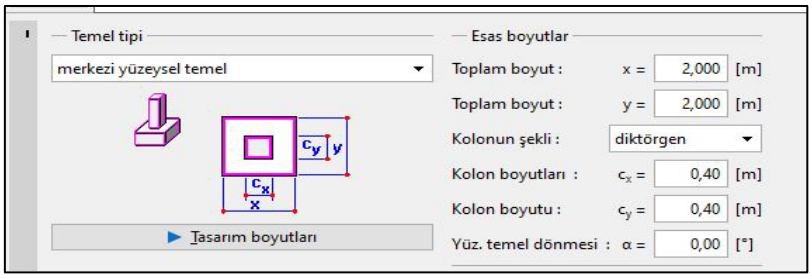
Her veri için Şekil 10'da belirtilen 4 yük kombinasyonu ayrı ayrı etki ettirilmiş olup yükün artmasına, momentin varlığına göre farklı sonuçlar elde edilmiştir.



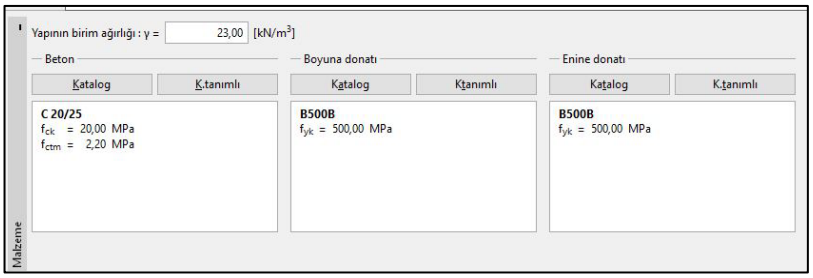
Sayı	Yük yeni	Yük düzenle	Ad	N [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Hx [kN]	Hy [kN]
1	Evet		Yük no. 1	800,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	Evet		Yük no. 1	800,00	200,00	0,00	0,00	0,00
3	Evet		Yük no. 1	1500,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	Evet		Yük no. 1	1500,00	200,00	0,00	0,00	0,00

Şekil 10. Temele etki ettirilen yük kombinasyonları

Geometri kısmına gelindiğinde temel tipi olarak merkezi yüzeysel temel ile çalışılmıştır. Her analizde öncelikle 2,00 x 2,00 metre, kare temelden başlanılmış olup taşıma gücü analizi sonuçlarına göre (kare temel olacak şekilde) temel boyutları 50'şer cm büyütülmüştür. Kolon boyutları Şekil 11' deki gibi 0,4x0,4 metre alınmıştır. Temel beton ve donatı malzemeleri de Şekil 12'deki gibi alınmış olup sabit tutulmuştur.



Şekil 11. Temel geometrisinin tayini



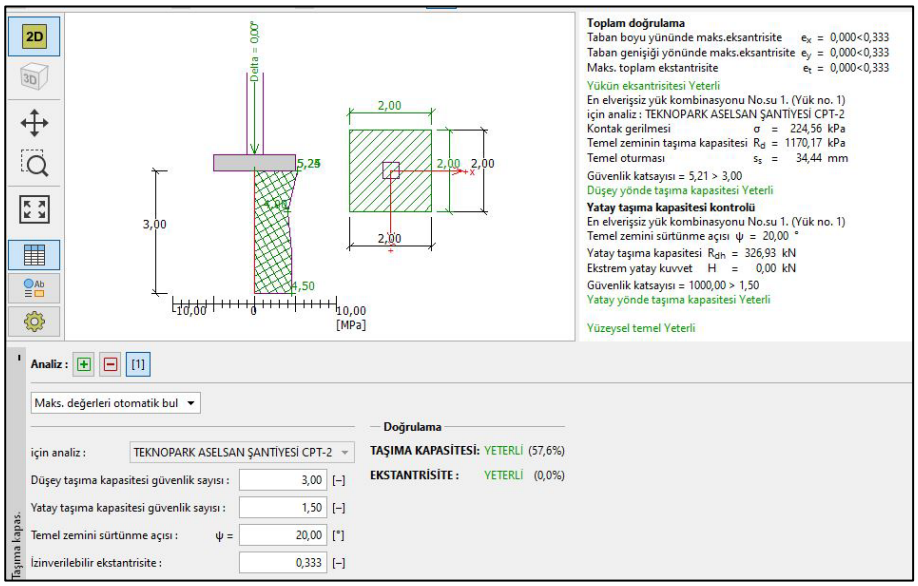
Şekil 12. Temel malzeme özelliklerinin tayini

Tüm bu veriler girildikten sonra artık analiz kısmına geçilmiştir. Seçtiğimiz yöntem, yeraltı suyu seviyesi, tanımladığımız yük kombinasyonuna bağlı olarak her veri aşağıdaki gibi analiz edilmiştir. Analiz koşulları parantez içindeki gibi kodlanmıştır.

- Meyerhof Yöntemi, YASS yok, Düşey Yük (800 kN), Moment yok (MYYDY8MY)
- Meyerhof Yöntemi, YASS -10.00 metrede, Düşey Yük (800 kN), Moment yok (MY10DY8MY)
- Meyerhof Yöntemi, YASS -2.00 metrede, Düşey Yük (800 kN), Moment yok (MY2DY8MY)
- Meyerhof Yöntemi, YASS yok, Düşey Yük (800 kN), Moment 200 kNm (MYYDY8M2)
- Meyerhof Yöntemi, YASS -10.00 metrede, Düşey Yük (800 kN), 200 kNm (MY10DY8M2)
- Meyerhof Yöntemi, YASS -2.00 metrede, Düşey Yük (800 kN), 200 kNm (MY2DY8M2)
- Meyerhof Yöntemi, YASS yok, Düşey Yük (1500 kN), Moment yok (MYYDY15MY)
- Meyerhof Yöntemi, YASS -10.00 metrede, Düşey Yük (1500 kN), Moment yok (MY10DY15MY)
- Meyerhof Yöntemi, YASS -2.00 metrede, Düşey Yük (1500 kN), Moment yok (MY2DY15MY)
- Meyerhof Yöntemi, YASS -2.00 metrede, Düşey Yük (1500 kN), Moment 200 kNm (MY2DY15M2)
- Schmertmann Yöntemi, YASS yok, Düşey Yük (800 kN), Moment yok (SCYYDY8MY)
- Skempton Yöntemi, YASS yok, Düşey Yük (800 kN), Moment yok (SKYYDY8MY)

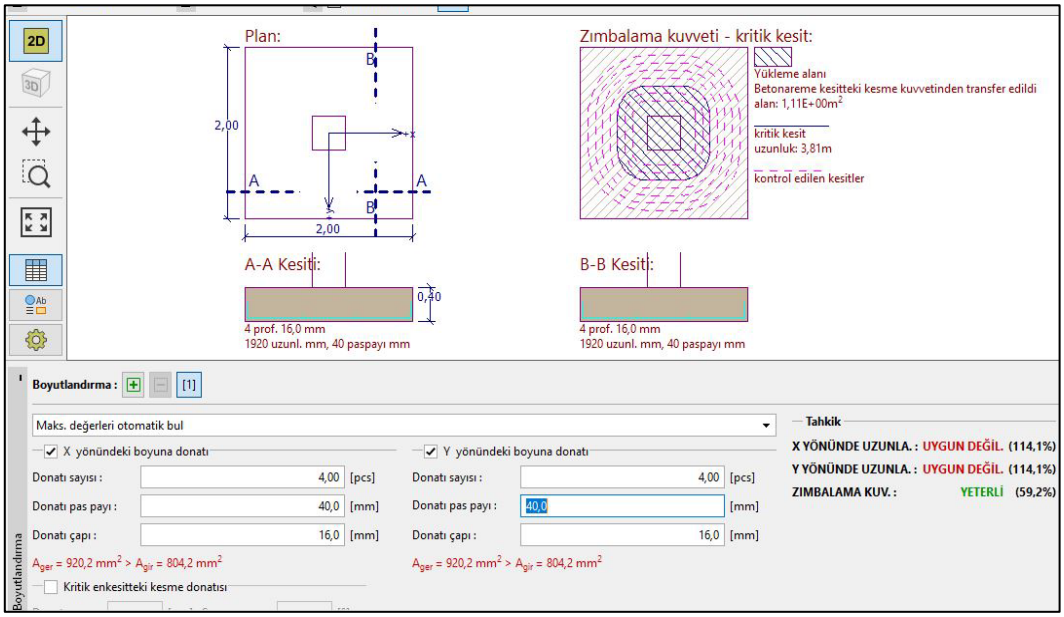
3. Geo5 Geoteknik Hesap Programı ile Farklı CPT Verilerinde Yapılan Tahkikler ve Sonuçları

Tüm girdiler programa tanımlandıktan sonra analiz aşamasına geçilmiştir. Analiz tamamlandığında Şekil 13' te verilen analiz ekranı tasarlanan temelin yeterli olup olmadığını göstermektedir. "Yeterli" sonucu elde edilene kadar temel tasarımında değişiklikler yapılmıştır. Teknopark Aselsan şantiyesi CPT-2 verisi, Meyerhof yöntemi örnek olarak incelendiğinde, ilk durumda verileri girdiğimizde analiz ekranı Şekil 13'te görülmektedir. Analizler sonucunda, 2,00x2,00 metre temel yeterli olup temel boyutlarında değişiklik yapılmamıştır.

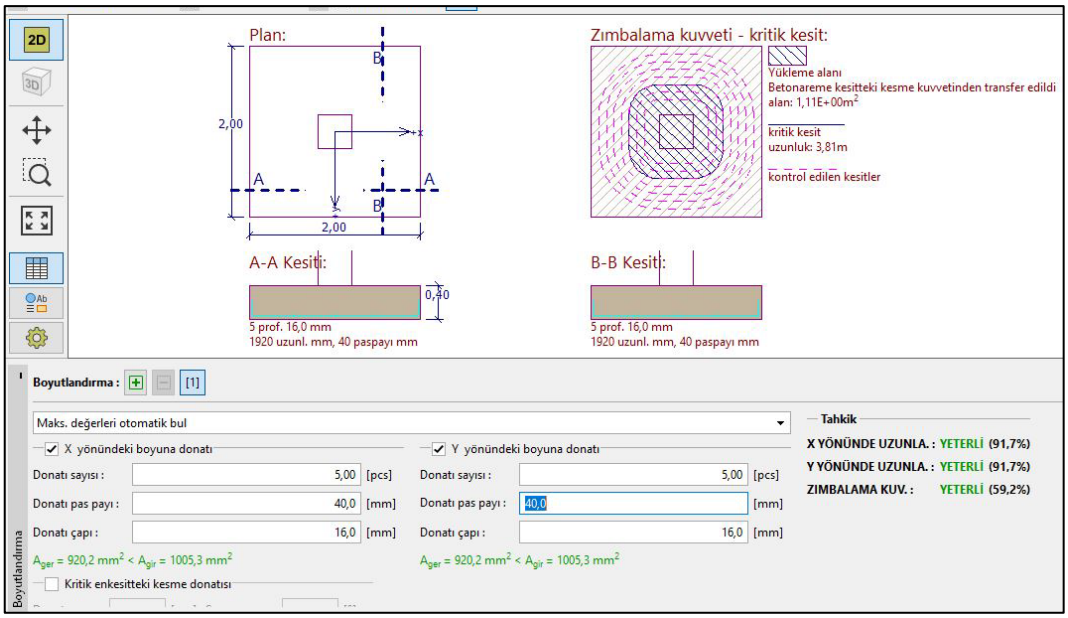


Şekil 13. Analiz sonuçları

Boyutlandırma kısmına gelindiğinde tasarlanan temele uygun donatı miktarı belirlenmiştir. Her durumda X yönünde boyuna donatı 4 adet, Y yönünde boyuna donatı 4 adet belirlenmiş ve yetersiz gelmesi halinde arttırılmıştır. Örnek olarak Teknopark Aselsan Şantiyesi Meyerhof yönteminde donatı miktarı Şekil 14'te görüldüğü gibi yetersiz gelmiştir ve donatı sayısı arttırılmıştır.



Şekil 14. Analiz sonuçları



Şekil 15. Analiz sonuçlarına bağlı donatı miktarı tayini

Her 3 veride de yukarıdaki adımlar izlenmiş ve 90 adet analiz yapılmıştır. Her veri için yapılan 30 adet analiz, analiz yöntemlerine göre ayrılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Bölüm 3.1, 3.2 ve 3.2' te görüldüğü gibi tablo haline getirilmiştir.

Bölüm 3.1, 3.2 ve 3.2' te tüm CPT verilerinin analiz sonuçları yer almaktadır.

3.1 CPT-3 Verileri Analiz Sonuçları

Tablo 4. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-3 verileri

DERİNLİK	UÇ DİRENCİ	YASS	BSB
	qc	fs	u2
(m)	MPa	kPa	kPa
1	4.5	22	0.08
2	3.75	21	0.06
3	3	17	0.04
4	3	17	0.04
5	5.25	17	0.08
6	12	31	0.06
7	2.25	16	0.02
8	3	9	0.06

3.1.1 Meyerhof Yöntemi Analiz Sonuçları

Tablo 5. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-3 verileri Meyerhof Yöntemi' nde yer altı suyu olmaması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (-)		
	MYYDY8MY	MYYDY8M2	MYYDY15MY
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	224,56 kPa	183,54 kPa	265,14 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	918,64 kPa	964,59 kPa	1322,02 kPa
Temel Oturması (ss)	42,97 mm	32,64 mm	32,64 mm
Güvenlik Katsayısı	4,09 > 3.00	5,26 > 3.00	4,99 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı: 7, Y Yönünde Donatı: 10) Temel Geometrisi değiştirildi. (X Yönünde: 2,5m , Y Yönünde: 2,5m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı: 12, Y Yönünde Donatı: 12) Temel Geometrisi değiştirildi. (X Yönünde: 2,5m , Y Yönünde : 2,5m) (Temel kalınlığı: 0,5 m)

Tablo 6. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-3 verileri Meyerhof Yöntemi' nde -10.00 metrede yer altı suyu olması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (10m)		
	MY10DY8MY	MY10DY8M2	MY10DY15MY
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	224,56 kPa	183,54 kPa	265,14 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	918,64 kPa	964,59 kPa	1322,02 kPa
Temel Oturması (ss)	42,97 mm	32,64 mm	32,64 mm
Güvenlik Katsayısı	4,09 > 3.00	5,26 > 3.00	4,99 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı: 7, Y Yönünde Donatı: 10) Temel Geometrisi değiştirildi. (X Yönünde: 2,5m , Y Yönünde: 2,5m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı: 12, Y Yönünde Donatı: 12) Temel Geometrisi değiştirildi. (X Yönünde: 2,5m , Y Yönünde : 2,5m) Temel kalınlığı: 0,5 m

Tablo 7. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-3 verileri Meyerhof Yöntemi' nde -2.00 metrede yer altı suyu olması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (2m)			
	MY2DY8MY	MY2DY8M2	MY2DY15MY	MY2DY15MY2
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	224,56 kPa	183,54 kPa	265,14 kPa	208,31 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	708,11 kPa	737,08 kPa	970,68 kPa	1173,92 kPa
Temel Oturması (ss)	43,96 mm	53,34 mm	64,41 mm	48,02 mm
Güvenlik Katsayısı	3,15 > 3.00	4,02 > 3.00	3,66 > 3.00	5,64 > 3.01
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı: 7, Y Yönünde Donatı: 10) Temel Geometrisi değiştirildi. (X Yönünde: 2,5m , Y Yönünde: 2,5m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı: 12, Y Yönünde Donatı: 12) Temel Geometrisi değiştirildi. (X Yönünde: 2,5m , Y Yönünde: 2,5m) Temel kalınlığı: 0,5 m	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı: 12, Y Yönünde Donatı: 14) Temel Geometrisi değiştirildi. (X Yönünde:3m , Y Yönünde: 3m) Temel kalınlığı arttırıldı: 0,6 m

3.1.2 Schmertmann Yöntemi Analiz Sonuçları

Tablo 8. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-3 verileri Schmertmann Yöntemi' nde yer altı suyu olmaması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (-)		
	SCYYDY8MY	SCYYDY8M2	SCYYDY15MY
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	224,56 kPa	288,88 kPa	399,94 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	3305,59 kPa	3021,51 kPa	3305,59 kPa
Temel Oturması (ss)	42,97 mm	53,49 mm	56,79 mm
Güvenlik Katsayısı	14,72 > 3.00	10,46 > 3.00	8,27 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:7)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:9)

Tablo 9. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-3 verileri Schmertmann Yöntemi' nde-10.00 metrede yer altı suyu olması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (10m)		
	SCY10DY8MY	SCY10DY8M2	SCY10DY15MY
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	224,56 kPa	288,88 kPa	399,94 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	3305,59 kPa	3021,51 kPa	3305,59 kPa
Temel Oturması (ss)	42,97 mm	53,49 mm	56.79 mm
Güvenlik Katsayısı	14,72 > 3.00	10,46> 3.00	8,27> 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:7)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:7) (Temel Kalınlığı: 0.5m)

Tablo 10. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-3 verileri Schmertmann Yöntemi' nde -2.00 metrede yer altı suyu olması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (2m)			
	SCY2DY8MY	SCY2DY8M2	SCY2DY15MY	SCY2DY15MY2
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	224,56 kPa	288,88 kPa	399,94 kPa	457,46 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	3305,59 kPa	3021,51 kPa	3305,59 kPa	3124,98 kPa
Temel Oturması (ss)	43,96 mm	54,68 mm	59,61 mm	111,52 mm
Güvenlik Katsayısı	14,72 > 3.00	10,46 > 3.00	8,27 > 3.00	6,83 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:7)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:9) (Temel Kalınlığı: 0.5m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:9) (Temel Kalınlığı: 0.6m)

3.1.3 Skempton Yöntemi Analiz Sonuçları

Tablo 11. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-3 verileri Skempton Yöntemi' nde yer altı suyu olmaması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (-)		
	SKYYDY8MY	SKYYDY8M2	SKYYDY15MY
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	224,56 kPa	288,88 kPa	399,94 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	2476,50 kPa	2330,60 kPa	2476,50 kPa
Temel Oturması (ss)	42,97 mm	53,49 mm	56,79 mm
Güvenlik Katsayısı	11,03 > 3.00	8,07> 3.00	6,19 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:7)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:9) (Temel Kalınlığı: 0.5m)

Tablo 12. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-3 verileri Skempton Yöntemi' nde -10.00 metrede yer altı suyu olması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (10m)		
	SKY10DY8MY	SKY10DY8M2	SKY10DY15MY
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	224,56 kPa	288,88 kPa	399,94 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	2476,50 kPa	2330,60 kPa	2476,50 kPa
Temel Oturması (ss)	42,97 mm	53,49 mm	56,79 mm
Güvenlik Katsayısı	11,03 > 3.00	8,07> 3.00	6,19 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:7)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:9) (Temel Kalınlığı: 0.5m)

Tablo 13. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-3 verileri Skempton Yöntemi' nde -2.00 metrede yer altı suyu olması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (2m)			
	SKY2DY8MY	SKY2DY8M2	SKY2DY15MY	SKY2DY15MY2
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	224,56 kPa	288,88 kPa	399,94 kPa	457,46 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	2491,35 kPa	2343,23 kPa	2491,35 kPa	2389,94 kPa
Temel Oturması (ss)	43,96 mm	54,68 mm	59,61 mm	111,52 mm
Güvenlik Katsayısı	11,09 > 3.00	8,11> 3.00	6,23 > 3.00	5,22 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:7)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:9) (Temel Kalınlığı: 0.5m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:9) (Temel Kalınlığı: 0.6m)

3.2 CPT-2 Verileri Analiz Sonuçları

Tablo 14. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-2 verileri

DERİNLİK	UÇ DİRENCİ	YASS	BSB
	qc	fs	u2
(m)	mpa	kpa	kpa
-1	6.75	15	0.04
-2	5.25	27	0.08
-3	4	18.5	0.08
-4	4.5	17	0.08
-5	4.5	17	0.08
-6	3.75	15	0.1
-7	5.25	11	0.14
-8	21	33	0.42

3.2.1 Meyerhof Yöntemi Analiz Sonuçları

Tablo 15. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-2 verileri Meyerhof Yöntemi' nde yer altı suyu olmaması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (-)		
	MYYDY8MY	MYYDY8M2	MYYDY15MY
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	224,56 kPa	288,88 kPa	265,14 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	1170,17 kPa	1004,63 kPa	1313,30 kPa
Temel Oturması (ss)	34,44 mm	39,89 mm	58,11 mm
Güvenlik Katsayısı	5,21 > 3.00	3,48 > 3.00	4,95 > 3.01
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:7)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:12, Y Yönünde Donatı:12) Geometri değişti. (X Yönünde :2.5m, Y Yönünde :2.5m) (Temel Kalınlığı :0.5m)

Tablo 16. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-2 verileri Meyerhof Yöntemi' nde -10.00 metrede yer altı suyu olması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (10m)		
	MY10DY8MY	MY10DY8M2	MY10DY15MY
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	224,56 kPa	288,88 kPa	265,14 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	1170,17 kPa	1004,63 kPa	1338,46 kPa
Temel Oturması (ss)	34,44 mm	39,89 mm	54,60 mm
Güvenlik Katsayısı	5,21 > 3.00	3,48 > 3.00	5,05 > 3.01
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:7)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:12, Y Yönünde Donatı:12) Geometri değişti. (X Yönünde :2.5m, Y Yönünde :2.5m) (Temel Kalınlığı:0.5m)

Tablo 17. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-2 verileri Meyerhof Yöntemi' nde -2.00 metrede yer altı suyu olması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (2m)			
	MY2DY8MY	MY2DY8M2	MY2DY15MY	MY2DY15MY2
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	224,56 kPa	183,54 kPa	265,14 kPa	293,82 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	902,00 kPa	916,80 kPa	982,75 kPa	946,81 kPa
Temel Oturması (ss)	35,24 mm	27,20 mm	56,15 mm	59,28 mm
Güvenlik Katsayısı	4,02 > 3.00	5,00> 3.00	3,71 > 3.00	3,22 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:7, Y Yönünde Donatı:10) Geometri değişti. (X Yönünde Donatı:2.5, Y Yönünde	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:12, Y Yönünde Donatı:12) Geometri değişti. (X Yönünde:2.5m, Y Yönünde:2.5m) (Temel Kalınlığı:0.5m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:12, Y Yönünde Donatı:12) Geometri değişti. (X Yönünde: 2.5m, Y Yönünde :2.5m) (Temel Kalınlığı: 0.6m)

3.2.2 Schmertmann Yöntemi Analiz Sonuçları

Tablo 18. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-2 verileri Schmertmann Yöntemi' nde yer altı suyu olmaması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (-)		
	SCYYDY8MY	SCYYDY8M2	SCYYDY15MY
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	224,56 kPa	288,88 kPa	399,94 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	4288,25 kPa	4176,15 kPa	4888,25 kPa
Temel Oturması (ss)	34,44 mm	39,89 mm	77,61 mm
Güvenlik Katsayısı	19,10 > 3.00	14,46 > 3.00	10,72 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:7)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:7, Y Yönünde Donatı:7) (Temel Kalınlığı: 0.5m)

Tablo 19. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-2 verileri Schmertmann Yöntemi' nde -10.00 metrede yer altı suyu olması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (10m)		
	SCY10DY8MY	SCY10DY8M2	SCY10DY15MY
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	224,56 kPa	288,88 kPa	399,94 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	4288,25 kPa	4176,15 kPa	4288,25 kPa
Temel Oturması (ss)	34,44 mm	39,89 mm	77,61 mm
Güvenlik Katsayısı	19,10 > 3.00	14,46 > 3.00	10,72 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:7)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:9) (Temel Kalınlığı: 0.5m)

Tablo 20. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-2 verileri Schmertmann Yöntemi' nde -2.00 metrede yer altı suyu olması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (2m)			
	SCY2DY8MY	SCY2DY8M2	SCY2DY15MY	SCY2DY15MY2
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	224,56 kPa	288,88 kPa	399,94 kPa	457,46 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	4288,25 kPa	4176,15 kPa	4288,25 kPa	4224,46 kPa
Temel Oturması (ss)	35,24 mm	40,77 mm	79,87 mm	84,82 mm
Güvenlik Katsayısı	19,10 > 3.00	14,46 > 3.00	10,72 > 3.00	9,23 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:7)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:9) (Temel Kalınlığı: 0.5m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:9) (Temel Kalınlığı: 0.6m)

3.2.3 Skempton Yöntemi Analiz Sonuçları

Tablo 21. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-2 verileri Skempton Yöntemi' nde yer altı suyu olmaması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (-)		
	SKYYDY8MY	SKYYDY8M2	SKYYDY15MY
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	224,56 kPa	288,88 kPa	399,94 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	3215,57 kPa	3223,10 kPa	3215,57 kPa
Temel Oturması (ss)	34,44 mm	39,89 mm	77,61 mm
Güvenlik Katsayısı	14,32 > 3.00	11,16>3.00	8,04 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:7)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:9) (Temel Kalınlığı: 0.5m)

Tablo 22. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-2 verileri Skempton Yöntemi' nde -10.00 metrede yer altı suyu olması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (10m)		
	SKY10DY8MY	SKY10DY8M2	SKY10DY15MY
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	224,56 kPa	288,88 kPa	399,94 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	3215,57 kPa	3223,10 kPa	3215,57 kPa
Temel Oturması (ss)	34,44 mm	39,89 mm	77,61 mm
Güvenlik Katsayısı	14,32 > 3.00	11,16> 3.00	8,04 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:7)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:9) (Temel Kalınlığı: 0.5m)

Tablo 23. Teknopark Aselsan Şantiyesi CPT-2 verileri Skempton Yöntemi' nde -2.00 metrede yer altı suyu olması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (2m)			
	SKY2DY8MY	SKY2DY8M2	SKY2DY15MY	SKY2DY15MY2
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	224,56 kPa	288,88 kPa	399,94 kPa	457,46 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	3230,42 kPa	3235,74 kPa	3230,42 kPa	3228,31 kPa
Temel Oturması (ss)	35,24 mm	40,77 mm	79,87 mm	84,82 mm
Güvenlik Katsayısı	14,39 > 3.00	11,20 > 3.00	8,08 > 3.00	7,06 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:5, Y Yönünde Donatı:7)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:9) (Temel Kalınlığı: 0.5m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:9) (Temel Kalınlığı: 0.6m)

3.3 Kuzey Marmara Otoyolu-2 (KMO-2) Verileri Analiz Sonuçları

Tablo 24. Kuzey Marmara Otoyolu-2 (KMO-2) verileri

DERİNLİK	UÇ DİRENCİ	YASS	BSB
	qc	fs	u2
(m)	mpa	kpa	kpa
7.44	1.864	40.8	0.7
10.44	1.547	89.5	-0.2
13.44	1.346	31.4	-0.5
16.44	1.153	65	-0.9
19.44	1.91	95.8	-0.7
22.44	0.564	15	-0.7
25.44	2.193	16.7	0.4

3.3.1 Meyerhof Yöntemi Analiz Sonuçları

Tablo 25. Kuzey Marmara Otoyolu-2 verileri Meyerhof Yöntemi' nde yer altı suyu olmaması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (-)		
	MYYDY8MY	MYYDY8M2	MYYDY15MY
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	90,30 kPa	82,18 kPa	119,43 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	345,99 kPa	375,54 kPa	432,52 kPa
Temel Oturması (ss)	84,68 kPa	63,64 kPa	163,83 kPa
Güvenlik Katsayısı	3,83 > 3.00	4,57 > 3.00	3,62 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:12, Y Yönünde Donatı:12) Geometri değişti. (X Yönünde :3.5, Y Yönünde :3.5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:15, Y Yönünde Donatı:17) Geometri değişti. (X Yönünde :4, Y Yönünde :4) TemeL Kalınlığı (0.5 m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:25, Y Yönünde Donatı:25) Geometri değişti. (X Yönünde :4, Y Yönünde :4) TemeL Kalınlığı (0.6 m)

Tablo 26. Kuzey Marmara Otoyolu-2 verileri Meyerhof Yöntemi' nde -10.00 metrede yer altı suyu olması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (10m)		
	MY10DY8MY	MY10DY8M2	MY10DY15MY
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	90,30 kPa	82,18 kPa	119,43 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	345,99 kPa	375,54 kPa	432,52 kPa
Temel Oturması (ss)	84,68 kPa	63,64 kPa	163,83 kPa
Güvenlik Katsayısı	3,83 > 3.00	4,57 > 3.00	3,62 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:12, Y Yönünde Donatı:12) Geometri değişti. (X Yönünde :3.5, Y Yönünde :3.5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:15, Y Yönünde Donatı:17) Geometri değişti. (X Yönünde :4, Y Yönünde :4) TemeL Kalınlığı (0.5 m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:25, Y Yönünde Donatı:25) Geometri değişti. (X Yönünde :4, Y Yönünde :4) TemeL Kalınlığı (0.6 m)

Tablo 27. Kuzey Marmara Otoyolu-2 verileri Meyerhof Yöntemi' nde -2.00 metrede yer altı suyu olması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (2m)			
	MY2DY8MY	MY2DY8M2	MY2DY15MY	MY2DY15MY2
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	75,04 kPa	82,18 kPa	99,78 kPa	104,37 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	288,35 kPa	254,63 kPa	334,52 kPa	316,84 kPa
Temel Oturması (ss)	47,10 kPa	64,56 kPa	113,14 kPa	125,62 kPa
Güvenlik Katsayısı	3,84 > 3.00	3,10 > 3.00	3,35 > 3.00	3,04 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:15, Y Yönünde Donatı:15) Geometri değişti. (X Yönünde :4, Y Yönünde :4)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:15, Y Yönünde Donatı:17) Geometri değişti. (X Yönünde :4, Y Yönünde :4) TemeL Kalınlığı (0.5 m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:30, Y Yönünde Donatı:30) Geometri değişti. (X Yönünde :4,5, Y Yönünde :4,5) TemeL Kalınlığı (0.6 m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:30, Y Yönünde Donatı:30) Geometri değişti. (X Yönünde :4,5, Y Yönünde :4,5) TemeL Kalınlığı (0.6 m)

3.3.2 Schmertmann Yöntemi Analiz Sonuçları

Tablo 28. Kuzey Marmara Otoyolu-2 verileri Schmertmann Yöntemi' nde yer altı suyu olmaması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (-)		
	SCYYDY8MY	SCYYDY8M2	SCYYDY15MY
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	113,80 kPa	131,16 kPa	147,77 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	505,21 kPa	427,91 kPa	604,38 kPa
Temel Oturması (ss)	148,10 kPa	197,62 kPa	242,66 kPa
Güvenlik Katsayısı	4,44 > 3.00	3,26 > 3.00	4,09 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:9) Geometri değişti. (X Yönünde :3, Y Yönünde :3)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:12) Geometri değişti. (X Yönünde :3, Y Yönünde :3) TemeL Kalınlığı (0.5 m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:20, Y Yönünde Donatı:20) Geometri değişti. (X Yönünde :3,5, Y Yönünde :3,5) TemeL Kalınlığı (0.5 m)

Tablo 29. Kuzey Marmara Otoyolu-2 verileri Schmertmann Yöntemi' nde -10.00 metrede yer altı suyu olması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (10m)		
	SCY10DY8MY	SCY10DY8M2	SCY10DY15MY
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	113,80 kPa	131,16 kPa	147,77 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	505,21 kPa	427,91 kPa	604,38 kPa
Temel Oturması (ss)	148,10 kPa	197,62 kPa	242,66 kPa
Güvenlik Katsayısı	4,44 > 3.00	3,26 > 3.00	4,09 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:9) Geometri değişti. (X Yönünde :3, Y Yönünde :3)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:12) Geometri değişti. (X Yönünde :3, Y Yönünde :3) TemeL Kalınlığı (0.5 m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:20, Y Yönünde Donatı:20) Geometri değişti. (X Yönünde :3,5, Y Yönünde :3,5) TemeL Kalınlığı (0.5 m)

Tablo 30. Kuzey Marmara Otoyolu-2 verileri Schmertmann Yöntemi' nde -2.00 metrede yer altı suyu olması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (2m)			
	SCY2DY8MY	SCY2DY8M2	SCY2DY15MY	SCY2DY15MY2
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	113,80 kPa	131,16 kPa	147,77 kPa	158,05 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	505,21 kPa	427,91 kPa	604,38 kPa	558,50 kPa
Temel Oturması (ss)	150,56 kPa	200,96 kPa	247,74 kPa	278,51 kPa
Güvenlik Katsayısı	4,44 > 3.00	3,26 > 3.00	4,09 > 3.00	3,53 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:9) Geometri değişti. (X Yönünde :3, Y Yönünde :3)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:9, Y Yönünde Donatı:12) Geometri değişti. (X Yönünde :3, Y Yönünde :3) TemeL Kalınlığı (0.5 m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:20, Y Yönünde Donatı:20) Geometri değişti. (X Yönünde :3,5, Y Yönünde :3,5) TemeL Kalınlığı (0.5 m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:20, Y Yönünde Donatı:23) Geometri değişti. (X Yönünde :3,5, Y Yönünde :3,5) TemeL Kalınlığı (0.6 m)

3.3.3 Skempton Yöntemi Analiz Sonuçları

Tablo 31. Kuzey Marmara Otoyolu-2 verileri Skempton Yöntemi' nde yer altı suyu olmaması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (-)		
	SKYYDY8MY	SKYYDY8M2	SKYYDY15MY
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	90,30 kPa	101,02 kPa	119,43 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	384,97 kPa	343,83 kPa	431,62 kPa
Temel Oturması (ss)	84,68 kPa	113,65 kPa	163,83 kPa
Güvenlik Katsayısı	4,26 > 3.00	3,40 > 3.00	3,61 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:12, Y Yönünde Donatı:12) Geometri değişti. (X Yönünde :3.5, Y Yönünde :3.5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:12, Y Yönünde Donatı:15) Geometri değişti. (X Yönünde :3.5, Y Yönünde :3.5) TemeL Kalınlığı (0.5 m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:25, Y Yönünde Donatı:25) Geometri değişti. (X Yönünde :4, Y Yönünde :4) TemeL Kalınlığı (0.6 m)

Tablo 32. Kuzey Marmara Otoyolu-2 verileri Skempton Yöntemi' nde -10.00 metrede yer altı suyu olması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (10m)		
	SKY10DY8MY	SKY10DY8M2	SKY10DY15MY
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	90,30 kPa	101,02 kPa	119,43 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	384,97 kPa	343,83 kPa	431,62 kPa
Temel Oturması (ss)	84,68 kPa	113,65 kPa	163,83 kPa
Güvenlik Katsayısı	4,26 > 3.00	3,40 > 3.00	3,61 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:12, Y Yönünde Donatı:12) Geometri değişti. (X Yönünde :3.5, Y Yönünde :3.5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:12, Y Yönünde Donatı:15) Geometri değişti. (X Yönünde :3.5, Y Yönünde :3.5) TemeL Kalınlığı (0.5 m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:25, Y Yönünde Donatı:25) Geometri değişti. (X Yönünde :4, Y Yönünde :4) TemeL Kalınlığı (0.6 m)

Tablo 33. Kuzey Marmara Otoyolu-2 verileri Skempton Yöntemi' nde -2.00 metrede yer altı suyu olması durumu

Analiz Sonuçları	YASS (2m)			
	SKY2DY8MY	SKY2DY8M2	SKY2DY15MY	SKY2DY15MY2
Yükün eksantrisitesi	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli	Yükün eksantrisitesi Yeterli
En elverişsiz yük kombinasyonu	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)	No 1. (Düşey Yük)
Kontak Gerilmesi (σ)	90,30 kPa	101,02 kPa	119,43 kPa	126,03 kPa
Temel Zemini Taşıma Kapasitesi (Rd)	405,93 kPa	362,96 kPa	454,66 kPa	431,90 kPa
Temel Oturması (ss)	85,96 kPa	115,43 kPa	167,03 kPa	185,59 kPa
Güvenlik Katsayısı	4,50 > 3.00	3,59 > 3.00	3,81 > 3.00	3,43 > 3.00
Açıklama	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:12, Y Yönünde Donatı:12) Geometri değişti. (X Yönünde :3.5, Y Yönünde :3.5)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:12, Y Yönünde Donatı:15) Geometri değişti. (X Yönünde :3.5, Y Yönünde :3.5) TemeL Kalınlığı (0.5 m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:25, Y Yönünde Donatı:25) Geometri değişti. (X Yönünde :4, Y Yönünde :4) TemeL Kalınlığı (0.6 m)	Düşey yönde taşıma kapasitesi Yeterli Donatı sayısı arttırıldı. (X Yönünde Donatı:25, Y Yönünde Donatı:28) Geometri değişti. (X Yönünde :4, Y Yönünde :4) TemeL Kalınlığı (0.6 m)

4. Sonuçlar

Bu çalışmada üç farklı CPT verisi kullanılarak yüzeysel temel tasarımına dair analizleri yapılmıştır. Geo5 Geoteknik Hesap Programı kullanılarak taşıma gücü, boyutlandırma ve zımbalama tahkikleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre yüzeysel temeller tasarlanmıştır. Bölüm 3.1, 3.2 ve 3.3' te tüm verilerin tahkik ve boyutlandırmasına dair analiz sonuçları açıklamalarıyla birlikte verilmiştir.

Temel analizi kapsamında analiz yöntemlerinden Meyerhof, Schmertmann ve Skempton yöntemleri kullanılmıştır. Yüzeysel temel tasarımı analizlerinde "FS" güvenlik sayısı genel olarak 2,5-3,5 değerleri arasındadır. Bu sebeple güvenlik sayısı 3 olarak seçilebilir. Çalışmada kullanılan 3 veri için yapılan 90 farklı analizde de bu kriter göz önüne alınmıştır.

Etki ettirilen yüklere karşılık olarak her analizde öncelikle taşıma gücü kriterinin sağlanması için temel boyutları büyütülmüştür. Daha sonrasında donatı miktarı temel boyutlarına göre ayarlanmıştır. Son olarak zımbalama tahkikine bakılmıştır. Yapılan çalışmada asıl amaç CPT değerleri düşük ve birbirinden farklı olan 3 zemini karşılaştırıp temel tasarımında ne gibi farklılıkların meydana geleceğinin incelenmesidir.

Yapılan analizler sonucunda:

- Meyerhof yönteminin Schmertmann ve Skempton yöntemlerine göre daha güvenli tarafta kalan sonuçlar verdiği,
- Yeraltı suyunun olmaması ya da 10 metre derinde olması durumunda temel tasarımları arasında pek fark yokken 2 metre derinde olması durumunda temel taşıma gücü dayanımını düşürdüğü,
- Artan yük ve moment değerlerine bağlı olarak donatı ve geometri değişikliği yapılması gerektiği ve bu değişikliklerin belli sabitlere bağlı olmadığı görülmüştür.

Kaynaklar

Önalp, A.,- Sert, S., (2006). *Geoteknik Bilgisi III Bina Temelleri*, İstanbul.

Güneş, E. (2013). Zemin İncelemelerinde Standart Penetrasyon Deneyi ile Koni Penetrasyon Deneyi Değerlerinin Karşılaştırılması. *Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*

Erol, O.A. & Çekinmez, Z. 2014. *Geoteknik Mühendisliğinde Saha Deneyleri*, Ankara.

CPT Deneyi nedir ve nasıl yapılır? 20.04.2020 http://www.kursatozcan.com/cpt_deneyi_nedir_nasil_yapilir/ (2020).

Orhan, M.-Ateş, A. (2011). Koni Penetrasyon Testi (CPT) Verileri ile Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Manisa-Saruhanlı Örneği ile Araştırılması. *Politeknik Dergisi,* 14/1, 15-23.

Koni Penetrasyon Deneyi. 30.07.2023 kalitekontrol.net/alt-yapi/koni-penetrasyon-deneyi-cpt.html (2023).

Barış, D. (2022). Use Of CPTU To Estimate Consolidation Properties Of Transitional Soils / Geçiş Zeminlerinde Konsolidasyon Özelliklerinin Tahmini İçin CPTU Kullanımı. *Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*

CPT (Konik Penetrasyon) Deneyi nedir? Nasıl yapılır? 30.07.2023
http://www.zeminarastirma.net/deneyler/cpt_deneyi_nedir_nasil_yapilir.html (2023)

Uncuoğlu, E. (2021). *Yüzeysel Temeller – II* slaytı. Erciyes Üniversitesi.

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

UMAGD, (2023) 15(3), s289-s301.

10.29137/umagd.1378962

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:3 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue

Araştırma Makalesi / Research Article

Asansörlerde Kullanılan Otomatik Kapı Mekanizması Raylarının Tribolojik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi

The Experimental Study of Tribological Properties of the Automatic Door Mechanism Rails Used in the Elevators

Ertuğrul Durak*[1], Mesut Tor [2]

[1]*Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye*
[1]*Özgün Soğutma ve Gıda İnşaat San. Tic. Ltd. Şti., Isparta, Türkiye*

***Başvuru/Received**: 20/10/2023* ***Kabul / Accepted**: 06/11/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*
***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Öz

Bu makalede asansörlerdeki otomatik kabin kapı ve kat kapıları mekanizmasındaki makara ile ray arasında çalışma sırasında oluşan sürtünme, aşınma özellikleri incelenmiştir. Asansör sistemlerindeki kat ve kabin kapıları açma kapama mekanizmasındaki ray ve makaralarının düzgün ve hasarsız çalışmaları hem emniyet hem de konfor açısından önemlidir. Asansörlerdeki bu kapılardaki ray-makara arasında, çalışma sistemine göre farklılık gösterse de genellikle kuru ve/veya sınır sürtünme şartları oluşmaktadır. Bu çalışma şartlarında aşınma da kaçınılmaz olmaktadır. Literatürde ray, fren, makara gibi elemanların tribolojik özelliklerinin incelenmesi, genellikle Pim – Disk veya Gidip-Gelme Aşınma Test Cihazları gibi model test düzenekleri ile yapılmaktadır. Çalışmada iki tip test sistemi kullanılmıştır. Birincisi, proje (Durak, 2023) kapsamında üretici firmaların da öneri ve desteği ile tasarlanarak üretilen asansör kabin kapı açma kapma sistem test modeli olurken, ikincisi Gidip Gelme Aşınma Test Cihazıdır. Test numunesi olarak piyasada çok yaygın kullanılan Galvaniz kaplanmış ray ve AFC (Kuru/Kaygan Film Yağlama Kaplama) teknolojisi ile kaplanmış ray numuneler kullanılmıştır. Numunelerin sürtünme katsayıları ve aşınma miktarları deneysel olarak tespit edilerek elde edilen test sonuçları yorumlanmıştır. Ayrıca hem makara hem de raylarda oluşan hasar durumları incelenmiştir. Elde edilen bulguların, asansör ve asansör elemanları imalatçıları için bir literatür, ray ve makara malzemesi geliştirilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler

"Asansör, makara, ray, sürtünme katsayısı, aşınma, Galvaniz kaplama, AFC kaplama"

Abstract

In this paper, properties such as friction and wear that occur during the operation between the rollers and rail in the automatic cabin door and landing door mechanisms of elevators were studied. Smooth and failure-free operation of the rails and rollers in the floor and cabin doors opening and closing mechanisms, which are integral components of elevator systems, is crucial for ensuring safety and comfort. Although elevator floor and car door mechanism rails vary according to the operating system, they generally operate in dry and/or boundary friction conditions. Under these working conditions, wear is inevitable. In the literature, the study of the tribological properties of materials such as rail, brake, and roller is usually done with model test rigs such as Pin on Disc or Reciprocating wear test systems. Two types of presented test systems were used in the study. First, a test model with an elevator car door opening and closing system designed and produced with the suggestions and support of the manufacturers within the scope of the project (Durak, 2023), and secondly, the reciprocating wear test rig were used. Galvanized coated rail and AFC (Dry/Slippery Film Lubricating Coating) technology, which is widely used in the market, were used as test specimens. The friction coefficients and wear amounts of the samples were determined experimentally and the test results obtained were interpreted. In addition, damage cases were observed on both the roller and the rails. It is expected that the findings will greatly contribute to the development of literature, rail, and roller materials for elevator and elevator element manufacturers.

Key Words

"Elevator, pulley, rail, coefficient of friction, wear, Galvanized coating, AFC coating"

***Sorumlu Yazar:** ertugruldurak@sdu.edu.tr*

1. Giriş

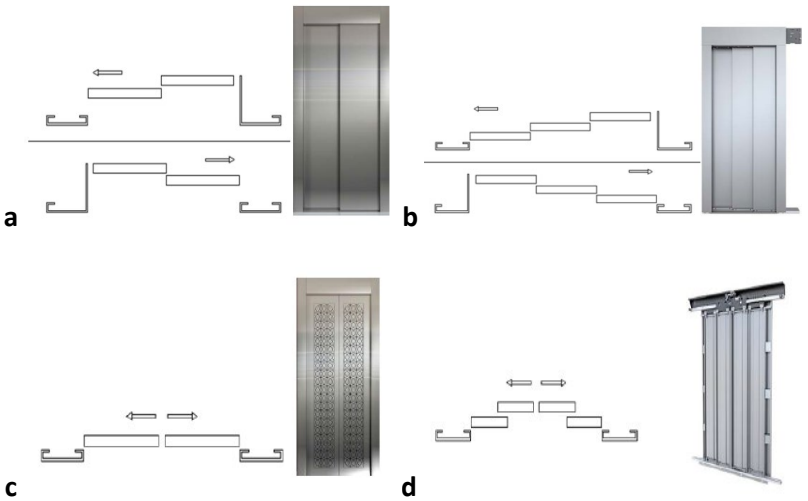
Asansörler binalarda özellikle dikey ulaşımın ana aracıdır ve günümüzde yüksek binaların başarısı için kritik öneme sahiptir. En yaygın kullanılan asansör tipi halatlı asansörlerdir. Bina ulaşım sistemlerinin tasarımı, üretimi, kurulumu ve analizinde çok sayıda farklı disiplin yer almaktadır. Binalardaki asansörlerin sayısı, hızı, kapasitesi, tasarımı ve seçiminde asansör trafik mühendisliğinden yararlanılmaktadır. Elektrik, elektronik ve makine mühendisliği, etkili ve güvenli asansörlerin tasarımı ve üretiminde, merkezi bir öneme sahiptir. Asansörlerin çalışacakları binanın içine güvenli bir şekilde montajının yapılması ve yapının asansörler tarafından uygulanan düşey ve yatay kuvvetleri destekleyebilmesini sağlamak için binadaki asansör boşluğunun dikkatli bir şekilde planlanması önemlidir.(Al-Sharif, 2021).

Asansörler düşey ve yatay yönde insan veya eşya taşımaktadır. Rezidans gibi çok yüksek katlı bina, hastane, iş yeri, konut, yurt, resmi kurum gibi binalarda da insanlar tarafından kullanımı zorunlu hale gelmiştir. Binaların vazgeçilmez bir bölümüdür. Artık asansörsüz bir yerleşim biriminden söz etmek imkânsız hale gelmiştir(Ünverdi & Ünverdi, 2010).

Asansör sistemleri genel olarak kılavuz raylar, halat, paten, tampon, fren mekanizması, paraşüt sistemi, kabin, kapı, makine motor grubu, kuvvet ve kumanda panosu ve denge ağırlığı gibi ana elemanlardan oluşmaktadır. Eşya ve insanların bina katları arasında nakledilmesi için askı halatlarına bağlı, dış yüzeyi çelik profil iskeletli, açılıp kapanabilir kapılara sahip kabinler mevcuttur. Bu kabinlerdeki kapılar basit, yarı otomatik (çarpma kapı) veya tam otomatik olabilmektedir(İmrak & Gerdemeli, 2000, Yurtseven, 2010).

Asansör sistemlerinde, duraklarda kat kapıları ve kabinlerde ise kabin kapıları mevcuttur. Tam otomatik asansörün kapıları, kabin kapısı mekanizmasında bulunan motor ile tahrik edilmektedir. Asansör kabini hedefteki kat durağına ulaştığı zaman, kabin ve kat kapısı aynı zamanda birlikte açma ve kapama işlemi yapmaktadır.

Asansör durak kat ve kabin kapıları, istenen kapasitelere göre farklı ölçülerde ve asansör kuyusu boyutlarına göre üretilmektedir. Asansör kabini hareketten önce, kat kapılarının kapanması emniyet açısından gereklidir. Asansörün çalışma ve/veya asansörün çalışmadığı durumlarda da diğer katlarda da uygun emniyet elemanları ile kat kapılarının açılmaması temin edilmektedir. Asansörler yaygın kullanılan kat kapılarının açılma hareket yönüne göre farklı tiplerde (Şekil 1.) olmaktadır. Kat kapılarının tipinin seçiminde asansörün yük ve kişi taşıma kapasitesi ve kullanım şartları önemli olmaktadır. Otomatik veya elle açılan kat kapılarının eş zamanlı olarak kat kapısının kapandığını sağlayan elektriksel bağlantılarla temin eden kilit düzenekleri bulunmaktadır(Görmüş & Okçu, 2021).



Şekil 1. (a) İki Panelli Teleskopik Kat Kapısı, (b) Üç Panelli Teleskopik Kat Kapısı,
(c) İki Panelli Merkezi Kat Kapısı, (d) Dört Panelli Merkezi Kat Kapısı,
Şekil 1. Kat Kapı açılma tipleri (Görmüş & Okçu, 2021)

Asansör sistemlerinden biri olan kapı taşıma rayları ise kapının ağırlığının taşınması ve kapının hareket etmesini (açılıp-kapanmasını) sağlamaktadır. Kapı panellerinin takılı olduğu askı levhaları, raylar boyunca makaralar üzerinde hareket etmektedir. Bu hareket esnasında makara ile raylar arasında sürtünme ve aşınma olayları kaçınılmazdır(Şekil 2.).



Şekil 2. Testlerde kullanılan Panel Merkezi Açılır kapı örnekleri(AKE, 2023, İBK Asansör, 2023)

Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın Asansör İşletme, Bakım ve Periyodik Kontrol Yönetmeliği'nin 15. Maddesi gereğince, "Bina sorumlusu, asansörün güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak üzere ayda bir kez bakımını ve yılda bir kez periyodik kontrolünü yaptırmaktan, bakım ve periyodik kontrol ücretinin ödenmesinden sorumludur." olduğu belirtilmektedir. Asansörlerin periyodik bakım onarım direktiflerinde göz önüne alınması gereken kontrollerden kabin ve kat kapıları ile ilgili olarak;

- Kapı kapama kontak veya kilit kontrolü,
- Pürüzsüz hareket yönünden kapıların kontrolü,
- Kapı kılavuzlama kontrolü,
- Kapı boşluk aralıklarının kontrolü,
- Tel halat, zincir veya kayışların uygunluk kontrolü,
- Yolcu (Kabin) kapısı koruma tertibatın kontrolü,
- Yağlama kontrolü

şeklinde yapılmaktadır(Karahan, 2016, TSE, 2009, BSTB, 2016).

Aşınma oksidatif, adhezif, abrazif, yüzey yorulması ve plastik deformasyon gibi farklı mekanizmalarla açıklanmaktadır. Literatürde "aşınma" tanımındaki ortak tema, temas halindeki yüzeylerdeki malzeme kaybına bağlı aşınma ve/veya malzemenin bu temas bölgesinin uzağında oluşan plastik deformasyona bağlı olmasıdır(Slatter vd., 2023). Gerek bu malzeme kayıpları gerekse söz konusu bu deformasyonlar makinelerin çalışmasını etkilemekte, bu da ekonomik kayıpları doğurmaktadır.

Aşınma hasarını azaltmak veya önlemek için, yağlayıcı malzemelerin kullanılması, temas bölgelerine yüzey işlemlerin uygulanması, yapısal tasarımın iyileştirilmesi ve alternatif yeni sürtünme çifti malzemelerinin kullanılması gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. En basiti, doğrudan katı-katı temasını azaltmak ve arayüz durumu kuru ortamdan yağlı ortama değiştirmek için temas ara yüzüne yağlayıcı uygulamaktır. Önceki çalışmalar, katı yağlayıcıların yüksek hız, ağır yük, yüksek sıcaklık, yüksek vakum ve yüksek kirlilik altında sıvı yağlayıcılardan daha kararlı ve aşınmaya dayanıklı olduğunu göstermiştir. Katı yağlayıcı kullanımı ile sıvı yağlamalı yüzeylerdeki sıvı yağlayıcı miktarının yetersizliği veya yüksek yağ basıncının neden olduğu çatlak genişlemesi ve ilerlemesi sorunlarını etkili bir şekilde azaltılacağı da bilinmektedir. Bununla birlikte, zayıf yağlayıcı yapışması ve verimsizlik ile ilgili sorunlar genellikle katı yağlayıcı katı tozun doğrudan kullanımını sınırlamaktadır. Yüzey işleme teknolojisinin gelişmesiyle birlikte araştırmacılar, katı yağlayıcı ve yüzey mühendisliğini birleştirildiği yüzeye bağlanmış katı yağlayıcı kaplama teknolojisi ile gerçekleştirilebilmektedir. Temas yüzeyine yapışan katı yağlayıcı kaplama teknolojisi, katı yağlayıcının organik veya inorganik bir bağlayıcı sistem içinde dağılmasına ve daha sonra sürtünme parçasının yüzeyinde kaplanmasına imkân tanımaktadır. Kürlenmeden sonra, katı yağlayıcı kaplama, aşınmaya karşı olağanüstü bir direnç göstermektedir Böylece kaplanan iş parçasının hizmet ömrünü önemli ölçüde uzatabilirken enerji tüketimini azaltabilmektedir. Yüzeye bağlanmış çevre dostu olan bu katı yağlayıcı kaplamalar tribolojik problemlerin çözümü olarak otomotiv, havacılık, her türlü mekanik ekipman ve nükleer santrallerde kullanımda mükemmel bir umut sunmaktadır(Yin vd., 2023).

Termal püskürtme teknolojileri, mekanik parça yüzeyinin güçlendirilmesi ve korunma teknolojisi olarak, mühendislik malzemelerinin aşınma ve korozyona karşı korunmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Termal püskürtme teknolojisi ile hazırlanan metal kaplama, malzeme yüzeyinin sürtünme performansını ve sertliğini artırarak kayma performansında ve aşınma direncinde önemli rol oynamaktadır. Bu tip kaplama uygulamaları, uzun hizmet ömrüne, kararlı sürtünme katsayısına, toksin organik çözücülerin kullanılmamasına, daha iyi aşınma direncine ve yüksek sıcaklıkta oksidasyon direncine sahiptir(Chen vd., 2021).

Çalışma sırasında birbiri ile temasta olan yüzeylerde sıvı film haricinde katı halde yağlayıcı malzemelerin yüzeye tabaka halinde bağlanması ile düşük sürtünme katsayılı bir hareket elde etmek mümkündür. Bu kaplama tabakası, sürtünme ve aşınma özelliğini iyileştirdiği gibi yüzeyi de korozyon başta olmak üzere çeşitli saldırgan çevre şartlarına da koruyabilmektedir. Yüzey farklı

malzemelerden oluşsa da bu kaplama ile tek çeşit bir kaplamayla homojenlik sağlamak mümkündür. Bu yüzey işlemi, ıslak tipi boyama işlemleri ile benzerlik göstermektedir. Kaplama malzemesine batırma, basınçlı hava ile püskürtme veya daldırma-döndürme metotları uygulanabilmektedir. Bu yüzey kaplama işlemi ile 5-20 μm bir tabaka kalınlığı elde etmek mümkündür. Bu yüzey işleminde genellikle MoS_2, Grafit ve Politetrafloraetilen (PTFE) kuru yağlama maddesi olarak kullanırken, epoksi, akrilik, Polyamid-imid (PAI) poliüretan gibi malzemeler de birleştirici olarak kullanılmaktadır. İnce katı yağlama tabakası, elemanın çalışma süresince beklenen yağlama görevlerini gerçekleştirebilmektedir. Böylece en az aşınma hasarı elde etmek mümkün olabilmektedir. Söz konusu bu yüzey kaplama işlemi literatürde sürtünme azaltan veya modife edici kaplama (Anti Friction Coatings "AFC") şeklinde de adlandırılmaktadır(EST, 2023).

Metal makine elemanlarının yüzeylerinin diğer metallerle kaplanması, ortamda bulunan dış etkilere karşı korumada en başarılı yollardan birisidir. Çinko diğer metallere göre çok daha fazla aktif özelliğe sahip olduğundan, en fazla tercih edilen Çinko esaslı kaplama türüdür. Bunu krom, nikel, bakır, alüminyum, altın, kalay vb. metal malzemeler kullanılmaktadır. Metalik parçaların yüzeyinin çinko ile kaplanmasına "Galvaniz" kaplaması adı verilmektedir(Şimşek & Çetin, 2022). Çinko bazlı kaplamanın birincil odak noktası korozyon önleme olmasına rağmen, bu kaplamaların çelik alt tabakalara özgü diğer özellikleri, kaplama işlemi ve son uygulamalar konusunda muazzam gelişmeler olmuştur. Galvanizli çeliklerin özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra sağlam, verimli, yüksek verimli ve uygun maliyetli bir süreç geliştirme konusunda sürekli çabalar olmuştur(Chakraborty, vd. 2022). Bir kimyasal banyoya daldırılarak, elektroliz veya püskürtülerek uygulanan çinko fosfat gibi fosfat katmanları, korozyon direncini ve diğer kaplamaların yapışmasını artırmaktadır. Korozyon direncini artırmak için bu fosfat kaplamalara sıklıkla sızdırmazlık uygulanmaktadır. Bu kaplamaların sağladığı korumayı iyileştirmek için, genellikle MoS_2 parçacıkları içeren bir polimer katmandan oluşan ikinci bir aşınma önleyici katman da uygulanabilmektedir. Polimerik reçine parçacıkların kohezyonunu garanti ederken, çelik substratın yapışması bir fosfat kaplamanın uygulanmasıyla desteklenir. MoS_2, grafite benzer özel morfolojisi sayesinde sürtünme ve aşınma en aza indirilebilmektedir. Bu nedenle bu katmanlı morfoloji, düşük gerilimler altında kaymaya yol açmaktadır(Rossi vd., 2003).

Erdoğdu (2014) yüksek lisans tez çalışmasında, asansörlerdeki Molibdendisülfür ilaveli plastik (poliamid 66) ray makaraları 18-24°C ortam sıcaklığında dört farklı (4, 3, 2 ve 1 MPa) yüzey basıncına sahip yüklerde, 25 m/s kayma hızında ve 1269.20 km kat etme mesafesinde testler gerçekleştirmiştir. Testlerde uygulanan yük değeri arttıkça makaralardaki aşınma kaybının miktarının arttığı tespit edilmiştir. Temas bölgesindeki sıcaklık, testlerin başlangıcında kat etme mesafesine bağlı olarak bir artış göstermiştir. Bu sıcaklık artışı büyük yüklerde daha fazla olurken, düşük yüklerde çok belirgin olmadığı belirtilmiştir. Testlerin bitiminde transfer filmi oluşmadığı belirtilmiştir. Diğer yüksek lisans tez çalışmasında Kenan (2015), aynı test düzeneği ile asansör kapı mekanizmalarında kullanılan MoS_2 katkılı poliamid 66 rulmanlı makaranın kataforez, toz boya, galvaniz ve krom kaplamalı disk malzemesi 1.256 m/s sabit hız ve 3 MPa sabit basınçta testler yapılmıştır. Çalışmada kat etme mesafesi olarak 1500 m seçilmiştir. En fazla aşınma oranlarının kataforez kaplamalı numunede olurken, makaralarda ise en az aşınma bu kaplamada gerçekleşmiştir. Bu çalışmada gerçek ray yerine çelik malzemeli diskler kullanılmıştır.

Bu çalışmada daha önce incelenmeyen, asansörlerde kullanılan kabin ve kat kapılarının açılması-kapanmasında kullanılan makara ve raylar arasında oluşan sürtünme ve aşınma özellikleri deneysel olarak incelenmiştir(Durak, 2023). Mevcut uygulamalarda çelik ray veya galvaniz kaplamalı raylar kullanılırken, çalışmada galvaniz kaplamalı ve alternatif bir aday olarak AFC kaplamalı raylar seçilerek söz konusu bu kaplamalarla gerçek sistemdeki makara-ray çiftinin tribolojik özelliklerinin incelenmesi hedeflenmiştir.

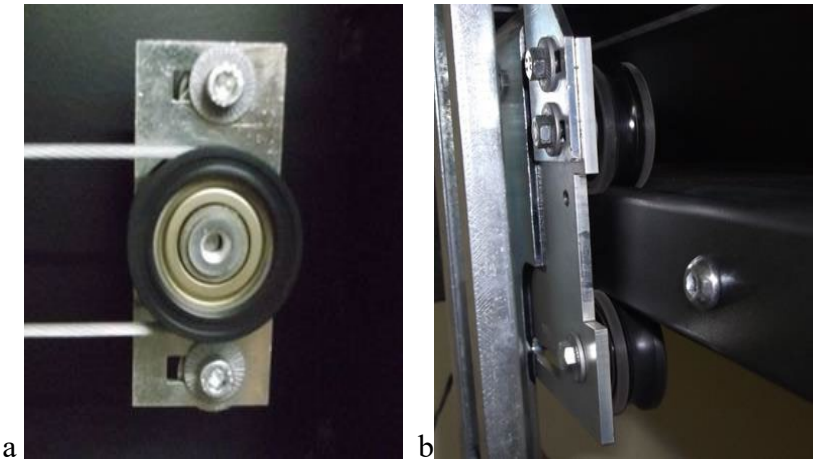
2. Materyal ve Metot

2.1. Deneysel çalışma

Test numunesi olarak deneysel çalışmada, piyasada çok yaygın kullanılan Galvaniz kaplanmış ray (St 37-2) ile yine aynı malzemeli (St 37-2) raya AFC (Kuru/Kaygan Film Yağlama Kaplama) teknolojisi ile kaplama uygulanmış numuneler kullanılmıştır. Numune raylara kaplama işlemi, ticari olarak bu sektörde faaliyet gösteren üretici firmalarda gerçekleştirilmiştir. Galvaniz kaplama elektroliz işlemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu metotta anot elektrotuna çinko, katot kutbuna ise ray malzemeleri bağlanmaktadır. Devredeki yüksek akım, düşük gerilim üreteci ve redresör sayesinde çinkolar parçalanarak ray malzemelerine yapışması sağlanır. Bu yöntemde saf çinko kullanılır. Ray numuneleri zımparalama ve temizleme (yıkama ve ultrasonik temizleme) yapıldıktan sonra nitrik asitte bekletildikten sonra kaplanıp kaplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kaplanan ray numuneleri saf suyla yıkandıktan sonra pasivasyon işlemi yapılmaktadır. Rayların AFC kaplamasında ise ray numunelerin yüzeyler temizlenip zımparalandıktan sonra MoS_2, Grafit ve PTFE ve birleştirici maddelerden oluşan ticari karışım yüzeye yaklaşık 20 μm tabaka kalınlığı oluncaya kadar püskürtülmektedir. Daha sonra 150-160 °C'ye kadar bir saat süre ile fırınlanmaktadır. Daha sonra ray numunelerine pasivasyon işlemi yapılmıştır. Kaplama işlemleri piyasada faaliyet gösteren kaplama firmalarına yaptırılırmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde asansör kabin kapısının açma – kapama mekanizması için bir model test seti tasarlanarak imal edilmiştir. Bu model test sisteminde ray numuneleri ile polimer esaslı makaralar arasında temas sonucu oluşan yüzeyleri gözlemlenmiştir. Makaralarda oluşan aşınma miktarları ise kütle kayıpları ölçülerek aşınma özellikleri incelenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde ise Gidip-Gelme Aşınma Test sistemi kullanılmıştır. Test süresinde ray ile makara arasındaki sürtünme katsayıları ve makaralardaki kütle kaybı ile de aşınma özellikleri incelenmiştir.

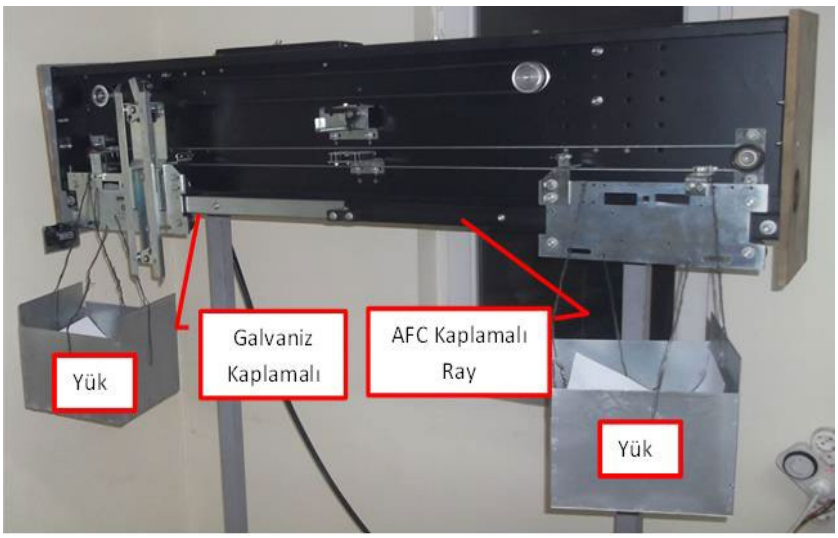
Asansör kabin kat kapı mekanizmasında üç ana tip makaradan söz etmek mümkündür. Halat (Kablo) Makarası, Üst Makara ve Alt Makara'dan oluşmaktadır (Şekil 3.). Piyasada genellikle polimer esaslı, orta bölümünde rulman bulunmaktadır. Gres ile yağlanmış bu rulmanın iki tarafı da kapalı olarak piyasada hazır olarak temin edilmiştir. Pratikte bazı firmalar plastik, polimer esaslı rulmanlı bu makaralar yerine derin çekme metal malzemeden üretilmiş rulmanlı makaralarda kullanılmaktadır. Alt ve üst makaralar kapı ağırlığının dengeli bir şekilde taşınmasında önemli rol oynamaktadır. Bu mekanizmanın ağırlığı taşımasının yanında mümkün olduğunca sessiz ve darbesiz çalışması istenmektedir. Kaplama özelliğinin kapının sessiz ve yumuşak çalışmasında önemi büyüktür. Kapının kayarak takip ettiği yolun dışına çıkmasını sınırlandırıcılarla engelleyecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 3. (a) Kablo makarası, (b) Üst ve alt makara örnekleri

2.2. Deney düzenekleri

Bu çalışmada daha öncede belirtildiği gibi iki farklı deney düzeneği kullanılmıştır. Birinci deney düzeneği bu çalışmada (Durak, 2023), gerçek asansör sistemindeki kabinlerde yer alan otomatik kapı mekanizmasındaki ray ve makaralarının sürtünme ve aşınma özelliklerinin deneysel olarak incelenmesini sağlayan açma ve kapama hareketi yapabilen model bir test düzeneği tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Bu deney düzeneği Şekil 4.'te görülmektedir.



Şekil 4. Açma-kapama hareketi yapabilen model kabin kapı deney düzeneği

Bu deney düzeneğinde kabin kapısı yerine kabin kapısıyla aynı ağırlıkta (çift merkezi kapıların ağırlığı olarak yaklaşık 220 N seçilmiştir.) yükler asılmıştır. Böylece gerçek çalışma şartlarına uygun koşullar sağlanması amaçlanmıştır. Kabin kapılarındaki gerçek çalışma hızı (0.225 m/s) ve kapının ortalama açma kapama süresi olarak (18.5 s) ve üretici firmalarla iletişime geçilerek ortalama açma kapama sayısı seçilmiş ve bu çalışma şartlarında deneyler yapılmıştır. Belirlenen açma kapama sayısına ulaşıldığında, testlere ara verilerek makara ve ray yüzeyleri incelenmiştir. Yüzeylerde aşınma izleri görülünceye kadar testlere devam edilmiştir. Bu deney düzeneğinde kabin kapısının birinde galvaniz kaplı ray, diğer kapısında AFC kaplamalı ray aynı anda kullanılmıştır(Şekil 4). Böylece eşit şartlarda iki farklı rayda oluşan aşınma miktarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Aşınma miktarları kütle kaybı ile

ölçülmüştür. Testlerden önce ve sonra numuneler, hegzan sıvısı ile yıkanıp sıcak hava ile kurutulup tartma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğindeki açma-kapama hareketleri mekanik ve dijital sayaç ile takip edilmiştir.

İkinci deney düzeneği olan Gidip-Gelme Test Sisteminin (GGTS) genel görünrüsü verilmiştir. GGTS'de tahrik motoru olarak elektrik motoru (1,5 kW, 1390 d/d, 220 V) seçilmiştir. Elektrik motoru miline feder kaması ile monte edilen dairesel flanştaki vida bağlantısı yardımıyla küresel mafsal bağlantılı bir kol mevcuttur. Bu kolun diğer uçunda bir adet plaka bulunmaktadır. Böylece plaka öteleme hareketi yaparak üzerindeki test numunesi ile temas gerçekleştirilmektedir. Dairesel flanşta farklı vida konumu değişen yarıçap ile eksantriklik miktarını değiştirmek mümkündür Böylece ayarlanabilir bir kurs boyu sağlanabilmektedir. Plaka ile test makarası arasında oluşacak sürtünme kuvveti, bağlı olan yük hücresine kuvvet aktarımı gerçekleştirilmektedir. Çalışma sırasında sürtünme kuvveti ile zorlanan yük hücresindeki elektronik-elektrik bağlantısı ile alınan sinyaller kablo vasıtasıyla indikatörde gerekli dönüşüm ve filtreleme yapılıp depolamak üzere masa üstü bilgisayara gönderilmektedir. GGTS'ye eklenen frekans ayarlayıcı ünite ile 50 d/d -1200 d/d arasında hızlar elde etmek mümkündür (Yurtseven, 2010).



Şekil 5. GGTS'nin genel görünüşe ait fotoğraf

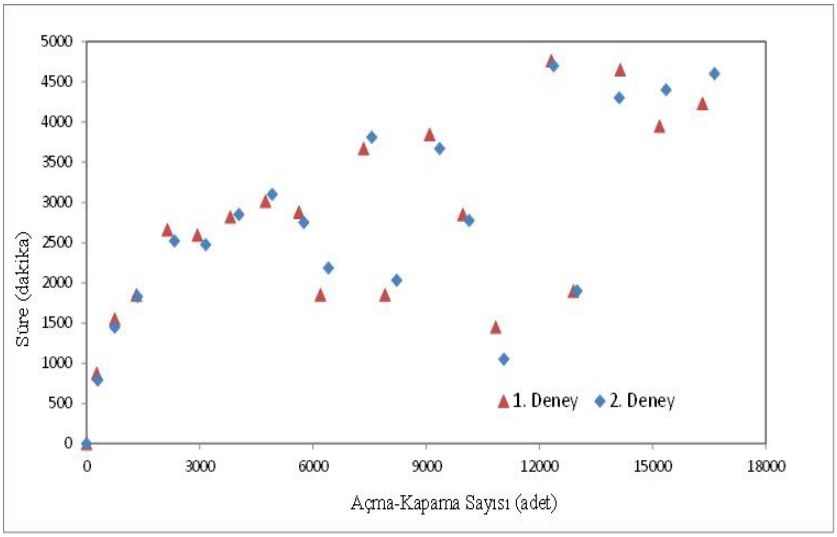
GGTS'deki makaranın bağlandığı pabuç sabit tutularak ray doğrusal hareket yapmaktadır. Makara içerisinde küresel yuvarlanmalı yatak mevcuttur. Gerçek çalışma şartlarında, montajdan veya çalışma şartlarından dolayı makaralar rulmanlı yatak olmasına rağmen zaman zaman beklendiği gibi yuvarlanma hareketi yaparken, zaman zaman da dönme hareketi yapmayıp sabit kalmakta ve böylece yuvarlanma hareketi yerine kayma hareketine maruz kalabilmektedir. Bu nedenle test sisteminde de bu durumları gerçekleştirebilmek için sabit ve yuvarlanma hareketi yapacak şekilde test numunesi makaraların montajı yapılarak iki tip testler gerçekleştirilmiştir. Test sonlarında hem makara hem de raylarda herhangi bir hasar meydana gelip gelmediği gözlemlenmiştir. GGTS'de (Şekil 5.) gerçek çalışma koşullarındaki şartlara uygun olarak yük 220 N makaraya etki etmekte; 0,225 m/s doğrusal hızla ray numunesi üzerinde makaralar hareket etmektedir. Frekans 5 hz, rayların bağlandığı eksantrik diskin dönme hızı ise 150 d/d olarak seçilmiştir. Test süresi olarak 3600 s (bir saat) seçilmiştir. Kat etme mesafesi ise yaklaşık 1300 m olarak gerçekleşmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

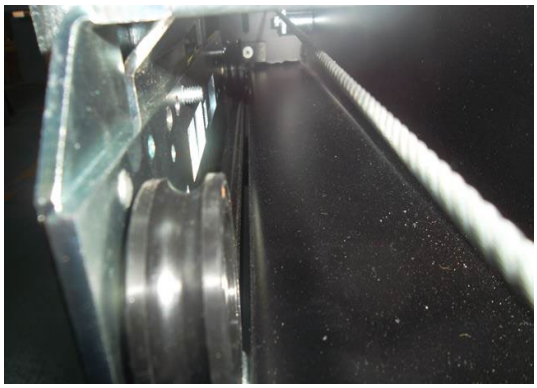
Asansör sistemi, binada yaşayan, çalışan veya ziyaret eden yolcuları gidecekleri yere rahat ve verimli bir şekilde taşımaktan sorumlu dikey bir taşıma sistemidir. Uygun boyutta ve iyi durumda bir asansör sistemi, binanın kullanılabilirliğini artırır, böylece yolcuların konforlu bir transferi sağlamakla kalmaz, aynı zamanda bina sahiplerine de memnun bir müşteri ve/veya kiracı profili sağlayarak ekonomik katkılar da sağlayabilmektedir (Tyni & Ylinen, 2006). Yolculuk konforuna, tahrik motoru, halatlar, kılavuz raylar, patenler, kabin ve kabin elemanları etki etmektedir. Kabin kapıları da bu elemanlardan bir tanesidir. Zhang & Zubair (2022) 5400 adet asansör üzerine yapmış oldukları bakım stratejilerini belirlemeye yönelik çalışmalarında Pareto analizi ile otomasyon, kabin kapısı mekanizması, kat kapısı mekanizması ve kabin kafesindeki diğer elemanlardaki arızaların asansörlerin güvenilirliğini etkileyen kritik nedenler olduğunu ortaya koymuştur.

Kabin kapı model test sisteminde yapılan testlerde, ray ve makarada herhangi bir aşınma izi, hasar oluşup olmadığını deneylere ara verilerek numune yüzeyleri gözle incelenmiştir. Şekil 6.'da verilen grafikteki veriler, yapılan gözlem süreleri ve bu süredeki kapının açma-kapama sayılarını göstermektedir. Yapılan test sonuçlarında hem galvanizli hem de AFC kaplı raylarda 1. Deney ve 2. Deney'de herhangi bir gözle görünür aşınma izi ve hasarı (bazı AFC kaplamalı raylarda kaplamalı raylardaki çalışma bölgesinde koyu siyah renkte bir beyazlanma, yüzeyde parlamalar görülmüş, bu da bu numunelerde tabaka kalınlığında bir düşüşün başlandığının göstergesi olduğu anlamına gelmektedir.) görülmemiştir. Ancak makaralarda ise aşınmalar ve partikül kopmaları

gözlenmiştir. Galvaniz kaplı ray ile çalışan makarada 1. Deney'de 1320 dakikalık çalışma süresi (3. gözlem sonunda) sonunda toplam 4275 açma-kapama işleminden sonra bu aşınma hasar başlangıcı olurken, AFC kaplı ray ile çalışan makarada 6230 dakikalık süre (9. gözlem sonunda) sonunda toplam 20 095 açma-kapama işleminden sonra aşınma gözlenmeye başlanmıştır. 2. Deney'de ise Galvaniz kaplamalı ray ile çalışan makarada 750 dakikalık süre (2. gözlem sonunda) sonunda toplam 2240 açma-kapama işleminden sonra aşınma olurken, AFC kaplı ray ile çalışan makarada 5760 dakikalık süre (8. gözlem sonunda) sonunda toplam 17 765 açma-kapama işleminden sonra söz konusu aşınma hasarları gözlenmeye başlanmıştır. Deney sırasındaki örnek bir makara fotoğrafı Şekil 7.'de verilmiştir. Makaradan kopan aşınma partikülleri raylara yapıştığı gözlenmiştir.



Şekil 6. Model Otomatik kabin kapı test düzeneği ile yapılan test sonuçları



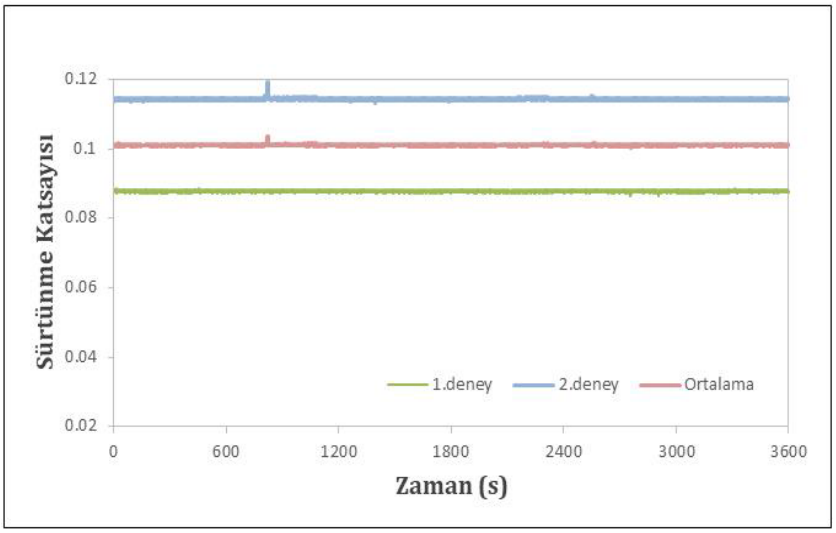
Şekil 7. Model Otomatik kabin kapı test düzeneğinde deney sırasında örnek makara fotoğrafı

GGTS'de elde edilen sürtünme katsayıları sonuçları Şekil 8.-12.'de verilmiştir. AFC kaplamalı ray-makara çiftlerinde sürtünme katsayıları Galvaniz kaplamalı ray-makara çiftine göre daha düşük sürtünme katsayısı sahip olduğu rahatlıkla grafiklerde (Şekil 8-12) görülmektedir.

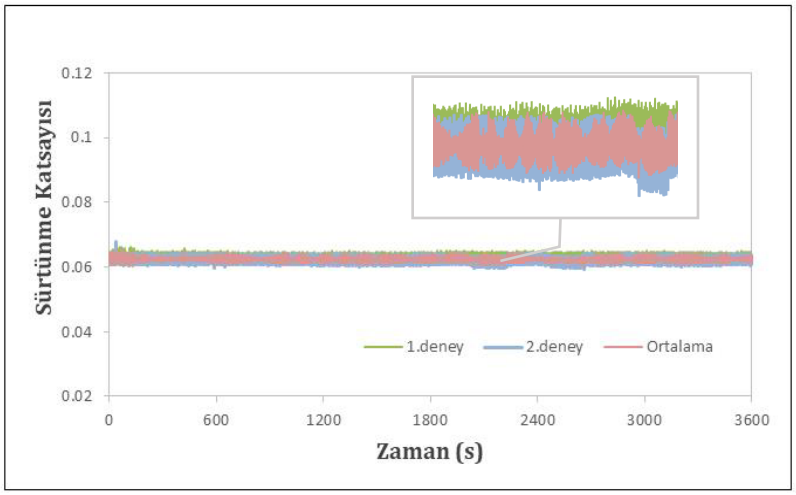
Makaranın yuvarlanma hareketi yaptığı deneylerde her iki rayda daha az değişken bir davranış gösterirken makaranın sabit olduğu testlerde daha dalgalı bir sürtünme katsayısı değişimi deney süresi boyunca sergilemiştir. Bunun sebebinin temas bölgesinde sürtünme sonucu muhtemel sıcaklık artışı ile kauçuk makara malzemesinin yumuşayarak raya tutunma-bırakma hareketi sergilenmesine sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca yuvarlanma hareketi yaptığı deneylerde her iki rayda daha büyük ortalama sürtünme katsayısı (Galvaniz kaplamalı ray- hareketli makara μ_{ort} =0.1012, AFC kaplamalı ray- hareketli makara μ_{ort} =0.063, Galvaniz kaplamalı ray-sabit makara μ_{ort} =0.0992, AFC kaplamalı ray-sabit makara μ_{ort} =0.0587, Şekil 8-12) meydana gelmiştir.

Tablo 1.'de 220 N yükte, 150 d/d devirde, 5 hz frekans ve 0,225 m/s hızda Galvaniz kaplı ray ve AFC kaplamalı rayda meydana gelen aşınma miktarları verilmiştir. Otomatik kapı sistemindeki deneylerde Galvaniz kaplı rayda kullanılan makaralarda daha fazla aşınma olduğu görülmektedir(Tablo 1.). Ayrıca sürtünme katsayısı sonuçlarına benzer olarak sabit makaralı deneylerde her iki rayda da aşınma değerlerinin fazla olduğu da görülmektedir. Gidip-Gelme Test Sisteminde, hem galvanizli hem de AFC kaplamalı raylara deney sırasındaki örnek görüntüler ve bu raylarda kullanılan makaralara ait deney sonunda örnek makara görünümleri Şekil 13. ve

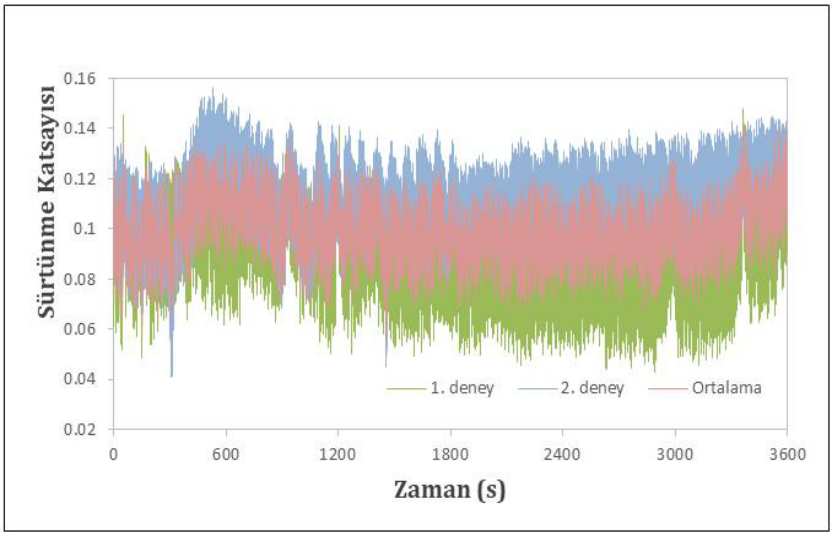
Şekil 14.'te verilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi deney sonunda bazı AFC kaplı raylarda kaplama yüzeyinde aşınmalar olduğu gözlenmiştir(Şekil 15.). Bu numunelerde zamanla kaplama kalınlığında incelme olduğu, bunun sonunda renkte beyazlaşma ve parlak bir görünüme sebep olduğu düşünülmektedir.



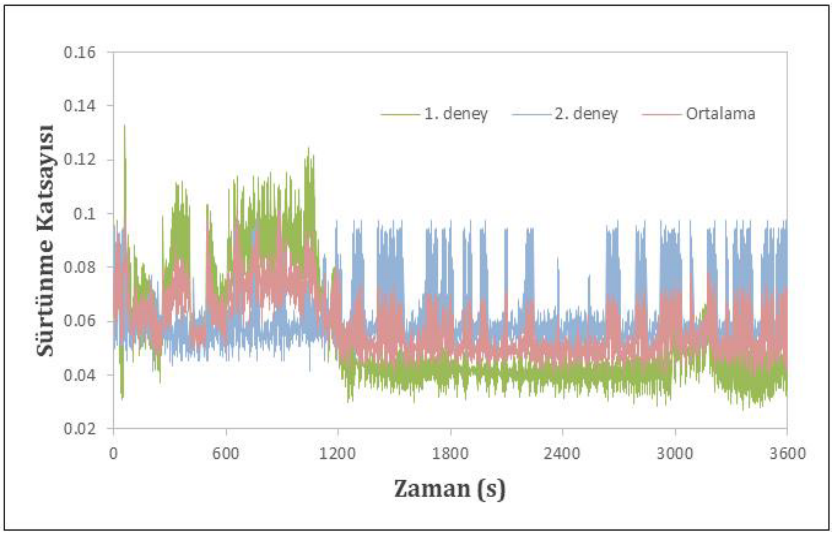
Şekil 8. Makara yuvarlanma hareketli Galvanizli ray çiftindeki sürtünme katsayısı değişimleri



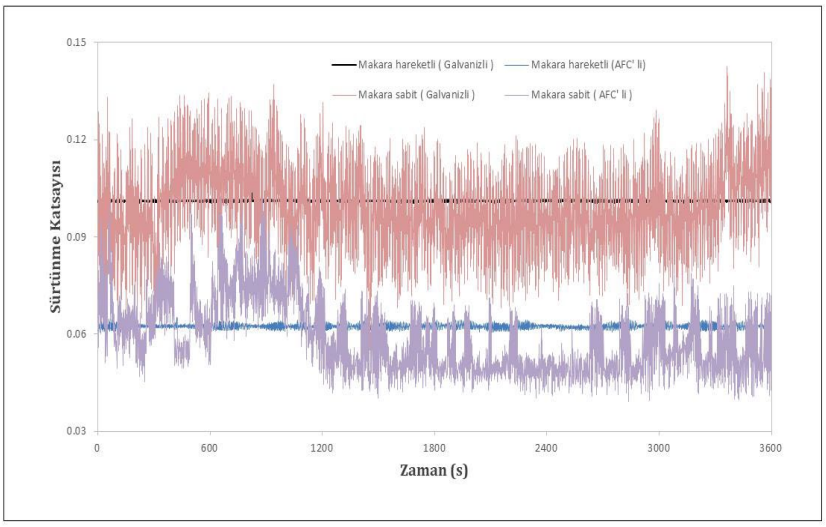
Şekil 9. Makara yuvarlanma hareketli AFC ray çiftindeki sürtünme katsayısı değişimleri



Şekil 10. Makara sabit Galvanizli ray çiftindeki sürtünme katsayısı değişimleri



Şekil 11. Makara sabit AFC ray çiftindeki sürtünme katsayısı değişimleri



Şekil 12. Tüm deneylerdeki ortalama sürtünme katsayılarının değişimleri

Tablo 1. Makaralarda oluşan ortalama aşınma miktarları

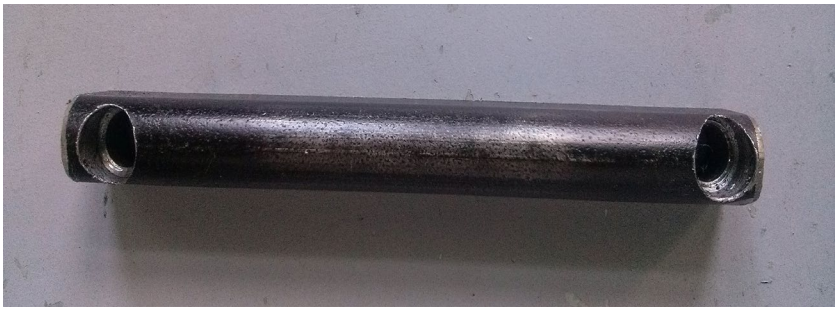
Otomatik kapı model test sistemi	**(g)**
Galvaniz kaplamalı ray	1.980
AFC kaplamalı ray	0.040
Gidip –Gelme Test Sistemi	
Makara sabit-Galvaniz kaplamalı ray	10.8428
Makara sabit- AFC kaplamalı ray	6.5420
Makara hareketli- Galvaniz kaplamalı ray	0.0030
Makara hareketli-AFC kaplamalı ray	0.0007

a  b 

Şekil 13. (a) Galvaniz kaplamalı ray hareketli sabit makara örnek test, (b) testlerde örnek kullanılmış makara

a  b 

Şekil 14. (a) AFC kaplamalı ray hareketli sabit makara örnek test, (b) testlerde örnek kullanılmış makara



Şekil 13. AFC kaplamalı ray temas bölgesindeki aşınma örneği

Yapıştırılmış katı yağlayıcı kaplamanın yağlama özellikleri, dolgu maddesi seçimi ile doğrudan ilişkilidir. Politetrafloroetilen (PTFE), Molibdendisülfid (MoS_2) ve grafit en sık kullanılan üç katı yağlama dolgu maddesidir. Bununla birlikte, grafit ve PTFE yumuşak doku ve düşük mekanik özellikler sergiler. Buna karşılık, aşırı basınç yağlayıcı olarak, katmanlı kristal yapıya sahip MoS_2, üstün yük direnci ve kolay kayma karekteri gösterir, çünkü katman içindeki kovalent bağ güçlüdür ve katmanlar arasındaki Van der Waals kuvveti zayıftır. Bu nedenle, yağlama özelliği, onlarca yıldır tribolojik alanda her zaman ilgi çeken bir konu olmuştur. Buna bağlı olarak MoS_2 katı yağlayıcı kaplama araştırmaları da çok sayıda rapor edilmiştir. Yapışmış MoS_2 katı yağlayıcı kaplamanın burulma, dönme ve bileşik aşınma davranışlarının incelemelerinde; kaplama, yalnızca sürtünme katsayısını etkili bir şekilde azaltmakla ve aşınma direncini iyileştirmekle kalmadığı, aynı zamanda orta karbonlu çelik ve 1050 çeliğin fretting aşındırma moduna doğru değiştiği belirtilmiştir(Yin vd., 2023, Luo, vd., 2011, Luo, vd., 2015, Shen, vd., 2016). Hiraoka, vd., (2001) MoS_2'nin aşınma ömrü olduğunu ve vakumdaki film yağlayıcılar havadakinden onlarca kat daha uzunlukta olduğu, ancak vakumdaki sürtünme katsayısı havadakinin sadece dörtte biri kadar olduğu belirtilmiştir. Bu, filmin yüksek vakumlu ortamlar için de uygun olduğunu ve pratik uygulamalarda daha fazla olasılık gösterebileceğini kanıtlıyor. Xu vd., (2020) yapıştırılmış MoS_2 katı yağlayıcı kaplamanın teğet aşınma ömrünün, alt tabakanın sertliğini ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirerek veya kaplamanın kalınlığını artırarak, kürleme yöntemini değiştirerek ve bağıl nemi azaltarak uzatılabileceğini öne sürmektedirler. Kısacası mevcut çalışmalar MoS_2'nin mükemmel tribolojik özelliklerini doğrulamıştır. Katı yağlayıcı kaplama, çalışma koşullarının, ortamın, aşındırma modunun veya diğer dış faktörlerin ve bağlayıcı türlerinin kaplama performansı üzerindeki etkisine odaklanmışlardır(Yin vd., 2023).

4. Sonuçlar

Bu çalışmada asansörlerde kullanılan otomatik kabin kapı ve kat kapıları mekanizmasındaki makara ile ray arasındaki sürtünme, aşınma gibi tribolojik özellikler incelenmiştir.

- AFC kaplamalı raylar kullanılması ile makaralarda oluşacak sürtünme ve aşınmayı azaltmanın mümkün olduğu görülmüştür.

- Makaraların hatalı montajından yuvarlanma hareketi yapmasının engellenmesi durumunda daha fazla sürtünme katsayısı ve daha fazla aşınma görülebileceği, bunun sonuncunda hem enerji tüketimi hem de makaranın beklenenden daha kısa ömürlü olmasına neden olacağı anlaşılmaktadır.

- Bu çalışma ile asansör imalatçı kuruluşlar için yararlı bilgilerin yanında yeni ray ve makara malzemelerin geliştirme potansiyeline bir katkı verebileceği, montaj ve bakım onarım tekniklerinin de gerektiği gibi yapılması için dikkatleri çekeceği beklenilmektedir.

- Son olarak, asansör sistemlerindeki elemanlarından biri olan asansör kabin kapı makara-ray sistemlerinin daha güvenilir şekilde çalışabilmesini sağlamak amacıyla bir standart, bir uygunluk kriteri oluşturulmasına katkı koyabileceği düşünülmektedir. Daha önce sınırlı sayıda yapılan çalışmalarla(Yurtseven, 2010., Erdoğdu, 2014., Kenan, 2015.) birlikte, asansör sistemlerini oluşturan elemanların standartlaştırılmasına yönelik yeni yapılacak çalışmalara önemli katkı vereceği de ayrıca beklenmektedir.

Teşekkür

Sunulan makale, Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nce Proje ID: 3029, Proje Kodu 3134-YL-12 nolu proje ile desteklenmiştir. Kuruma desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

Referanslar

Ake Asansör, Yürüyen Merdiven, Engelli Sistemler, https://ake.com.tr/uploads/documents/Asansor_Sistemleri.pdf, Erişim Tarihi 03.09.2023

Al-Sharif, L. (2021). Indoor Transportation, Editor(s): Roger Vickerman, International Encyclopedia of Transportation, Elsevier, 684-696, ISBN 9780081026724, https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102671-7.10762-6

BSTB, (2016), Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, "Asansör işletme, bakım ve periyodik kontrol yönetmeliği", 29396 Sayılı Resmi Gazete, 24 Haziran 2016

Chakraborty, A., Ghosh, R., Sudan, M., Mondal, A.,(2022). Improvement in hot dip galvanized coating microstructure and properties by pre-metallic deposition on steel surface: A comprehensive review, Surface and Coatings Technology, 449, 128972,ISSN 0257-8972, https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128972

Chen, W., Wang, Z., Xu, G., Song, W., Xie,Y., Zhao, L., Xia, M., Li, W., (2021). Friction and anti-corrosion characteristics of arc sprayed Al+Zn coatings on steel structures prepared in atmospheric environment, Journal of Materials Research and Technology, 15, 6562-6573, ISSN 2238-7854, https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.084

Durak, E. (2023) Asansörlerde kullanılan otomatik kapı mekanizması raylarının tribolojik özelliklerinin deneysel incelenmesi, Proje ID: 3029, Proje No:3134-YL-12, Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Başkanlığı Proje Raporu.

Erdoğdu, Y.E. (2014). PA 66 Kompound Malzemeden İmal Edilmiş Asansör Kapı Makaralarının Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Tez No: 363870, İstanbul Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

EST Endüstri Teknik Yüzey İşlemleri, http://estyuzeykaplama.com/ , https://estyuzeykaplama.com/hizmetler/kuru-film-yaglama-kaplamasi-technocoat/ Erişim Tarihi 05.09.2023.

Görmüş, M. & Okçu., Y.B., (2021), Asansör kat kapıları kilitleme tertibatları, kat kapıları sarkaç çarpma testleri ve TS EN 81:20, TS EN 81:50 standartları gereklilikleri, 10. Asansör Sempozyumu, 121-144, 18-20 Kasım 2021, İzmir

Hiraoka, N. (2001). Wear life mechanism of journal bearings with bonded MoS_2 film lubricants in air and vacuum, Wear 249, https://doi.org/10.1016/ S0043-1648(01)00845-6.

İBK Asansör, https://www.ibkasansor.com/tam-otomatik-kabin-kapisi#product , Erişim Tarihi 03.09.2023

İmrak, C. E. & Gerdemeli, İ. (2000). Asansörler ve Yürüyen Merdivenler. Birsen Yayınevi, İstanbul

J. Xu, M.H. Zhu, Z.R. Zhou, P. Kapsa, L. (2003). Vincent, An investigation on fretting wear life of bonded MoS2 solid lubricant coatings in complex conditions, Wear 255, 253–258, https://doi.org/10.1016/s0043-1648(03)00053-x

Karahan, I. (2016). Asansör bakım işlerinde risklerin değerlendirilmesi ve çözüm önerileri. İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye

Kenan H., (2015). MoS_2 Katkili PA 66 rulmanlı makaranın kaplama yapılmış AISI1050 imalat çeliği karşısında aşınma davranışının incelenmesi, YL Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Luo, J., Cai, Z.B., Mo, J.L., Peng, J.F., Zhu, M.H., (2015). Torsional fretting wear behavior of bonded MoS_2 solid lubricant coatings, Tribol. Trans. 58 (2015) 1124–1130, https://doi.org/10.1080/10402004.2015.1045649.

Luo, J., Zhu, M.H., Wang, Y.D., Zheng, J.F., Mo, J.L., (2011). Study on rotational fretting wear of bonded MoS2 solid lubricant coating prepared on medium carbon steel, Tribol. Int. 44 1565–1570, https://doi.org/10.1016/j. triboint.2010.10.011.

Rossi, S., Chini,F., Straffelini, G., Bonora, P.L., Moschini,R., Stampali, (2003). A., Corrosion protection properties of electroless nickel/ptfe, phosphate/mos2 and bronze/ptfe coatings applied to ımprove the wear resistance of carbon steel, Surface and Coatings Technology, 173(2–3), 235-242, ISSN 0257-8972, https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00662-5

Shen, M.X., Cai, Z.B., Peng, J.F., Peng, X.D., Zhu, M.H., (2016). Antiwear properties of bonded MoS_2 solid lubricant coating under dual-rotary fretting conditions, Tribol. Trans. 60 (2016) 217–225, https://doi.org/10.1080/10402004.2016.1158338.

Slatter, T., Zalzalah, M., Lewis, R., 2023. Analysis of reciprocating hammer type impact wear apparatus, Wear, 523, 204816,ISSN 0043-1648, https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204816.

Şimşek, S., & Çetin, B., (2022). Galvaniz kaplamada banyo sıcaklığı ve akım yoğunluğunun kaplamanın mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (38), 544-552

TSE, (2009), Türk Standartları Enstitüsü, "TS EN 13015+A1 Standardı, Asansör ve Yürüyen Merdivenlerin Bakımı - Bakım Talimatları İçin Kurallar", 2009

Tyni, T. & Ylinen, J., (2006). Evolutionary bi-objective optimisation in the elevator car routing problem, European Journal of Operational Research, 169, 3, 960-977, https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.08.027

Ünverdi, N.Ö. & Ünverdi, N.A. (2010), Asansör sistemlerindeki iletişim mekanizması, Mühendis ve Makina , 51 (611), 23-29.

Yin, J., Yan, H., Cai, M., Song,S., Fan, X., & Zhu, M., (2023). Bonded flake MoS2 solid lubricant coating: An effective protection against fretting wear, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 117, 450-460, ISSN 1226-086X, https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.10.033

Yurtseven, A.H. (2010), Asansörlerde Kullanılan Fren Balatalarının Tribolojik Özelliklerinin Deneysel incelenmesi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta

Zhang, X., & Zubair, M.U., (2022). Extending the useful life of elevators through appropriate maintenance strategies, Journal of Building Engineering, 51, 104347, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104347.

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

UMAGD, (2023) 15(3), s302-s308.

10.29137/umagd.1402020

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:3 Aralık/December 2023 Özel Sayı / Special Issue

Araştırma Makalesi / Research Article

A Feasibility Analysis of the Use of ISAR Training Data in Machine Learning-Based SAR ATR

Umut Özkaya*[1] Enes Yiğit[2] Şevket Demirci[3]

[1] Department of Electrical Electronics Engineering, Konya Technical University, Turkey
[2] Department of Electrical Electronics Engineering, Bursa Uludag University, Turkey
[3] Department of Electrical Electronics Engineering, Mersin University, Turkey

***Başvuru/Received**: 08/12/2023* ***Kabul / Accepted**: 27/12/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Abstract

Processing of synthetic aperture radar (SAR) images for automatic target recognition (ATR) is a critical application especially in military surveillance. In particular, numerous machine learning-based SAR ATR methods have been proposed for this task. However, data training and testing stages of all these methods are based on the exploitation of SAR signatures of the target under investigation. Considering the high variability of radar targets, obtaining such signature data is obviously a costly and time consuming process. In this study, therefore, a feasibility analysis of the use of inverse-SAR (ISAR) training data in SAR ATR has been made for the first time. The turntable ISAR and circular SAR images of three different vehicles are used in training and testing is performed by means of SAR images of three similar targets within the publicly available MSTAR dataset. Also, three most prominent machine learning methods, namely KNN, SVM and ANN are used in conjunction with three different feature extraction algorithms namely, GLRLM, GLSZM and GLCM. The obtained results reveal that the GLCM+ANN algorithm pair is the most effective model with 85% accuracy.

Key Words

"Automatic Target Recognition, Synthetic Aperture Radar, Inverse Synthetic Aperture Radar, Artificial Intelligence"

***Sorumlu Yazar:** uozkaya@ktun.edu.tr*

1. Introduction

Synthetic aperture radar (SAR) and inverse-SAR (ISAR) are highly effective microwave remote sensing techniques that can produce high resolution images of ground and air targets (Vertiy et al., 2011). In SAR, the radar platform at some height moves along a straight path while taking the images of the fixed or moving targets on the ground from a certain point of view. Contrarily, in ISAR, the radar platform is fixed and the images of airborne targets are generated via the motion of targets in a certain angle of view (Yiğit, 2020). In addition to imaging of airborne targets, the ISAR technique has also been used in imaging of ground targets mounted on a turntable with 360-degree rotation capability (Blacknell and Vignaud, 2013). In this mode, termed as turntable or ground-based ISAR, reflectivity and scattering mechanism information about targets can be more feasibly achieved in a controlled environment.

An important application of SAR imaging is the detection and identification of military vehicles on the ground. The images generated by SAR systems have been extensively used for the purpose of automatic target recognition (ATR). Specifically, numerous machine learning-based SAR ATR methods have been proposed for this task (Özkaya, 2020; Liu and Li, 2013). This application, however, involves challenges and requires reference image signatures for a typical range of target types and data collection parameters. Many studies have been carried out to recognize the targets from the images obtained by processing the signals obtained from the scanned region in the SAR technique (Blacknell and Vignaud, 2013; Özkaya, 2020; Dong et al., 2017; Miao and Liu, 2021). In almost all of these studies, the test and training set needs to exploit SAR reference data acquired with the identical measurement technique. Noting that obtaining SAR images of all possible targets from all possible perspectives is both a costly and time-consuming process, such studies usually face with limited data problem and thereby resulting in a poor performance. Alternatively, with ground-based ISAR imaging, target scattering parameters and images can be gathered in a very practical, fast and inexpensive way. Thus, training sets trained with these data can be used for target detection in real SAR images. To our knowledge, no machine learning-based studies have been conducted to detect targets in SAR images by means of ISAR signatures (Cui et al., 2023; Song et al., 2023; Demirci & Izumi, 2023).

In this study, therefore, ATR were tried to be carried out from real SAR images by using ground-based ISAR images (Özkaya, 2020; Copsey, 2004; Demirci et al., 2015; Blacknell and Vignaud, 2013) and a database trained with popular artificial intelligence algorithms such as Artificial Neural Networks (ANN) (Duysak et al., 2020), k-nearest neighbor (KNN) (Duysak and Yiğit, 2019) and Support Vector Machine (SVM) (Özkaya, 2020). The features of 2D SAR and ISAR images were extracted with Co-occurrence Matrix (GLCM), Gray Level Run Length Matrix (GLRLM) and Gray Level Size Zone Matrix (GLSZM) methods, and the performances of artificial intelligence algorithms and feature extraction techniques were tested. While SAR images of 3 different targets in the MSTAR (Novak et al., 1998; Liu and Li, 2013; Miao and Liu, 2021; Martone et al., 2009; Novak et al., 1993; Dong et al., 2015) dataset were used as test data, 3 different ISAR images were used as training data. The work is organized as follows. In the second section, while the test and training data are presented in detail, the feature extraction and artificial intelligence algorithms are briefly introduced. In the third section, the obtained results are presented comparatively and the article is summarized in the conclusion section.

2. Materials and Method

2.1. Definition of the Dataset

As test data, we make use of the MSTAR dataset provided by the Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) and the American Air Force Research Laboratory (AFRL) (MSTAR Public Targets, 2021) The collection contains X-band SAR imagery of numerous vehicles collected at depression angles in the range [15°,45°] with 1° azimuth bandwidths over the full aperture. From this large dataset, 3 ground vehicles, labeled as T72, D7 and T62 were selected as representative target samples. Noting that the SAR signatures exhibit strong fluctuations as the target aspect varies, 280 images of each target, with a total number of 840 images, acquired at different observation angles were utilized. The left column of Figure 1 shows these targets and their sample SAR images.

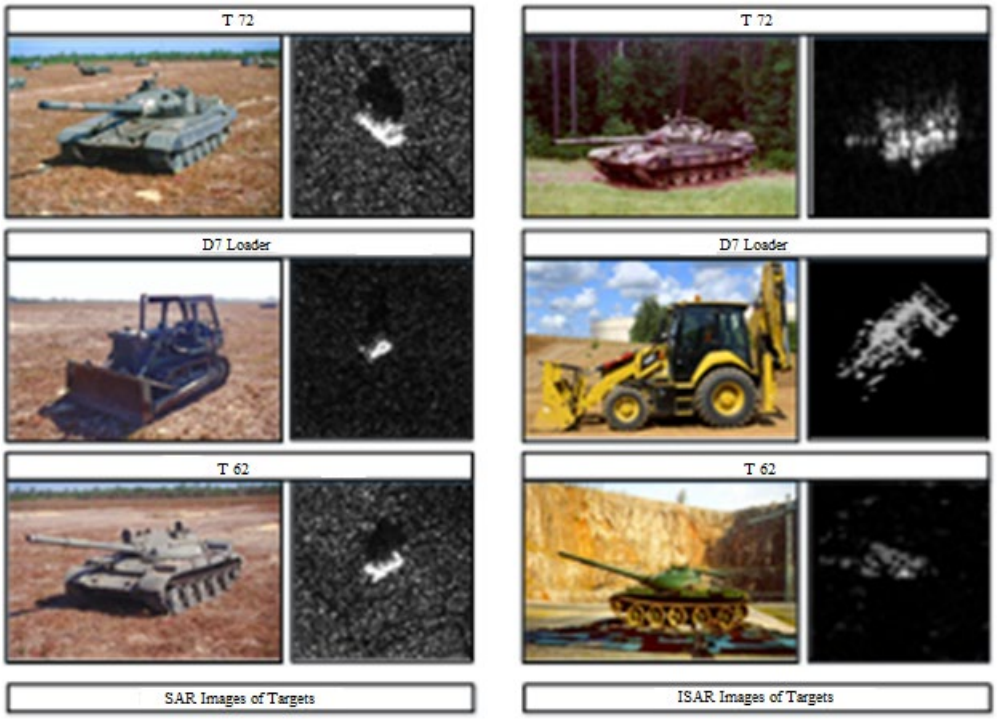


Figure 1. Targets and their sample radar images used in the proposed machine-learning based SAR ATR. SAR images as the test data (left), turntable ISAR/circular SAR images as the training data (right)

As for training data, the turntable ISAR and circular SAR image data of 3 targets were employed. The targets were selected to be similar to those used in testing, as can be seen in the right column of Figure 2. The dataset for the first target is the X-band turntable ISAR response of a T72 tank acquired for the depression angles in the range [27.9°,31.9°] and 3.9° angular spans of the full azimuth coverage. The raw dataset was collected by Georgia Tech Research Institute (GTRI) and can be accessed via Air Force Research Laboratory (AFRL) website (GTRI dataset, 1997). We selected representative samples of angular data and applied image preprocessing (i.e., windowing, zero-padding and clutter removal) and reconstruction techniques to obtain ISAR image samples to be used in training. The second dataset is the airborne circular SAR images of a backhoe loader and referred to as the "GOTCHA Volumetric SAR Data Set, Version 1.0" (Gotcha Volumetric SAR Data Set Overvie, 2021). It contains X-band spotlight SAR images collected with full rotation and at 8 different incidence angles ranging from 43.7° to 45°. Lastly, the third dataset is the turntable ISAR images of a main battle tank corresponding to a depression angle of 10° as presented in (Copsey, 2004) For the 2nd and 3rd targets, we reproduced the published ISAR images of the targets through image rotation, On the whole, a total of 255 training images with 85 images for each target were deployed in our analysis.

2.2. Proposed Framework

The SAR ATR framework proposed in this study is illustrated in Figure 2. As mentioned, the framework is based on the use of ISAR imagery as training data.

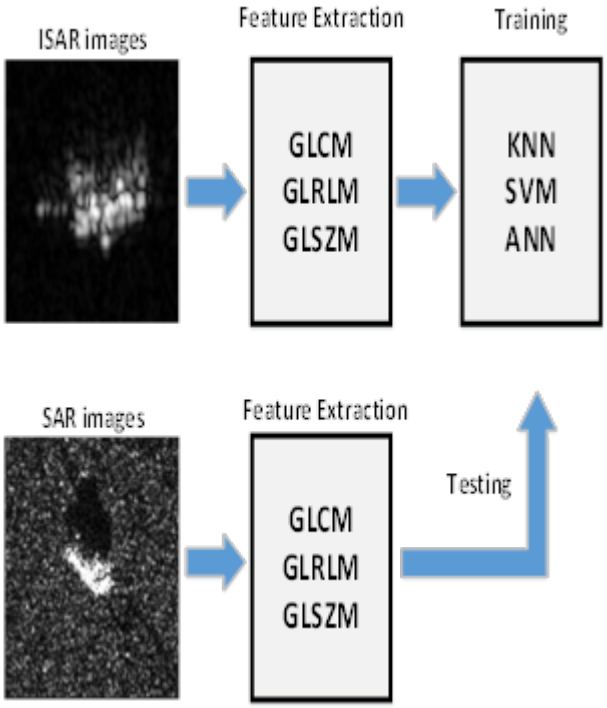


Figure 2. Proposed Framework

In addition, the framework is distinct in that three popular feature extraction algorithms, called GLCM, GLRLM and GLSZM are tried in conjunction with 3 popular artificial intelligence algorithms, namely KNN, SVM and ANN. These algorithms are applied to SAR test data and ISAR training data in pair-wise combination. The ATR performance results can then be compared with each other to determine the best algorithm pair. The employed artificial intelligence algorithms are briefly explained in the following.The KNN algorithm is one of the most basic and simple learning algorithms (Yigit, 2018). The working system uses the multidimensional feature space created from the given KNN, which is quite simple. It defines the test object according to the nearest neighbor value in the measurement space. The distance between objects is usually determined by the Euclidean length, and the output of the algorithm is evaluated according to the results of different degrees of neighborhood.

The SVM algorithm is a very effective classifier for linear and nonlinear problems (Duysak et al., 2020). Unlike KNN, using kernel functions, a suitable decision surface and a separation hyperplane with the maximum distance to the nearest points of the training set are determined. Classification or regression is provided according to this kernel function.

ANN[21], on the other hand, is a system that consists of many processing units that are heavily interconnected, receive signals from other neurons, combine them, transform them, and produce a numerical result. In the most general terms, the processing units correspond to real neurons and thus this structure constitutes the ANN. All parameters of 3 different AI techniques used in this study are given in Table 1.

Table 1. The Parameters of the AI Techniques

Model	Parameters	Set type/Value
KNN	Distance Function	Euclidean
	K neighborhood number	1
SVM	Kernel Function	Radial Basis
	Kernel Function coefficient	1
	Slack variable coefficient (C)	100000
ANN	Epochs	300
	Learning rate	0.4
	Momentum parameter	0.2
	Learning algorithm	Levenberg-Marquardt
	Hidden layer	2

Six different classification criteria were used to evaluate the performance of the proposed models. These metrics are Specificity (SPE), Precision (SEN), Accuracy (ACC), F1-Score, Matthews Correlation Coefficient (MCC). Equations for all these metrics are given below.

$$Accuracy = (TP + TN) / (TP + FN + TN + FP) \quad (1)$$

$$Sensitivity = TP / (TP + FN) \quad (2)$$

$$Specificity = TN / (TN + FP) \quad (3)$$

$$Precision = TP / (TP + FP) \quad (4)$$

$$F1 - Score = (2 \times TP) / (2 \times TP + FN + FP) \quad (5)$$

$$MCC = \frac{\mathrm{TP} \times \mathrm{TN} - \mathrm{FP} \times \mathrm{FN}}{\sqrt{(TP + FP)(TP + FN)(TN + FP)(TN + FN)}} \quad (6)$$

Where TP is True Positive, TN is True Negative, FP is False Positive and FN is False Negative. Metric performances of the proposed methods are given in Table 2.

Table 2. Performance of Proposed Frameworks.

Methods	Evaluation Metrics (%)					
	SEN	SPE	ACC	PRE	F1-Score	MCC
GLCM+KNN	58.04	79.02	58.85	81.90	56.96	49.23
GLCM+SVM	61.57	80.78	62.31	82.62	61.25	53.36
GLCM+ANN	79.12	89.33	84.05	76.07	75.49	65.53
GLRLM+KNN	45.88	72.94	46.92	79.82	39.71	33.32
GLRLM+SVM	49.80	74.90	50.77	80.43	45.66	38.84
GLRLM+ANN	51.76	75.88	52.69	80.75	48.41	41.38
GLSZM+KNN	52.94	76.47	53.85	80.95	50.09	42.92
GLSZM+SVM	54.51	77.25	55.38	81.21	52.21	44.88
GLSZM+ANN	56.08	78.04	56.92	82.25	54.27	46.80

3. Results

The criteria obtained as a result of three different proposed feature extraction algorithms and three different popular AI techniques are given in Table 2. As seen in the table, the best values were obtained in the GLCM+ANN technique. When the feature extraction techniques are examined among themselves, it is clearly seen that GLCM is superior to the others. The confusion matrix of the proposed method is given in Figure 3.

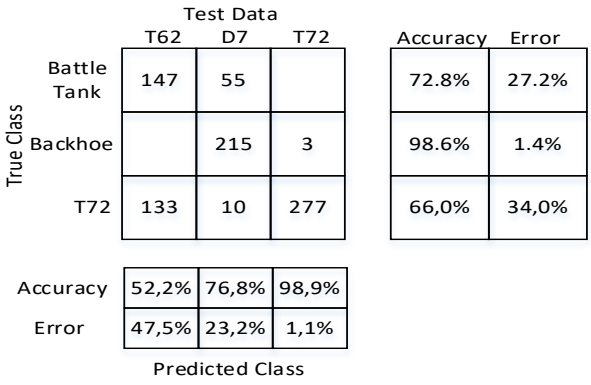


Figure 3. Confusion Matrix

4. Discussion

When the confusion matrix is evaluated, it is seen that the T72 tank was detected with an accuracy of 98.9%. The most important reason for this is the use of images belonging to the same target in both training and testing. In addition, the training data of the T72 tank are ISAR images obtained from different angles. However, ISAR images of other targets were obtained from the literature and the number of images was increased by the rotation method. Therefore, the classification accuracy of other targets was low. On the other hand, the D7 target (which is loader) in the MSTAR data was classified as Backhoe with 76% accuracy, and this result provided information about what the target was. In MSTAR, the T62 tank was detected in the confisin matrix with an accuracy of approximately 52%, as it

was similar to the Battle tank and T72 tank in the training data. Among the SAR images of the T72, 280 images of the T62 tank are classified as 147 Battle Tanks and 133 as T72 tanks, and the failure to assign any images of the backhoe target reveals that this target is a tank with a high probability. Since the D7 target is a bucket, 215 of the 280 SAR images are assigned to the Backhoe model loader and the remaining images are assigned to the battle tank and T72 tank, indicating that this target is a loader with 76.8% accuracy. These results revealed that even targets that have never been trained can be predicted with appropriate methods.

5. Conclusion

In this study, for the first time, classification of SAR images was performed using a dataset trained with ISAR images. Three different ISAR images were used as training data. Among these targets, 85 different ISAR images of the T72 tank were obtained from the MSTAR data, while the images of the other two targets (Backhoe Loader and Battle Tank) were taken from the publications in the literature. Only one ISAR image of the Backhoe loader and battle tanks was reproduced using the rotation technique, resulting in 85 different images. Thus, a total of 255 images of the three targets were used in the training. MSAT SAR data of 3 targets were used for testing purposes. Only one of these targets (T72) consists of SAR images of the same target as the target in the training data. The other two targets consist of images that have never been used in education but are similar to educational targets. In this way, ATR performance with test targets that were never trained was examined. For classification, 3 different feature extraction algorithms, namely GLRLM, GLSZM and GLCM, were applied and the data was trained with KNN, SVM and ANN. The results shows that the best performance was obtained with the combination of GLCM+ANN with an accuracy of 84.05%. When the confusion matrix is evaluated, almost all of the T72 tank is assigned as T72 tank, T62 images are distributed between the two tanks in the training data, and the images of D7 loader are assigned to the backhoe loader with a rate of 76.8%, revealing that even the images that have never been trained can be recognized with the appropriate model and classification.

Acknowledgment

We would like to thank to Mersin University for their support in the presented article.

References

Blacknell, D. & Vignaud, L. (2013). EN-SET-172-01 ATR of Ground Targets: Fundamentals and Key Challenges. Radar Autom. Target Recognit. Non-Cooperative Target Recognit., 1–36. [Online]. Available: https://www.sto.nato.int/publications/STO Educational Notes/RTO-EN-SET-172/EN-SET-172-01.pdf.

Copsey, K. D. (2004). Bayesian Approaches for Robust Automatic Target Recognition. Dr. Philos. Univ. London.

Cui, X. C., Fu, Y. W., Su, Y., & Chen, S. W. (2023). Physical Parameters Joint Estimation of Satellite Parabolic Antenna with Key Frame Pol-ISAR Images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. doi: 10.1109/TGRS.2023.3335960.

Demirci, S., Yigit, E. & Ozdemir, C. (20115). Wide-field circular SAR imaging: An empirical assessment of layover effects. Microw. Opt. Technol. Lett., 57(2), 489–497. doi: 10.1002/mop.28884.

Demirci, S., & Izumi, Y. (2023). Application of H/ᾱ Decomposition to Limited and Dual-Polarimetric 3D SAR Data of Civilian Vehicles. IEEE Access. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3301619

Dong, G., Kuang, G. Wang, N., Zhao, L. & Lu, J. (2015). SAR Target Recognition via Joint Sparse Representation of Monogenic Signal, IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens., 8(7), 3316–3328. doi: 10.1109/JSTARS.2015.2436694.

Dong, G., Kuang, G., Wang, N. & Wang, W. (2017). Classification via sparse representation of steerable wavelet frames on grassmann manifold: Application to target recognition in SAR image. IEEE Trans. Image Process., 26(6), 2892–2904. doi: 10.1109/TIP.2017.2692524.

Duysak, H., Özkaya, U. & Yigit, E. (2020). Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Tahıl Yüzey Sınıflaması. Eur. J. Sci. Technol. doi: 10.31590/ejosat.802719.

Duysak, H. & Yigit, E. (2020). Machine learning based quantity measurement method for grain silos, Meas. J. Int. Meas. Confed., 152. doi: 10.1016/j.measurement.2019.107279.

Gotcha Volumetric SAR Data Set Overview. https://www.sdms.afrl.af.mil/index.php?collection=gotcha (accessed Sep. 08, 2021).

Liu, H. & Li, S. (2013). Decision fusion of sparse representation and support vector machine for SAR image target recognition. Neurocomputing, 113, 97–104. doi: 10.1016/J.NEUCOM.2013.01.033.

Martone, A. Innocenti, R. & Ranney, K. (2009). Moving Target Indication for Transparent Urban Structures, US Army Res. Lab. Adelphi United States.

Miao, X. & Liu, Y. (2021). Target Recognition of SAR Images Based on Complex Bidimensional Empirical Mode Decomposition. Sci. Program. doi: 10.1155/2021/6642316.

MSTAR Public Targets. https://www.sdms.afrl.af.mil/index.php?collection=mstar&page=targets (accessed Sep. 03, 2021).

Novak, L., Owirka, G. Netishen, M. (1993). Performance of a High-Resolution Polarimetric SAR Automatic Target Recognition System, Lincoln Lab. J., 6(1).

Novak, L. M., Owirka, G. J. & Brower, W. S. (1998). Efficient multi-target SAR ATR algorithm. Conf. Rec. Asilomar Conf. Signals, Syst. Comput., 1, 3–13. doi: 10.1109/ACSSC.1998.750815.

Song, J., Kim, D. J., Hwang, J. H., Kim, H., Li, C., Han, S., & Kim, J. (2023). Effective Vessel Recognition in High Resolution SAR Images Utilizing Quantitative and Qualitative Training Data Enhancement from Target Velocity Phase Refocusing. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. doi: 10.1109/TGRS.2023.3346171

Özkaya, U. (2020). Automatic Target Recognition (ATR) from SAR Imaginary by Using Machine Learning Techniques. Avrupa Bilim ve Teknol. Dergisi, 165–169. doi: 10.31590/EJOSAT.802811.

Özkaya, U., Yigit, E., Seyfi, L., Özturk, S. & Singh, D. (2021). Comparative regression analysis for estimating resonant frequency of C-like patch antennas, Math. Probl. Eng., doi: 10.1155/2021/6903925.

U.S. Air Force, Sesnsor Data Management System (SDMS), (1997), GTRI dataset." https://www.sdms.afrl.af.mil/index.php?collection=gtri (accessed Sep. 08, 2021).

Vertiy, A., Cetinkaya, H., Panin, S., Pavlyuchenko, A., Tekbas, M., Unal, A., Kizilhan, A., Kaya, A., Ozdemir, C., Demirci, S. & Yigit, E. (2011). Image reconstruction in SAR, ISAR and tomography applications at millimeter-wave band. Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium, doi: 10.1109/MRRS.2011.6053631.

Yigit, E. (2018). Operating Frequency Estimation of Slot Antenna by Using Adapted kNN Algorithm, Int. J. Intell. Syst. Appl. Eng., 6(1), 29–32, doi: 10.1039/b000000x.

Yigit, E. (2020). A translational motion compensation technique for inverse synthetic aperture radar images using multi-objective particle swarm optimization algorithm. Microw. Opt. Technol. Lett., 62(6), doi: 10.1002/mop.32314.

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

UMAGD, (2023) 15(3), s309-s317.

10.29137/umagd.1399028

Cilt/Volume:15 Sayı/Issue:3 Aralık/December 2023 Özel Sayı/Special Issue

Araştırma Makalesi / Research Article

Image Encryption Implementation by Using Memristor Based Chaotic Systems and DNA Coding

Cagri CANDAN[1], Hasan ULUTAS*

[1]*Yozgat Bozok University, Department of Computer Engineering, Yozgat, TURKIYE*

***Başvuru/Received**: 02/12/2023* ***Kabul / Accepted**: 27/12/2023* ***Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/12/2023*

***Son Versiyon/Final Version**: 31/12/2023*

Abstract

The rapid advancement of internet technologies has accentuated the need for robust data security mechanisms, particularly in the realm of image transmission. Addressing this, our study introduces a cutting-edge encryption system that blends arithmetic operations with DNA-inspired biological processes and the complexity of chaotic systems, presenting a significant evolution in encryption methodologies. The system employs a synergetic fusion of DNA-based encryption and XOR operations, bolstered by a memristor-based chaotic system, to heighten the security barriers of image encryption. This innovative approach not only provides a secure means to transmit images over the internet but also lays new groundwork in the field of cryptographic research. Rigorous security analyses, including correlation, histogram, and differential attack assessments, are performed, with the findings validating the robustness and efficacy of the encryption process. The findings of this research, by offering an enhanced method that could provide a distinct perspective on information protection in an increasingly digitized world, expand the discourse on data security.

Key Words

"Chaos, DNA encoding, Image encryption, Memristor, Security tests"

***Sorumlu Yazar: hasan.ulutas@bozok.edu.tr**

1. Introduction

As internet and network technology continue to expand, the transmission of information across networks has risen, giving rise to increased security risks for users. Therefore, information security has become necessary for modern computing systems. Modern systems protect their data against security threats with cryptography applications. These currently used cryptography methods work with a lot of mathematical operations and a system of private keys. Although it seems safe, security vulnerabilities in algorithms are emerging every day. Various cryptological systems attract the attention of researchers by focusing on the randomness of chaotic systems and the rich dynamics they offer. In many of these proposed studies, it is aimed to hide data with unpredictable trajectories resulting from the sensitive dependence of chaotic systems on initial conditions and control parameters (Jakimoski and Kocarev, 2001; Amigó, Kocarev and Szczepanski, 2007; Özkaynak, Özer and Yavuz, 2013; Candan and Şahin, 2023; Sahin, 2023). The security encryption processes necessary for storing and transmitting images can be ensured. Chaotic maps are widely employed in secure communication and are considered a factor that balances data security with computational speed (Gu and Ling, 2014). For these reasons, chaotic maps have been extensively used in various image encryption applications. Image encryption applications frequently utilize chaotic systems, with approaches including one-dimensional chaotic-based algorithms (Pareek, Patidar and Sud, 2006) and two or multi-dimensional chaotic-based algorithms (Peng, Zhang and Liao, 2009). Another notable avenue involves hybrid methods, wherein encryption algorithms are craeted by integrating other encryption techniques and chaotic systems within the same framework (Chen, Mao and Chui, 2004). These methods leverage the unique properties of chaotic systems to enhance the security of image data.

DNA encoding is the modern field of cryptography with many features such as low power usage, large storage space and parallelism. They are cryptosystems with four complementary rules: addition, subtraction, XOR and XNOR DNA operations. DNA encoding represents the biological technique within DNA computation (Şahin, 2023). Encrypted images are obtained as a result of DNA encoding for the image, first of all, DNA coding is done and after the DNA processes are applied, the DNA code is decoded and converted back to its original state. There are studies using DNA coding in the literature (Chen, 2003; Tanaka, Okamoto and Saito, 2005; Amin, Saeb and El-Gindi, 2006; Şahin, 2023). Wei et al. introduced a technique for encoding images based on DNA, utilizing a hyper-chaotic system specifically designed for color images (Wei *et al.*, 2012). The suggested approach demonstrated resilience against comprehensive attacks, statistical attacks, and various other forms of attacks. Zhang et al. incorporated DNA encoding, image fusion, and a hyper-chaotic system in their method. The simulation results showcased robust encryption effects and the capability to withstand both extensive and statistical attacks (Zhang, Xue and Wei, 2012).

In this study, the simple theory of DNA sequence processing is used for image coding, and memristor chaotic map and DNA sequence are combined to implement image coding. Although the memristor element is widely used in chaotic systems, memristor-based systems in cryptology applications are not very common in the literature. In this study, using the advantages of the memristor element to chaotic systems, the usability of this element in cryptology applications is presented. The security analyses of the implemented system are presented with correlation analysis, histogram analysis and differential attack analysis. The structure of this paper is following. Section 2 provides information on chaos-based cryptosystems and DNA encoding. In Section 3, the methods used for encryption and decryption are described in detail, along with how well they perform in terms of security analysis and experimental findings. The systems' results are submitted in Section 4.

2. Material and Methods

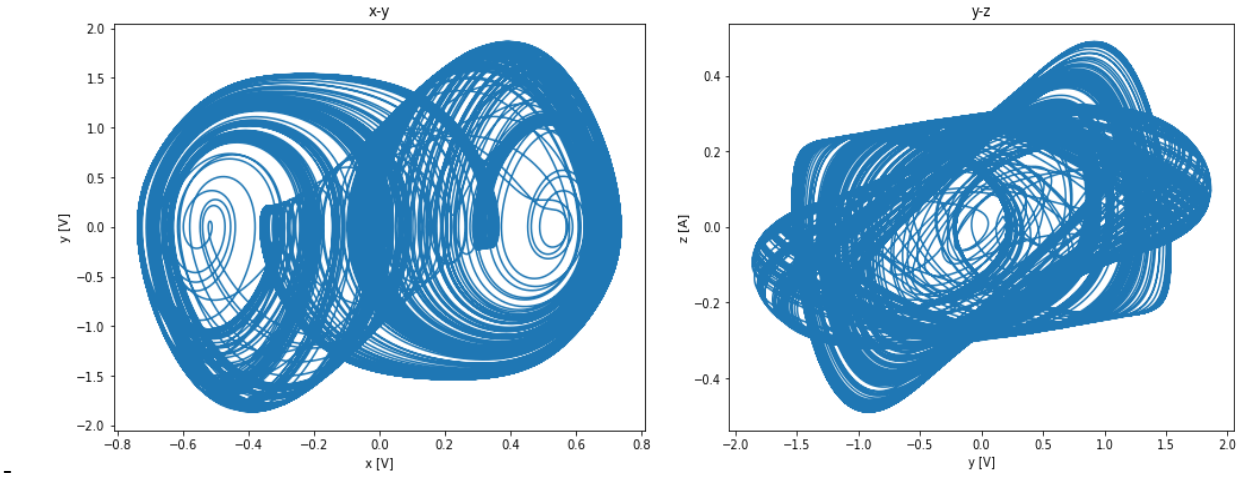
Text encryption operates under different principles compared to image encryption, primarily due to the differing nature of their data formats. As an alternative, chaos-based encryption works well with chaotic theory and maps. Details on chaotic systems and DNA encoding are provided in this section. Then, an application for image encryption is created using DNA encoding and memristor chaotic maps.

2.1. Memristor-based chaotic system

The encryption system employs a chaotic system based on memristor. The literature describes the derivation of a 4D chaotic system using a configuration involving two memristor (Lai *et al.*, 2021). The mathematical expression for the memristor based chaotic system is given in Eq. (1).

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= a[z - (-0.1 + x^2)y] \\ \dot{z} &= y - b(-0.1 + w^2)z + w \\ \dot{w} &= -cz \end{aligned} \tag{1}$$

The system parameters were chosen as follows: a = 20, b = 0.5, c = 34.84 and initial states are selected as (0, 0, 0.1, 0). The study involved 10,000 iterations conducted on the MATLAB platform. The state equations of the chaotic system are obtained, and the system's phase portraits are illustrated in Figure 1.



(*a*) (*b*)

Figure 1. Phase portraits of memristor based chaotic system (a) *x-y* plane and (b) *y-z* plane

2.2. Scheme of Encrypted System

DNA sequencing is the process of identifying the nucleic acid or nucleotide sequence in DNA. The basic building blocks of DNA are adenine, guanine, cytosine, and thymine, with guanine and cytosine pairing together, as do adenine and thymine. In digital image processing, each pixel of an image is typically represented by an eight-bit binary number. In this binary system, 0 and 1 are complementary, as are 00 and 11, and 01 and 10. Using 00, 11, 01, and 10 to represent A, T, G, and C, respectively, allows for the representation of each pixel with a nucleotide sequence. For example, a pixel value of 223, with a binary representation of 11100001, corresponds to the nucleotide sequence "TCAG" following the specified rules. While there are 24 possible combinations of these four nucleotides, the complementarity principle applies to only eight coding combinations, as outlined in Table 1. Table 1 illustrates the DNA encoding system used in our study, detailing the binary to nucleotide mappings. During coding, nucleotides are substituted using the DNA complement rule. The encryption strength can be increased by randomly selecting any rule. Rule 1 is chosen for coding in the study.

Table 1. DNA encoding system

Rule	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
00	A	A	T	T	G	G	C	C
01	G	C	G	C	A	T	A	T
10	C	G	C	G	T	A	T	A
11	T	T	A	A	C	C	G	G

2.3. DNA encoding process

The pixel values are modified to ensure a significant distinction between the histograms of the encrypted image and the original image. For this, we need to do some sort of operation between pixel values. The values are encoded in the DNA sequence, so we need to do the DNA manipulations. DNA nucleotides include addition, subtraction and XOR operations. By altering the pixel values through DNA encoding, the histogram of the encrypted image significantly diverges from that of the original, enhancing encryption security. In the study, DNA XOR process is used for encryption. The XOR of all possible combinations is shown in Table 2. Table 2 showcases the DNA XOR process used for encryption, illustrating how this operation contributes to the robustness of the encryption.

Table 2. DNA and XOR process

XOR	**A**	**G**	**C**	**T**
A	A	G	C	T
G	G	A	T	C
C	C	T	A	G
T	T	C	G	A

3. Experimental Results

As of today, the cryptography industry is increasingly significant, with new methods emerging regularly. One of the recently developed and widely adopted approaches is DNA-based encryption, a model that simulates the four bases found in the human DNA structure within a computer environment. This innovative encryption method involves hybridizing DNA structures with chaotic systems to enhance security. The block diagram of the encrypted system, as illustrated in Figure 2, provides a visual guide through the encryption process. It begins with the original image, which undergoes confusion to increase complexity. A secret key is generated from this image using the SHA-256 hash algorithm, ensuring secure encryption. The subsequent DNA encoding translates image pixels into DNA sequences, capturing the essence of biological principles in computational form. Through DNA operations and XOR processes, the methodology effectively scrambles the information, with the DNA decoded output forming the encrypted image. The study, which leverages this intricate encryption process, is implemented on the Python platform using Google Colab, showcasing the practical application of these theoretical concepts. Figure 3 depicts the image utilized in the study, demonstrating the encryption's impact visually. The detailed steps of the system's coding procedure are provided below, illustrating how each phase Enhances the resilience of the encryption.

Step 1: Secret key generating
The input image is a 3-channel matrix in RGB format. Let this image be represented by the (M, N, O) size matrix A.
A= A(i,j,k)
i=1,2,……,M and j=1,2,….., N and k=1,2,……,O
Here A(i, j, k) represents the value of the image pixel in (i, j, k). First, the given 3-dimensional matrix is converted into a 1-dimensional array, and a secret key is generated using the SHA-256 algorithm, which converts it to 256-bit code.
Step 2: The original image (Image dimensions: 1201X801 pixels) is divided into three different matrices, red, green and blue, and these matrices are converted to binary matrices.
Step 3: By choosing one of the rules in Table 1, these matrices are encoded into the DNA sequence.
For example, for rule 1

01 11 10 00	$(120)_{10}$	G T C A
10 00 11 10	$(142)_{10}$	C A T C
00 01 11 01	$(29)_{10}$	A G T G
01 10 10 10	$(106)_{10}$	G C C C

Step 4: Similarly, the secret key generated in step 2 is converted into a 2-dimensional matrix and this matrix is encoded into the key DNA sequence.
Step 5: In this step, XOR is performed between each DNA encoded matrix and DNA encoded matrix key using the XOR operation shown in Table 2.
Step 6: Three chaotic sequences are created using the memristor chaotic system.
X1 = {x_1, x_2, x_3, ... , x_k},
X2= {x_1, x_2, x_3, ... , x_k} and,
X3 = {x_1, x_2, x_3, ... , x_k} (The elements of each array are different from each other.)
Step 7: To mix the values of the R, G, B matrix, 3 more arrays such as X1_sort, X2_sort, X3_sort are created.
X1_sort = sort(X1);
X2_sort = sort(X2);
X3_sort = sort(X3);
Since the matrix R is a 2 dimensional array and X1 is a 1 dimensional array this matrix is converted to a 1 dimensional array and a matrix is created again after mixing. The arrays X1_sort, X2_sort, and X3_sort obtained during the sorting process represent the index values obtained when sorting chaotic values in ascending order. These index values are then used to confuse the image.
Step 8: The generated chaotic sequences are encoded using Table 1 and XOR with image pixels using Table 2.
Step 9: The three DNA encoded scrambled matrices are converted back into binary matrices and combined to get the encoded image.
Step 10: The process for decrypting the image is the reverse of the encryption process. The secret key created in step 1 is used for decryption.

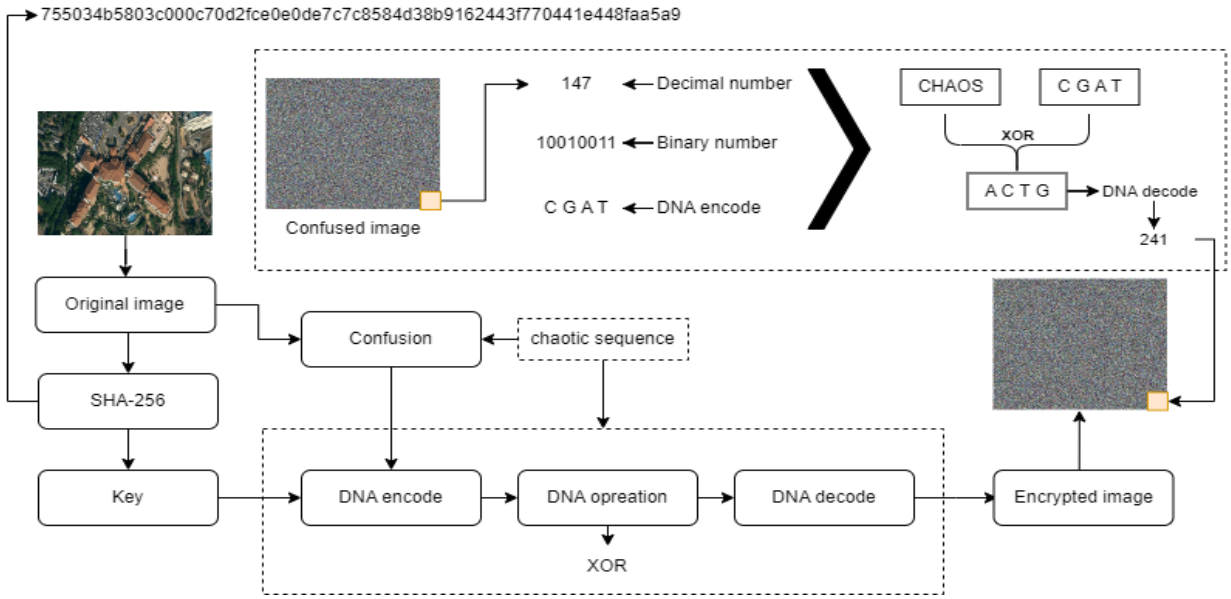
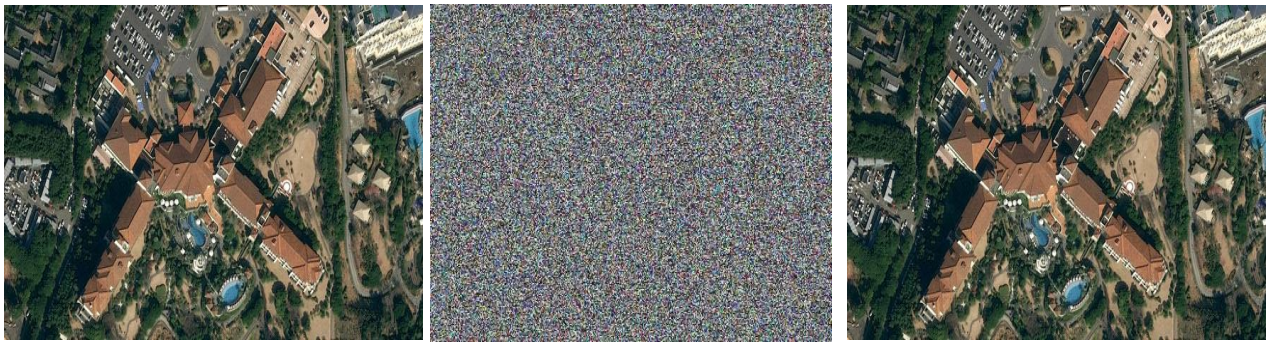


Figure 2. Block diagram of encrypted system

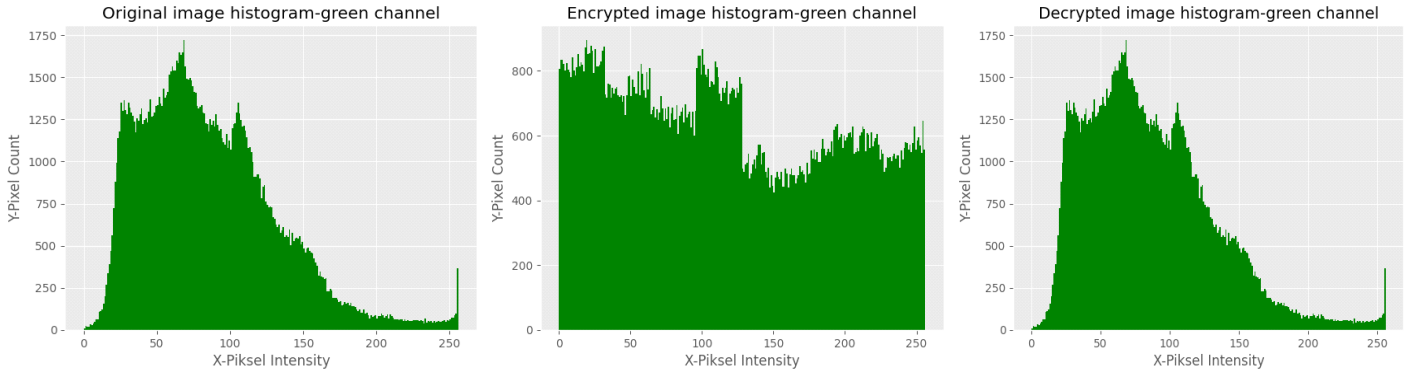


(*a*) (*b*) (*c*)

Figure 3. (*a*). Original Image (*b*). Encrypted image (*c*). Decrypted image

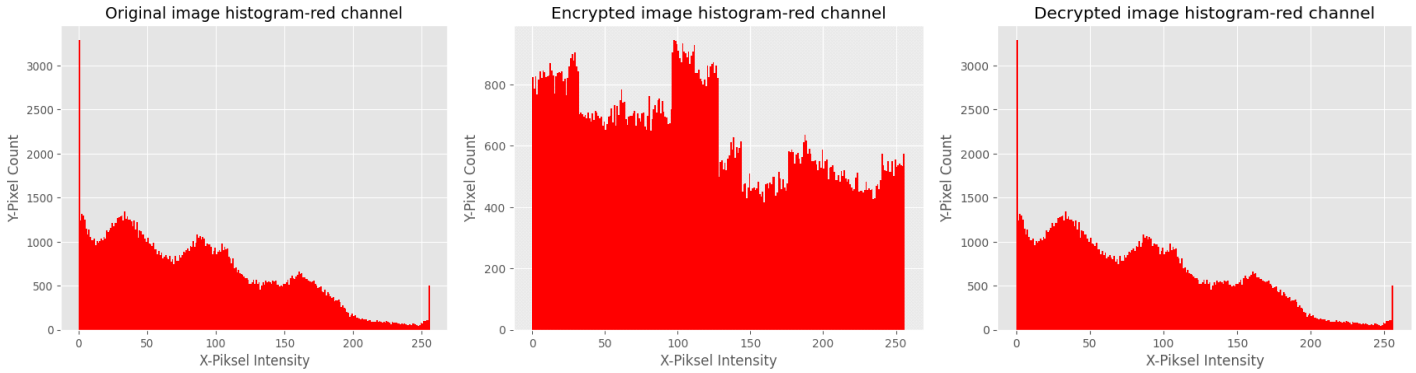
3.1. Histogram Analyses

The distribution of pixels within an image is effectively represented through histogram plots, which are critical in evaluating the efficacy of encryption processes. Histogram graphics, extracted from images, can inadvertently reveal information, hence, the histogram of an encrypted image should ideally be as uniform as possible to minimize information leakage (Wang, Teng and Qin, 2012; Alawida *et al.*, 2019). Figures 4-6 display the RGB (Red-Green-Blue) channel histogram graphs for the original, encrypted, and decrypted images, respectively. These histograms visually illustrate the differences in pixel intensity distribution across the three stages. For instance, the encrypted image's blue channel histogram (Figure 4a) shows a uniform distribution, concealing any discernible patterns and thereby reducing the potential for information leakage. In contrast, the original image's blue channel histogram (Figure 4b) exhibits peaks at certain pixel intensities, while the decrypted image's blue channel histogram (Figure 4c) mirrors the original image, confirming the restoration of the pixel distribution post-decryption. Similarly, the encrypted image histograms for the red and green channels demonstrate a flattened profile, which indicates an even distribution of pixel intensities, enhancing the randomness and security of the encryption. Conversely, the histograms of the decrypted image re-establish the original distribution, validating the effectiveness of the decryption process. Thus, the histograms presented in Figures 4-6 succinctly demonstrate the impact of the encryption and decryption processes on the pixel intensity distribution, affirming that the employed encryption method successfully obscures and subsequently recovers the image information.



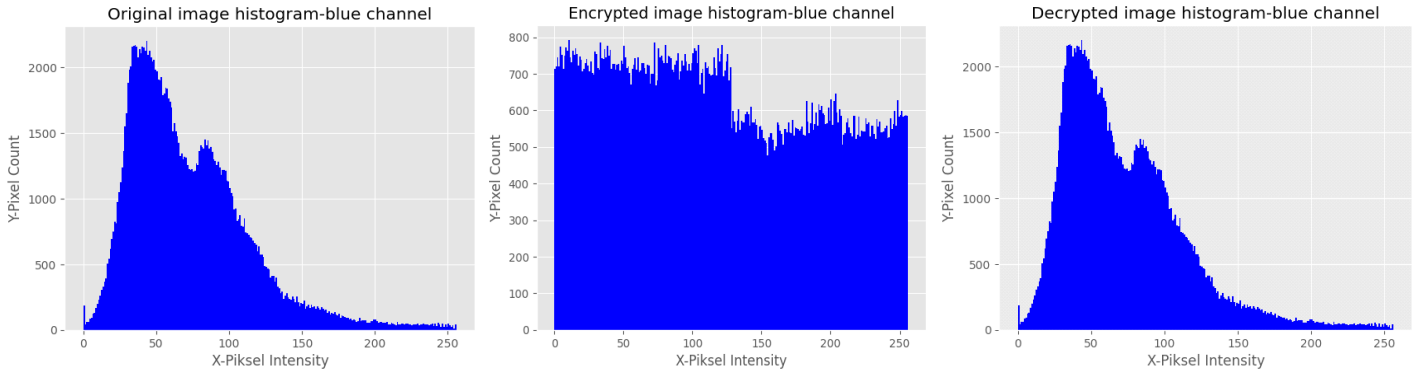
(*a*) (*b*) (*c*)

Figure 4. Green channel histogram plot of image (a) Original (b) Encrypted (c) Decrypted



(*a*) (*b*) (*c*)

Figure 5. Red channel histogram plot of image (a) Original (b) Encrypted (c) Decrypted



(*a*) (*b*) (*c*)

Figure 6. Blue channel histogram plot of image (a) Original (b) Encrypted (c) Decrypted

3.2. Correlation Analysis

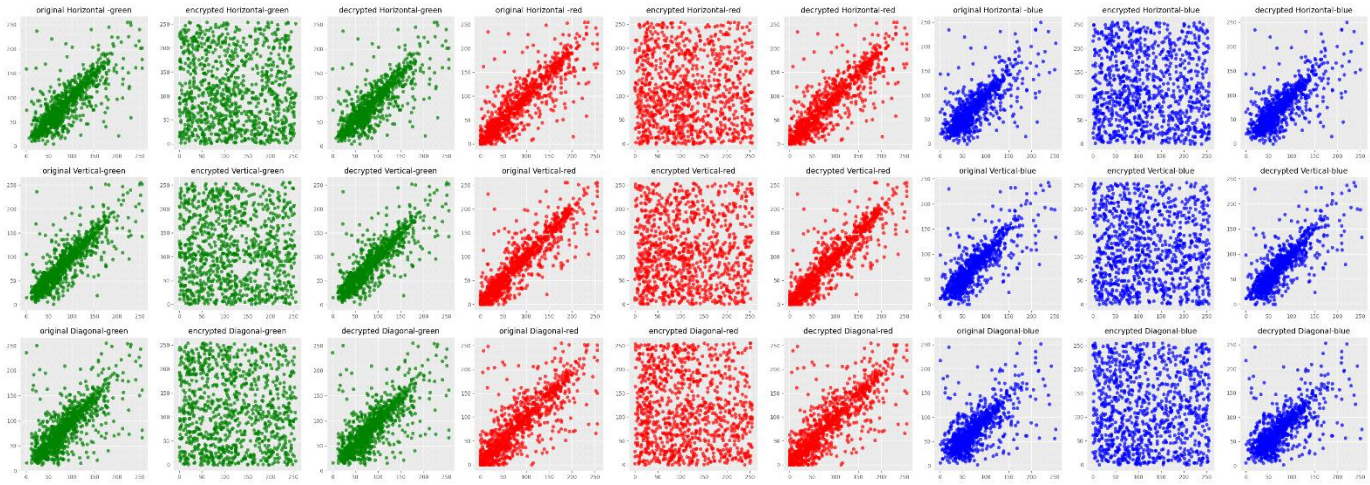
In probability theory and statistics, the concept of correlation displays the direction and size of the linear relationship between two random variables (Bandyopadhyay, Bhattacharyya and Das, 2008). High correlation between adjacent pixels is typical in a flat image. For an image that has undergone good encryption, we expect correlation values to decrease significantly, indicating a reduction of recognizable patterns in the image data. The correlation between adjacent pixels can be quantified using Eq. 2:

$$P_{xy} = \frac{cov(x,y)}{\sqrt{D(x)D(y)}} \tag{2}$$

where *x* and *y* represent the pixel values and D(x) and D(y) their respective standard deviations. Ideally, the absolute correlation value between neighboring pixels in an encrypted image should approach zero, signifying robust and efficient encryption (Yildirim, 2021). Figure 7 and the associated Table 3, which would typically show the correlation values, illustrate this principle. The depicted correlation distribution graphs for the original, encrypted, and decrypted images in the blue, red, and green channels demonstrate a substantial decrease in correlation in the encrypted images compared to the original ones, thus confirming the encryption's effectiveness in disrupting the linear relationships inherent in the unencrypted image data.

Table 3. Results of correlation analysis

Channel	Original horizontal correlation	Original vertical correlation	Original diagonal correlation	Encrypt horizontal correlation	Encrypt vertical correlation	Encrypt diagonal correlation
Red	0.8617	0.8989	0.8185	-0.0219	0.0222	-0.0817
Green	0.7968	0.8447	0.7316	-0.0586	-0.0340	-0.0499
Blue	0.7509	0.8101	0.6757	-0.0356	-0.0265	-0.0050



(*a*) (*b*) (*c*)

Figure 7. (a) Correlation graph plots of the red channel original, encrypted and decoded image (b) Correlation graph plots of the green channel original, encrypted and decoded image (c) Correlation graph plots of the blue original, encrypted and decoded image

3.3. Differential attack analysis

The combined average intensity of change (UACI) and the pixel rate of change (NPCR), two widely used metrics, are frequently used to assess how well an encryption method can fend off various attacks. While UACI shows the average difference density between two encrypted images, NPCR shows the percentage of different pixel counts between two encrypted images. An effective encryption method is characterized by high NPCR and UACI values. NPCR and UACI are defined as in the Eqs. (3)-(5):

$$D(i,j) = \begin{cases} 1, C_{o1}(i,j) \neq C_{o2}(i,j) \\ 0, C_{o1}(i,j) = C_{o2}(i,j) \end{cases} \tag{3}$$

$$UACI = \frac{1}{W \times H}\left[\sum_{i,j} \frac{C_{o1}(i,j) - C_{o2}(i,j)}{255}\right] \times 100\% \tag{4}$$

$$NPCR = \frac{\sum_{i,j} D(i,j)}{W \times H} \times 100 \tag{5}$$

In this study NPCR and UACI are obtained as 99.605 and 33.247, respectively. According to these results, it has been determined that the developed encryption algorithm has a structure resistant to differential attacks. The high NPCR and UACI values obtained in our

study suggest a strong resistance against differential attacks, indicating that even minor changes in the input lead to significant differences in the encrypted output.

4. Discussion

The incorporation of a chaotic system based on memristors, DNA encoding, and XOR operations in the suggested image encryption approach represents a noteworthy progression in cryptographic methods. This unique integration represents a significant departure from traditional cryptographic methods, introducing a novel approach to image encryption. The memristor-based chaotic system introduces a dynamic and complex element, providing a solid foundation for the subsequent encryption steps. The utilization of DNA encoding, guided by the complement rule outlined in Table 1, coupled with XOR operations, showcases a novel fusion of biological principles and computational processes. Thorough security analyses, including correlation analysis, histogram analysis, and differential attack analysis, validate the effectiveness of the encryption process. Compared to existing methods, our approach demonstrates superior performance in terms of correlation values, histogram patterns, and NPCR and UACI metrics, underscoring its robustness against various cryptographic attacks. The low correlation values, distinct histogram patterns, and high NPCR and UACI values collectively indicate the robustness of the encryption algorithm against various attacks. Looking forward, there is potential for further refinement and application of the proposed encryption model in real-world scenarios such as secure communication, data storage, and digital media protection, emphasizing the ongoing commitment to advancing encryption technologies for enhanced security and performance across diverse environments.

5. Conclusion

Chaotic systems, characterized by their inherent randomness, ergodicity, and sensitivity to initial conditions, inherently possess mixing and diffusion properties crucial for cryptographic applications. Leveraging the dynamic features of chaotic systems and introducing a DNA-XOR-based hybrid encryption algorithm, this study has successfully implemented robust, durable, and high-performance image encryption applications. The employed chaotic system utilizes a memristor-based circuit model, providing a unique perspective to the research. Comprehensive security and performance analyses of the encryption applications have been conducted, with the results disclosed. In the future, there are intentions to further enhance the practical application of encryption algorithms created through the proposed model in real-world situations. In the future, our research endeavors will be directed towards further enhancing the practical applicability of encryption algorithms developed through the proposed model in real-world scenarios. One of the primary areas of focus will be addressing the challenges associated with scalability and seamless integration of our encryption solutions into existing systems. We recognize the importance of ensuring that our cryptographic techniques can adapt to varying scales of data and diverse technological infrastructures.

Acknowledge

References

Alawida, M., Samsudin, A., Teh, J. S., & Alkhawaldeh, R. S. (2019). A new hybrid digital chaotic system with applications in image encryption. Signal Processing, 160, 45-58.

Amigo, J. M., Kocarev, L., & Szczepanski, J. (2007). Theory and practice of chaotic cryptography. Physics Letters A, 366(3), 211-216.

Amin, S. T., Saeb, M., & El-Gindi, S. (2006, November). A DNA-based implementation of YAEA encryption algorithm. In Computational intelligence (pp. 120-125).

Bandyopadhyay, S. K., Bhattacharyya, D., & Das, P. (2008, June). Handwritten signature recognition using departure of images from independence. In 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (pp. 964-969). IEEE.

Candan, C., Şahin, M. E., (2023). Gömülü sistemlerde kaotik haritalar kullanılarak gerçek zamanlı görüntü şifreleme uygulaması. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 11(2), 1037-1047.

Chen, G., Mao, Y., & Chui, C. K. (2004). A symmetric image encryption scheme based on 3D chaotic cat maps. Chaos, Solitons & Fractals, 21(3), 749-761.

Chen, J. (2003, May). A DNA-based, biomolecular cryptography design. In 2003 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) (Vol. 3, pp. III-III). IEEE.

Gu, G., & Ling, J. (2014). A fast image encryption method by using chaotic 3D cat maps. Optik, 125(17), 4700-4705.

Jakimoski, G., & Kocarev, L. (2001). Chaos and cryptography: block encryption ciphers based on chaotic maps. Ieee transactions on circuits and systems i: fundamental theory and applications, 48(2), 163-169.

Lai, Q., Wan, Z., Kengne, L. K., Kuate, P. D. K., & Chen, C. (2020). Two-memristor-based chaotic system with infinite coexisting attractors. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 68(6), 2197-2201.

Özkaynak, F., Özer, A. B., & Yavuz, S. (2013, April). Security analysis of an image encryption algorithm based on chaos and DNA encoding. In 2013 21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) (pp. 1-4). IEEE.

Pareek, N. K., Patidar, V., & Sud, K. K. (2006). Image encryption using chaotic logistic map. Image and vision computing, 24(9), 926-934.

Peng, J., Zhang, D., & Liao, X. (2009). A digital image encryption algorithm based on hyper-chaotic cellular neural network. Fundamenta Informaticae, 90(3), 269-282.

Sahin, M. E. (2023). Memristive chaotic system-based hybrid image encryption application with AES and RSA algorithms. Physica Scripta, 98(7), 075216.

Şahin, M. E. (2023). Memristor-based hyperchaotic system and DNA encoding based image encryption application on LabVIEW. International Journal of Engineering Research and Development, 15(1), 269-276.

Tanaka, K., Okamoto, A., & Saito, I. (2005). Public-key system using DNA as a one-way function for key distribution. Biosystems, 81(1), 25-29.

Wang, X., Teng, L., & Qin, X. (2012). A novel colour image encryption algorithm based on chaos. Signal Processing, 92(4), 1101-1108.

Wei, X., Guo, L., Zhang, Q., Zhang, J., & Lian, S. (2012). A novel color image encryption algorithm based on DNA sequence operation and hyper-chaotic system. Journal of Systems and Software, 85(2), 290-299.

Yildirim, M. (2021). A color image encryption scheme reducing the correlations between R, G, B components. Optik, 237, 166728.

Zhang, Q., Xue, X., & Wei, X. (2012). A novel image encryption algorithm based on DNA subsequence operation. The Scientific World Journal, 2012.