

Kırıkkale University International Journal of Engineering Research and Development

International Peer Reviewed Journal
e-ISSN: 1308-5514



Volume: 15
Issue: 1

JANUARY 2023

Kırıkkale Üniversitesi
Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
Uluslararası Hakemli Dergi

Cilt: 15 Sayı:1 Ocak 2023



KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ / KIRIKKALE UNIVERSITY

**MÜHENDİSLİK VE MİMARLIK FAKÜLTESİ
FACULTY OF ENGINEERING & ARCHITECTURE**

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

Sahibi / Owner

Ersan ASLAN
Rektör / Rector

Baş Editör/Editor in Chief

Ali Payıdar AKGÜNGÖR

Editör Yardımcıları / Associate Editors

Murat LÜY
Özer SEVİM
Hüseyin AYDİLEK

Yazışma Adresi /Address

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

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

ijerad@kku.edu.tr

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

Fax: +90-318-357-24 59

ISSN- Online: 1308-5514

Ocak 2023 / January 2023

Alan Editörleri / Area Editors

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

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

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

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

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

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

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

Yayın ve Mizanpaj Editörleri / Publication and Layout Editors

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

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

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



KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ / KIRIKKALE UNIVERSITY

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

Amaç

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

Aim

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

Araştırma Alanı

Mühendislik Teorisi ve Uygulamaları

Research Highlights

Engineering Theory and Applications

Kapsam

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

Scope

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

Yazarlara Bilgi

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

Authors Information

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

Yayın Etiği

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

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

UMAGD, yayınlanmak üzere başvuru alan çalışmayı en az iki hakem tarafından kör hakem değerlendirilmesi usullerine uygun olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır. Yazar ve hakemlerin kimlik bilgileri ve çalışmanın gizli kalacağı UMAGD'nin garantisine 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 müsaade etmez. Çalışmanın muhattapı olan kişi ve kurumların zarar görmesini engelleyecek şekilde değerlendirme süreçlerini yönetir.

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

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

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

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

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

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

Araştırma Etiği

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

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

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

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

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

Araştırmacılar, katılımcıları riske sokmayacak şekilde çalışmalarını gerçekleştirmelidirler.

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

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

Etik Kurulu ve Yasal / Özel İzin Belgesi Alınması

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

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

Ayrıca;

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

Publication Ethics

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Research Ethics

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

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

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

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

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

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

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

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

Ethics Committee and Obtaining Legal / Special Permit Certificate

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

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

Also;

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

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

- 1 PV Sistemler için MPPT Kontrol Cihazı Tasarımı ve Karşılaştırılması**
Design And Comparison of MPPT Controller for PV Systems
Mustafa Teke , Alaa Shakir Mhmood Al-Arjeeli , Fatih Korkmaz
DOI: 10.29137/umagd.1113630 **1-15**
- 2 Investigation of the Effect of Sintering Temperatures on the Production of Porous NiTi Alloy by Loosen Sintering Method**
Naci Arda Tanış, Bülent Bostan
DOI: 10.29137/umagd.1190335 **16-23**
- 3 Vakıf Üniversitelerinin Akademik Performans Analizi İçin Yeni Bir Bütünleşik ÇKKV Çerçevesi**
A New Integrated MCDM Framework For Academic Performance Analysis Of Foundation Universities
Sinan Çizmecioğlu, Esra Boz, Ahmet Çalık
DOI: 10.29137/umagd.1098902 **24-39**
- 4 Sağlık Hizmetleri Performans Yönetiminde Kritik Başarı Faktörlerinin AAS Yöntemi İle Değerlendirilmesi**
Evaluation of Critical Success Factors in Health Services Performance Management with ANP Method
Şeyda Gür, Kübra Karakuş, Burak Yeşilyurt, Tamer Eren
DOI: 10.29137/umagd.1110486 **40-48**
- 5 Hedef Programlama İle Uzaktan Eğitim Ders Programı Çizelgeleme Problemi Ve Bir Örnek Uygulama**
The Problem Of Schedule Of Distance Education Lesson Schedule With Goal Programming And An Example Application
Hacı Mehmet Alakaş, Mustafa Uğurlu
DOI: 10.29137/umagd.1118493 **49-63**
- 6 Perovskit Güneş Hücreleri için c-TiO₂ Optimizasyonu**
Optimization of c-TiO₂ for Perovskite Solar Cells
Elif Damgacı, Ayşe Seyhan
DOI: 10.29137/umagd.1123361 **64-70**
- 7 Nitroselüloz Bazlı Yakıtların Depolama Ömürlerine Ortam Koşullarının Etkisinin İncelenmesi**
Investigation Of The Effect Of Ambient Conditions On The Storage Life Of Nitrocellulose Based Fuels
Mehmet Çağlayan, Muharrem Pul, Ayşegül Ülkü Metin
DOI: 10.29137/umagd.1131709 **71-81**
- 8 Bor Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Termal Özelliklerine Nano Bor İlavesinin Etkileri**
The Effects of Nano Boron Addition on the Thermal Properties of Boron Fiber Reinforced Polymer Composite Materials
Ayhan Şahin, Hanifi Çinici , Erdem Mermer
DOI: 10.29137/umagd.1133717 **82-90**
- 9 İş Değerlendirme Sürecinde Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri Üzerine Bir Uygulama**
An Application On Multi-Criteria Decision-Making Techniques In The Job Evaluation Process
Ataberk Olcay, Muharrem Düğenci, Mümtaz İpek, Medine Nur Türkoğlu Elitaş
DOI: 10.29137/umagd.1135951 **91-106**

- A Novel Design of Constant Load Creep Test Machine**
Hasan Demir, Atıl Emre Coşgun
10 DOI: 10.29137/umagd.1136062 107-116
- Investigation Of Energy Metabolism In The Different Tissues Of Colon Cancer Xenograft Models Based On The Tca And Cori Cycles And Glycolysis**
11 *Hülya Ayar Kayalı, Esra Bulut Atalay* 117-124
DOI: 10.29137/umagd.1142303
- Robust Output Feedback Control Design for Nonlinear Coupled-tank System using Linear Matrix Inequalities**
12 *Jaffar Seyyedemaile, Abdullah Başçı* 125-138
DOI: 10.29137/umagd.1147466
- Etilen Oksit Sterilizasyonunun PEEK Bazlı Dental İmplantın Kimyasal Yapısı Üzerine Etkisi**
13 *Effect Of Ethylene Oxide Sterilization On The Chemical Structure Of PEEK-Based Dental Implant* 139-150
Ogün BOZKAYA
DOI: 10.29137/umagd.1148544
- Toz Metalurjisi Yöntemi İle Tane İnceltici Üretimi Ve Döküm Performansının İncelenmesi**
14 *Grain Refiners Production With Powder Metallurgy Method And Investigation Of Casting Performance* 151--163
Ramazan Can, Engin Kocaman, Nazım Kunduracı, Süleyman Can Kurnaz
DOI: 10.29137/umagd.1167854
- Yerli Borlama Ajanı ile Yüzeyi Sertleştirilen AISI 1020 Çeliğinin İç Yapı ve Sertlik Davranışlarının İncelenmesi**
15 *Investigation of Microstructure and Hardness Behaviors of AISI 1020 Steel Surface Hardened with Local Boronizing Agent* 164-171
Bünyamin Yamanel, Osman Bican, S. Uğur Bayça
DOI: 10.29137/umagd.1174515
- Determination of The Static Friction Coefficient of Some Materials Used for Anti-slip Safety with ANOVA**
16 *Murat Diker, Bulent Cakmak, Engin Ergul* 172-185
DOI: 10.29137/umagd.1182843
- Hidrofobik Kaplamanın Kanat Profillerinin Aerodinamik Parametrelerine Etkisinin Deneysel İncelenmesi**
17 *Experimental Investigation Of The Effect Of Hydrophobic Coating On Aerodynamic Parameters Of Airfoils* 186-194
Fevzi Şahin, İsmayil İsmailov, Hakan Özcan
DOI: 10.29137/umagd.1191778
- Tek Aşamalı Ortak Sinterleme Yapılarak Çeşitli Kalınlıklarda Üretilen Tek Odacıklı Anot Destekli Katı Oksit Yakıt Pillerinin Performansı**
18 *Performance of Anode Supported Single Chamber Solid Oxide Fuel Cells Produced in Various Thicknesses by Single-step Co-sintering* 195-211
Yunus Sayan, Jung-Sik Kim, Houzheng Wu
DOI: 10.29137/umagd.1205617
- Analysis of MIMO Channel Capacity at 28/73 GHz with NYUSIM Channel Simulator**
19 *Ahmet Furkan Kola, Çetin Kurnaz* 212-218




- 20 **İskilip (Çorum) Civarının Kaya Düşmesi Potansiyelinin Değerlendirilmesi** 219-232
Assessment Of Rockfall Potential In The Vicinity Of Iskilip (Çorum)
Nazlı Tunar Özcan
DOI: 10.29137/umagd.1206917
- 21 **Otomotiv Sektöründe Kullanılan İşletme İçi Ergonomik Risk Değerlendirme Metodunun Reba Yöntemi ile Karşılaştırılması** 233-238
Comparison Of in-House Tailored Ergonomic Risk Assessment Method Used in Automotive Industry with Reba Method
Didem Terzi, Güvenç Cengiz
DOI: 10.29137/umagd.1198941
- 22 **Sosyo-Mekânsal Ayrımcılık: Dışlayıcı Mimarlık-Örtük Yaşçılık İlişkisi** 239-247
Socio-Spatial Discrimination: The Relationship of Exclusionary Architecture-Implicit Ageism
Damla Altuncu
DOI: 10.29137/umagd.1201447
- 23 **Radar Teknolojisi ile Hayati Sinyallerin Tespitinde Geç Füzyon Tabanlı Evrışimsel Sinir Ağı Modeli** 248-255
Late Fusion Based Convolutional Network Model in Detection of Vital Signals with Radar Technology
Umut Özkaya
DOI: 10.29137/umagd.1231940
- 24 **Araç lastiklerinde kord-kauçuk kompozit malzemelerin konstrüksiyon yapısının ve lastik davranışına etkisinin incelenmesi** 256-268
Investigation of the construction structure of cord-rubber composite materials and their effects on tire behavior in vehicle tires
Onur Karaçay, Süleyman Kılıç
DOI: 10.29137/umagd.1148611
- 25 **Memristor-Based Hyperchaotic System and DNA Encoding Based Image Encryption Application on LabVIEW** 269-276
Muhammet Emin Şahin
DOI: 10.29137/umagd.1239725
- 26 **Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ile Tek ve Çok Katmanlı Grafen Sentezi ve Karakterizasyonu** 277-285
Synthesis and Characterization of Single and Multilayer Graphene by Chemical Vapor Deposition Method
Erhan Özkan
DOI: 10.29137/umagd.1219958
- 27 **Makine Öğrenmesi İle Ataletsel Navigasyon Sistemlerinde Doğruluğun İyileştirilmesi** 286-296
Improving Accuracy of Inertial Navigation Systems with Machine Learning
Fatih Şahin, Faruk Ulaş
DOI: 10.29137/umagd.1129097
- 28 **Farklı Matrisli Dökme Demirlerde Aşınma Özelliklerinin Gözden Geçirilmesi** 297-311
Review Of Wear Properties In Different Matrix Cast Irons
Ruziye Çankerten, Mehmet Erdoğan
DOI: 10.29137/umagd.1224572
- 29 **Comparison of Regression Algorithms to Predict Average Air Temperature** 312-322
Berke Oğulcan Parlak, Huseyin Ayhan Yavasoglu
DOI: 10.29137/umagd.1232020

- 30 Non-Invasive Bio-Signal Data Classification of Psychiatric Mood Disorders using Modified CNN and VGG16** **323-332**
Ali Berkan Ural
DOI: 10.29137/umagd.1232222
- 31 Comparison of IoT Protocols with OSI and TCP/IP Architecture** **333-343**
Füsun Yavuzer Aslan, Bora Aslan
DOI: 10.29137/umagd.1063036



PV Sistemler için MPPT Kontrol Cihazı Tasarımı ve Karşılaştırılması

Design And Comparison of MPPT Controller for PV Systems

Mustafa Teke¹ , Alaa Shakir Mhmood Al-Arjeeli¹ , Fatih Korkmaz¹ 

¹Çankırı Karatekin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Uluayazı Kampüsü, 18200 Çankırı, Türkiye

Başvuru/Received: 07/05/2022

Kabul / Accepted: 02/08/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 06/10/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Elektrik enerjisi insan hayatında çok önemli ve vazgeçilmez bir unsurdur, bu yüzden elektrik üretimi yollarını bulmak ve kesintiye uğramamak için çalışmalar yapılmalıdır. Elektrik enerjisi üretiminin ana kaynağı fosil yakıtlardır, ancak maliyetlerinin artması ve genel kıtlık ve büyük nüfus artışı ile birlikte teknolojik ilerleme nedeniyle elektrik enerjisi talebindeki artış araştırmacıların yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji üretimine yöneltmektedir. Güneş enerjisi, yenilenebilir çevre dostu enerjinin en önemli kaynaklarından. Ancak güneş enerjisi düşük verimliliğe sahiptir, bu nedenle araştırmacıların verimliliği artırmanın yollarını bulmaları için bir ilgi kaynağı haline gelmiştir. Maksimum Güç Noktası İzleme tekniği, günümüzde fotovoltaik sistemlerin verimliliğini artırmak için kullanılan tekniklerden biri olarak kabul edilmektedir. Araştırmacılar, maksimum güç noktası takibi için MPPT teknolojisinde uygulanacak bir dizi algoritma geliştirmeye ve uygulamaya, farklı ölçüm koşullarında güneş panellerinden maksimum gücü çıkarmaya ve belirli bir seviye sağlamak için bir DC-DC dönüştürücünün görev döngüsünü kontrol etmeye odaklanmaktadır. Bu çalışmada, üç farklı algoritmayı maksimum güç noktası izleme tekniğinde uygulayacağız, bunlar Pertürbasyon ve Gözlem (P&O) algoritması, bulanık mantık denetleyicisi (FLC) algoritması ve parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) algoritmalarıdır. Fotovoltaik sistem tasarımları MATLAB/Simulink kullanılarak simüle edilmiş ve simülasyon sonuçları standart ve değişken test koşulları altında karşılaştırılmıştır. Sonuçta en verimli algoritma parçacık sürüsü optimizasyonu algoritması olmuştur.

Anahtar Kelimeler

"Maksimum güç noktası takibi, Fotovoltaik (PV) sistem, Perturb ve Observe kontrolörü, Bulanık mantık kontrolörü, Parçacık sürüsü optimizasyonu"

Abstract

Electric energy is a very important and indispensable element in human life, so work must be done to develop it and find ways to provide it and not be interrupted or depleted. The main source of electric power generation is fossil fuels, but due to the increase in its costs and general shortage and the increase in demand for electric energy due to large population growth and technological progress, researchers are turning to renewable and sustainable energy. Solar energy is the most important source of renewable and environmentally friendly energy. But solar energy suffers from a problem of low efficiency, so it has become a source of interest for researchers to find ways to increase efficiency. The Maximum Power Point Tracking (MPPT) technique is considered one of the most important techniques used at the present time to increase the efficiency of photovoltaic systems. The researchers focused on developing and implementing a set of algorithms to be applied in MPPT technology for MPP point tracking, extracting the maximum power from solar panels in different measurement conditions, and controlling the duty cycle of a DC-DC converter to provide a certain level of voltage. In this paper, we will develop three different algorithms and apply them in the MPPT technique, they are the Perturbation and Observation (P&O) algorithm, and fuzzy logic controller (FLC) algorithm and particle swarm optimization (PSO) algorithm, The photovoltaic system was simulated using MATLAB/Simulink and the simulation results were compared under standard and variable test conditions. As a result, the most efficient algorithm has been the particle swarm optimization algorithm.

Key Words

"Maximum power point tracking, Photovoltaic (PV) system, Perturb and Observe controller, Fuzzy logic controller, Particle swarm optimization"

1. Introduction

Due to the shortage of fossil fuels, their high prices, and the increasing demand for electrical energy due to population growth and technological progress, researchers and scientists were forced to find new ways to provide electrical energy at the lowest costs, so they focused on renewable energy (such as wind energy, solar energy, etc.) due to its abundance and that it is environmentally friendly and sustainable energy. All of these features, as well as others, drew researchers and scientists to develop them. And figuring out how to get it and keep it stable amid shifting weather circumstances (Abdelaziz and Almoataz, 2020; Abdellatif et al., 2021). Renewable energy sources, such as (Solar energy, Wind energy, Hydro energy, Tidal energy, geothermal energy, Biomass energy), are also environmentally friendly and limitless (Abdelwahab et al., 2020).

Solar energy is the most important source of renewable energy and the most widely used today to generate electrical energy. Electrical energy is obtained by shining sunlight on photovoltaic panels made of semiconductors, which in turn produces electrical energy whose value depends on two main factors, namely, the intensity of solar irradiation and temperature (Abo-Sennah et al., 2021).

Photovoltaic power generation systems suffer from two main problems: The first is the high costs of purchasing and installing panels, batteries, and chargers. The second problem is the low efficiency of photovoltaic energy systems due to their being affected by weather conditions such as (change in the intensity of solar irradiation and temperature change), so the electrical characteristics (I-V and P-V) of photovoltaic (PV) systems are always nonlinear and depend on the intensity of solar irradiation and temperature (Arpacı et al., 2019; Senthilkumar et al., 2022). The sudden unexpected change in atmospheric conditions leads to a change in the efficiency of the photovoltaic system because the solar panels are made of semiconductors that are affected when sunlight falls on them and cause the movement of photons that cause the flow of electric current and are also affected when the temperature changes. This leads to the locations of the maximum power point (MPP) constantly changing with changing weather conditions, causing energy loss and a decrease in the efficiency of the photovoltaic system (Abdelaziz and Almoataz, 2020).

To address the problem of declining solar energy system efficiency, researchers have tended to find ways to increase efficiency by tracking the maximum power point (MPP) that solar panels produce when exposed to solar irradiation. These methods are called Maximum Power Point Tracking (MPPT) (Arpacı et al. 2019; Talbi et al. 2020), several MPPT techniques have been identified in the literature developed by researchers that It is used to increase the output power to the maximum and stabilize the voltage at a certain level. And control the duty cycle of the boost converter (Mao et al.,2020). Including traditional methods such as the Perturb and Observe (P&O) algorithm and the Incremental conductance (IC) algorithm (Abo-Sennah et al. 2021; Ronilaya et al. 2018; Mohamed and Sattar, 2019). These algorithms are simple to implement and do not require knowledge of the photovoltaic generator's characteristics, so they work independently, and their efficiency is good under test conditions stable. However, when the weather conditions (solar irradiation intensity and temperature) change, the algorithm begins to oscillate around the MPP point and is unable to track the MPPT, reducing the overall system's efficiency (Talbi et al., 2021). Artificial intelligence algorithms, such as the fuzzy logic controller (FLC) and artificial neural network (ANN) algorithms, are the second class of algorithms (Abdelaziz and Almoataz, 2020). The maximum power point is accurately monitored in stable and variable atmospheric conditions, but it is more sophisticated than earlier traditional methods, where these algorithms are characterized by their high efficiency and high response speed (Sennah et al., 2021; Ali et al.,2021). The optimization algorithms (Cuckoo search (CS), Ant colony optimization (ACO), and Particle swarm optimization (PSO) algorithms) are the third type of algorithm used in MPPT technology. This type of modern algorithm is characterized by rapid convergence and high accuracy, especially under volatile weather conditions, which improves the efficiency of the photovoltaic system (Zafar et al., 2020; Chao et al., 2021).

In this study, the MPPT technology will be developed by developing three algorithms that will be used: the Perturb and Observe (P&O) algorithm, the fuzzy logic controller (FLC) algorithm, and the particle swarm optimization (PSO) algorithm to increase the efficiency of the photovoltaic system by extracting the maximum power From solar panels, MPP point tracking and control of the output voltage in various test conditions (standard and variable), as well as control of the duty cycle of the DC-DC boost converter. The photovoltaic system was simulated using the MATLAB / Simulink environment, and through the simulation results, the results of the three algorithms will be compared under standard and variable test conditions (intensity of solar irradiation change and temperature change), To determine the best algorithm in response speed, extract the maximum power, and control the duty cycle of the converter to produce a specific voltage level. A 1Soltech 1STH-215-P solar panel, consisting of one cell connected in parallel and one in series, is used in this study as the model used in the simulation. The electrical elements that go into building a DC-DC boost converter are designed based on the voltage required to be prepared for the load (40 volts) and using the theoretical values for voltage, current, and power given by the solar panel mentioned (Nkambule et al.,2019; Hekss et al.,2019). Algorithms will be simulated under standard test conditions ($\text{irr}=1000\text{w/m}^2$ and $\text{tem}=250\text{c}$) and measure the voltage, current, and power extracted from the solar panel and compared with the characteristics of the electrical panel to calculate the efficiency, then measure the current, voltage, and power out of the photovoltaic system and compare it with the values extracted from the solar panel to calculate. The efficiency of each algorithm and finally calculate the voltage provided by the boosting converter and compare it with the required voltage (40 volts) to calculate the efficiency of the transform to determine the best algorithm in performance and increase the efficiency of the photovoltaic system. The same calculations will be repeated, but with different test conditions (change of solar irradiation intensity and temperature change).

2. Materials and Method

2.1. Mathematical Model and Equivalent Circuit for a PV Cell

Sunlight is converted into power by a photovoltaic module. To put it another way, when a PV module is exposed to sunlight, it generates a direct current that is free of noise and pollution. Photovoltaic cells are connected in series and/or parallel in solar modules. These cells are essentially photosensitive P-N junction semiconductor diodes (Senthilkumar et al., 2022). PV modules can be joined together in series or parallel to form PV arrays (Abdelaziz and Almoataz, 2020). Single-diode and two-diode models are two types of equivalent circuits often used to simulate a PV cell. Single diode, double diode, vulture, and other models are available.

A large number of comparable circuits are being developed. The two-diode equivalent circuit has a more intricate construction and exhibits more nonlinear properties than the single-diode equivalent circuit. As a result, two-diode units are rarely employed. The single-cell circuit model is the most common since it delivers real results. In this study, the single-diode equivalent circuit model was used (Mars et al., 2017). The photovoltaic cell is represented in the equivalent circuit shown in figure 1.

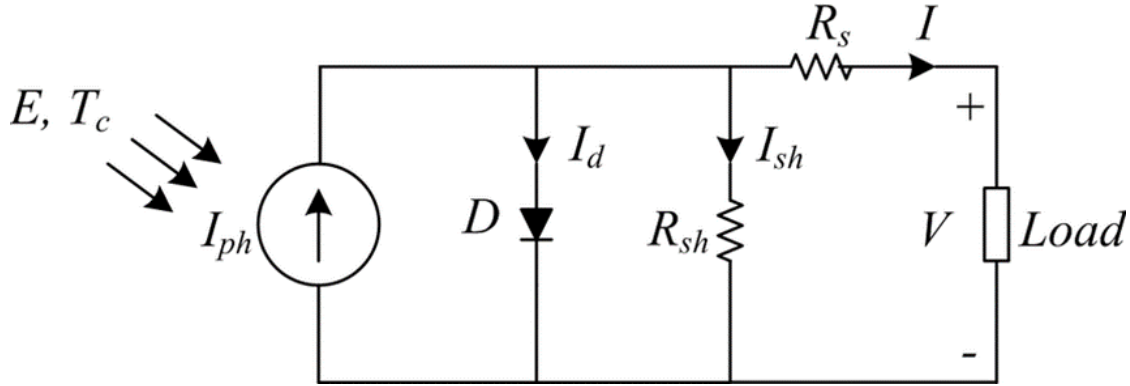


Figure 1. Equivalent circuit of a photovoltaic (Said and Latief, 2018).

The equations that define the PV module model are as follows (Mars et al., 2017; Said and Latief, 2018):

$$I = I_{ph} * N_p - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

Module photo-current was rated as follows:

$$I_{ph} = G_k [I_{sc} + K_I (T - T_{ref})] \quad (2)$$

The equation for the shunt current is as follows:

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} * R_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

The equation for calculating the dark current I_d is as follows:

$$I_d = I_s \left[\exp \left(q \frac{V_{pv} + R_s * I_{pv}}{N_s * V_t} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

The following equation describes how the reserved saturation current varies with temperature:

$$I_s = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 * e^{\left[\frac{qEg}{nk} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right]} \quad (5)$$

Finally, the total current can be calculated using the following formula:

$$I = N_p * I_{ph} - N_p * I_s \left[\exp \left(\frac{q * V_{pv} + R_s * I_{pv}}{N_s * V_t} \right) - 1 \right] - N_p \frac{V_{pv} + I_{pv} * R_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

When the values of the resistors

$$R_s = 0 \quad \text{and} \quad R_{sh} = \infty$$

The previous equation will become as follows:-

$$I = N_p * I_{ph} - N_p * I_s \left[\exp \left(\frac{A * V_{pv}}{N_s * n} \right) - 1 \right] \quad (7)$$

Table 1 shows the equation terminology.

Table 1. Equation Terminology

V	PV cell output voltage [V].	A	Ideality factor.
I	PV cell output current [A].	T	Cell temperature [Kelvin].
N_s	The number of modules are connected in a series.	q	The electron charge constant (1.602×10^{-19} C)
N_p	The number of modules are connected in parallel.	T_{ref}	Reference temperature [Kelvin].
I_{ph}	Current generated by light in a PV cell [A].	I_{sc}	PV cell short-circuits current at 25°C and $1000[\text{w}/\text{m}^2]$.
I_s	Saturation current in PV cells [A].	R_{sh}	Shunt resistance of a PV cell [Ω].
R_s	The series resistance of a PV cell [Ω].	E_g	The band gap for silicon [eV].

2.2. Curves of Characteristics for PV Systems

To get the best photovoltaic cell efficiency, you need to study and understand its properties, which are mostly affected by solar radiation intensity and temperature. The voltage-current (V-I) and power-voltage (P-V) characteristics must be stated as a result. Because it is difficult to predict changing weather conditions and study their properties, all photovoltaic cell manufacturers use standard conditions when manufacturing them for solar irradiation intensity and temperature ($\text{temp} = 25^\circ\text{C}$ and $\text{irr} = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$) (Al-Majidi et al., 2018). In this study, 1Soltech 1STH-215-P solar cell was used, whose electrical characteristics are shown in Table 2.

Table 2. Trina Solar 1Soltech 1STH-215-P Module Parameters

Maximum Power (W)	213.15
Open Circuit Voltage (V_{OC})	36.3
The voltage at maximum power point (V_{MPP})	29
Temperature coefficient of V_{OC} (%/deg.C)	-0.36099
Cells per module (N_{cell})	60
Short-circuit current I_{SC} (A)	7.84
Current at maximum power point (I_{MP})	7.35
Temperature coefficient of I_{SC} (%/deg.C)	0.102
Light-generated current I_L (A)	7.8649
Diode Saturation Current I_o (A)	2.9259×10^{-10}
Diode ideality factor	0.98117
Shunt resistance R_{sh} (ohm)	313.3991
Series resistance R_s (ohm)	0.39383

Using the equivalent circuit model of a photovoltaic cell whose type and mathematical equations were mentioned earlier, and whose electrical specifications are given in Table 1, we can plot the characteristic curves of current-voltage (I-V) and power-voltage (P-V) according to standard test conditions (STC). Where the MATLAB/Simulink environment is adopted to simulate the equivalent circuit of a photovoltaic cell and plot its electrical characteristics under standard test conditions and variable test conditions (solar irradiation intensity and temperatures) (Said and Latief, 2018). As shown in Figures 2, 3, and 4 respectively (Al-Ghezi et al., 2022).

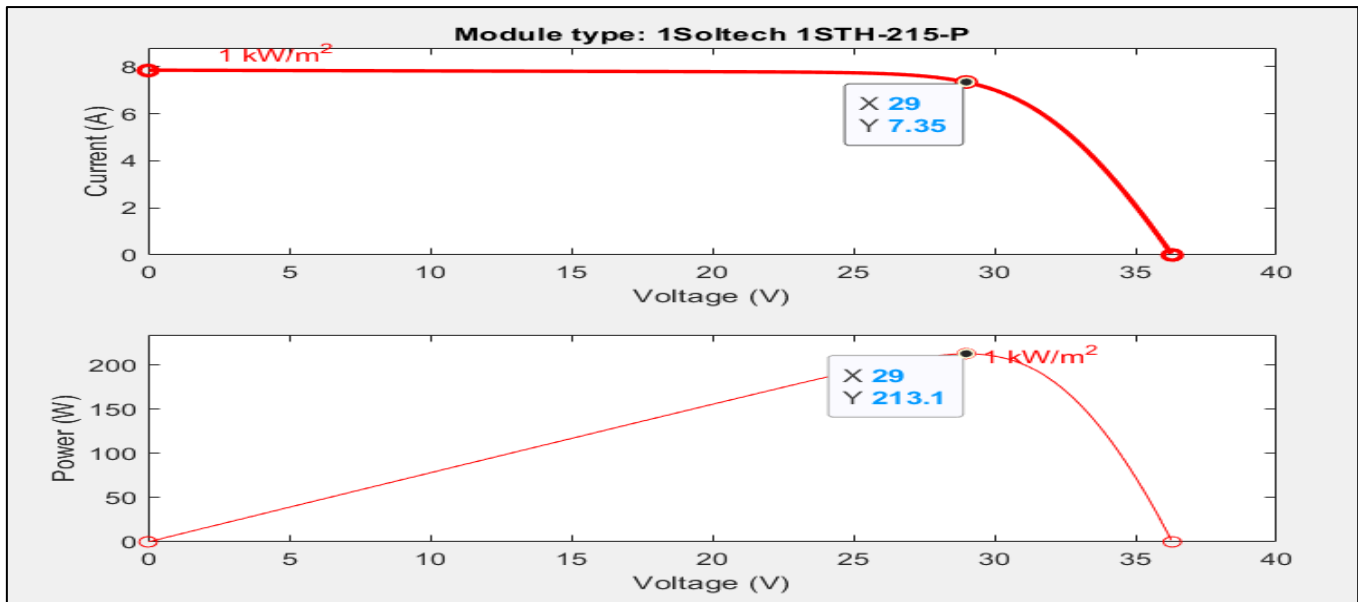


Figure 2. Under STC conditions, a PV module's I-V and P-V characteristics.

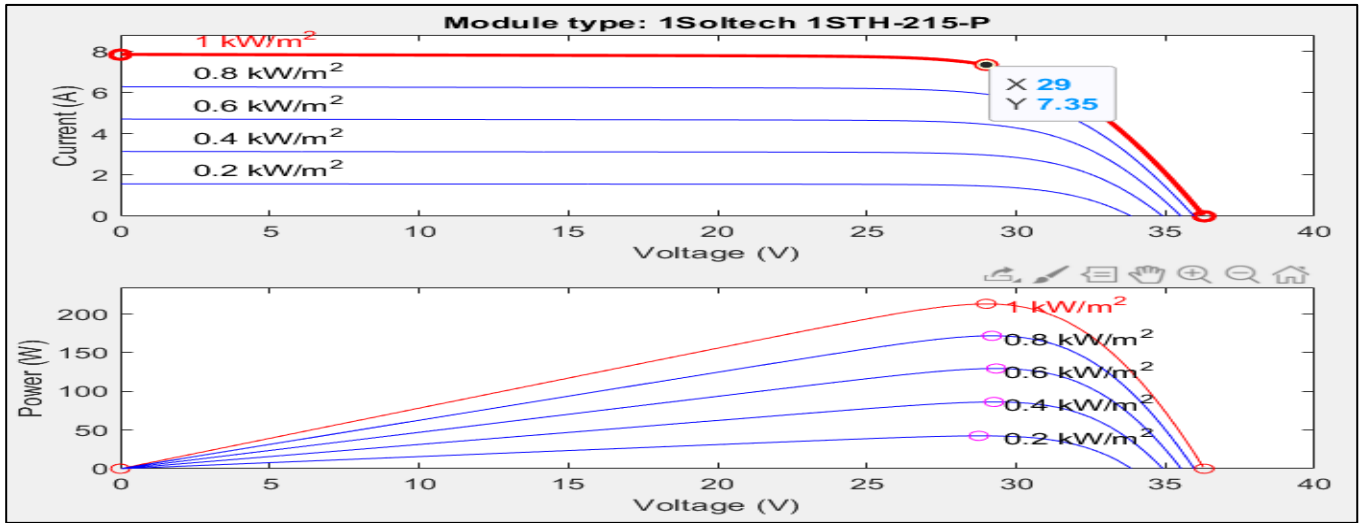


Figure 3. Characteristics curves (I-V & P-V) of the photovoltaic panel when the irradiation intensity changes.

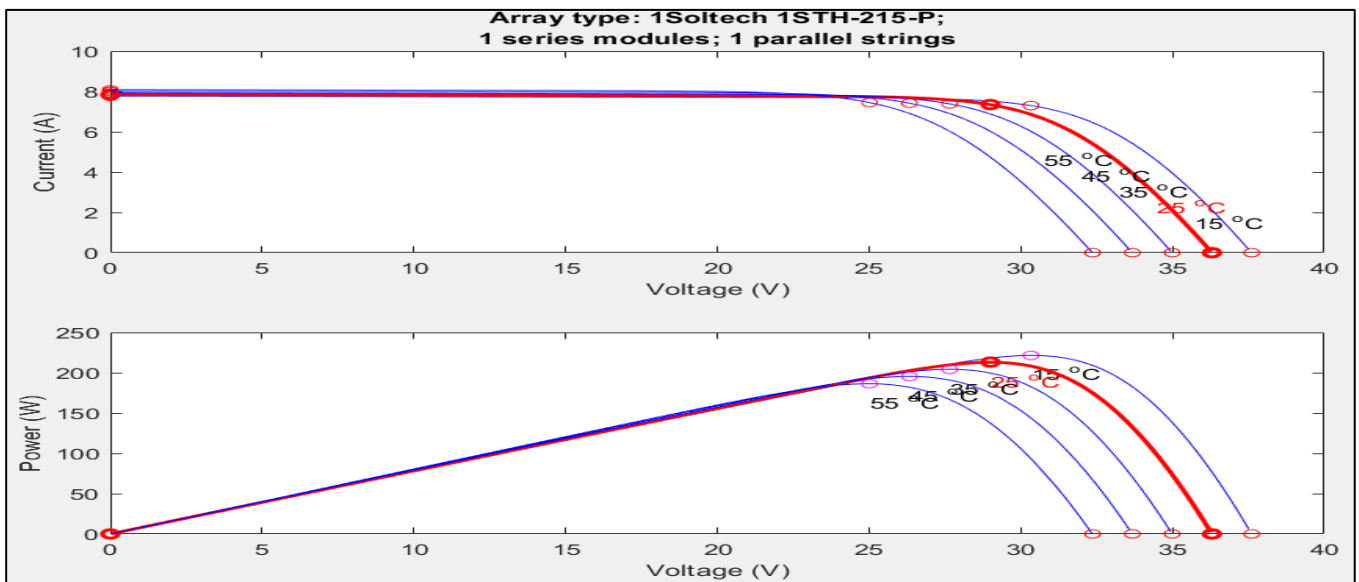


Figure 4. Characteristics curves (I-V & P-V) of the photovoltaic panel when temperature change.

3. Maximum Power Point Tracking

Since the output characteristics of the photovoltaic system are not linear and vary with different weather conditions (intensity of solar radiation and temperature), which makes the efficiency of photovoltaic systems low, so the researchers took care of this problem and developed several techniques in order to extract the maximum power from the solar panel and to obtain the maximum power point MPP to increase system efficiency. Figure 5 shows the I-V characteristics of MPPT (Szczepaniak et al., 2021).

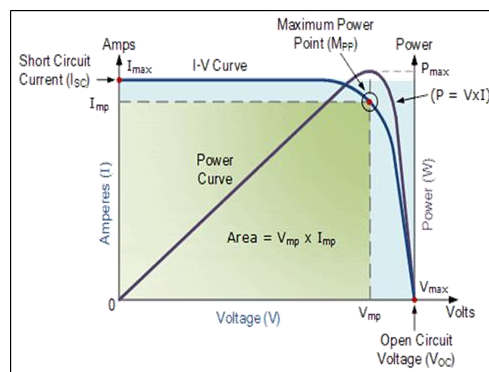


Figure 5. The I-V characteristics of MPPT (Anowar and Roy, 2019).

The Maximum Power Point Tracking (MPPT) technology is one of the most widely used and advanced technologies in PV applications (Acharya and Aithal, 2020). The application of MPPT technology increases the efficiency of the photovoltaic system by 20% to 40% under Standard Test Conditions (STC) and low temperatures, In the literature, many algorithms have been developed in order to improve the efficiency of photovoltaic systems. In this study, we will develop and simulate three algorithms for their application in MPPT technology.

4. Maximum Power Point Tracking Algorithms

Researchers and scientists have been developing, discovering, and publishing several MPPT technology algorithms over the past years, to find the maximum power point (MPP). The differences between the technologies used are identified at many points such as the required current and voltage sensors, their effectiveness, their efficiency, the complexity of their form, their cost, the speed of convergence, the correct tracking when the radiation intensity is variable, and/or the temperature, and the devices needed to install and implement them, Among many other things. Pilakkat et al. (2020) and TIRTH et al. (2020) provide comprehensive reviews of a wide range of MPPT algorithms. Bollipo et al. (2020) figure 6 shows the most frequent algorithm strategies. The three main types of algorithms are traditional algorithms, artificial intelligence algorithms, and optimization algorithms (Bollipo et al., 2020).

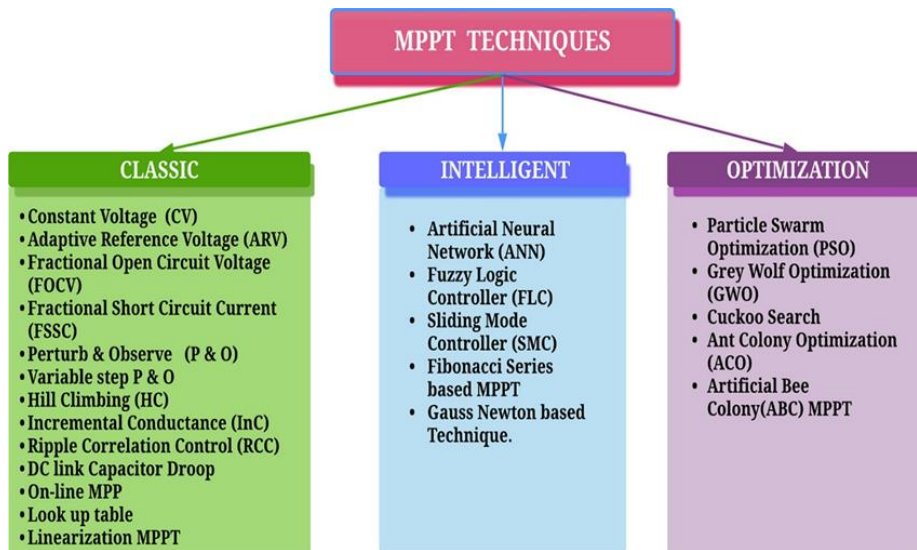


Figure 6. Classification of MPPT technique (Bollipo et al., 2020).

In this study, three algorithms will be developed and implemented: the Perturb and Observe (P&O) algorithm, the fuzzy logic controller (FLC) algorithm, and finally the particle swarm optimization (PSO) algorithm.

4.1. Perturb and observe (P&O)

The P&O algorithm is one of the most popular and widely used MPPT techniques due to its simplicity, ease of use, low costs, and simple results, especially under stable conditions (Abdelwahab et al., 2020). P&O works by gradually raising the perturbation of the panel's operational voltage, allowing the power output to be recorded and compared over time. When the operational point is located to the left of the MPP, the P&O method works by increasing the voltage, which causes the power output to rise, as shown in Figure 7.

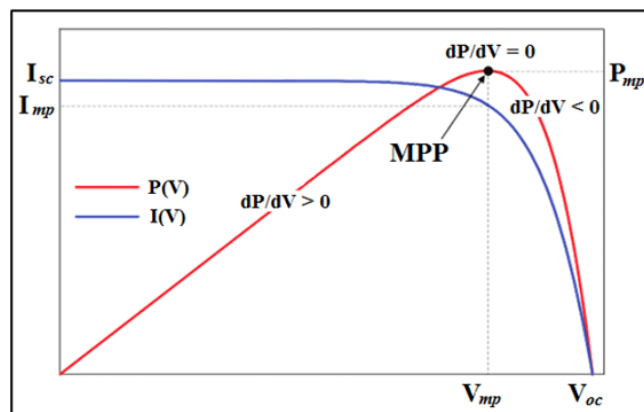


Figure 7. The Perturb and observe method's P-V curve.

If the power differential is positive, more disturbance in the same direction is applied to the working voltage, and the output power is measured again. The process of perturbation continues until the energy difference is negative. As a result, the operating voltage's disturbance direction must be reversed. When the operating point of the P&O is to the right of the MPP, the voltage is reduced, the power output is increased, and the P&O operates in the opposite direction (Kamran et al., 2020).

The equations below show the mathematical relationships of a technique for the P&O algorithm.

$$\diamond \frac{dP}{dV} = 0 \text{ at the MPP} \tag{8}$$

$$\diamond \frac{dP}{dV} > 0 \text{ at the left side of MPP} \tag{9}$$

$$\diamond \frac{dP}{dV} < 0 \text{ at the right side of MPP} \tag{10}$$

4.2. Fuzzy Logic Control(FLC)

One of the types of artificial intelligence techniques and the most used in recent years is the fuzzy logic (FLC) algorithm. Fuzzy logic is based on the idea that human decision-making is more than just "ones and zeros" or "yes-no." The fuzzy control rules are basically IF-THEN rules. In solar systems with non-linear features, MPPT technology based on the fuzzy logic control (FLC) algorithm is used. Because the FLC algorithm does not require the usage of complex mathematical models or system parameters, it is very efficient. As a result of this characteristic, FLC-based MPPT point tracking and charge control technologies have become one of the most widely used MPPT technologies. Fuzzification, inference system, and defuzzification are the primary components of Fuzzy Logic Controller (FLC) for MPPT Technologies (Alshareef, 2021; Abdellatif et al., 2021). Figure 8 shows the most important parts of the fuzzy logic control (FLC) algorithm.

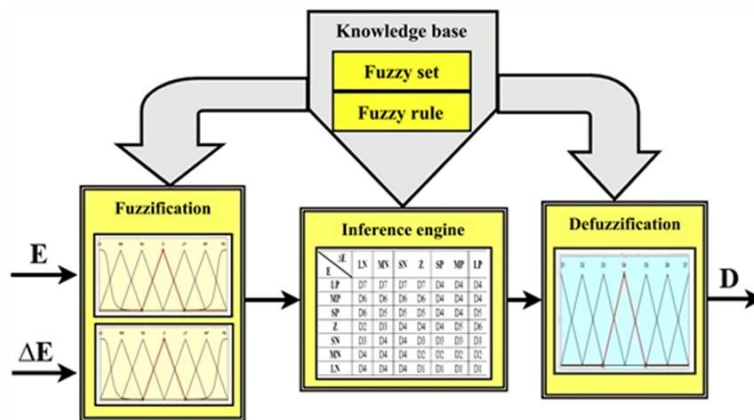


Figure 8. Illustrates the structure of an FLC (Baramadeh et al., 2021).

Fuzzy logic systems reach their maximum power point faster during load or under changing atmospheric conditions due to the soft calculation features of fuzzy logic. Fuzzy Logic based on MPPT systems works without oscillation or at a low level after achieving their maximum power.

- Fuzzification: It is the process of converting crisp values into fuzzy sets, and it is called membership functions.
- The rule-base is made up of a series of If-Then rules that regulate the controller. The number of rules is proportional to the number of input membership functions that are employed. Each input contains seven membership functions in this study, resulting in 49 rules as indicated in Table 3.
- Defuzzification: It is the process of fuzzy data into deterministic data.

Table 3. Fuzzy logic rules.

ΔI	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PB	PB	PB	PM
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

The fuzzy inputs are designed for "voltage change" and "change in current", the output from the fuzzy logic controller is the change in duty cycle (D), as shown in Figure 9 (Baramadeh et al., 2021).

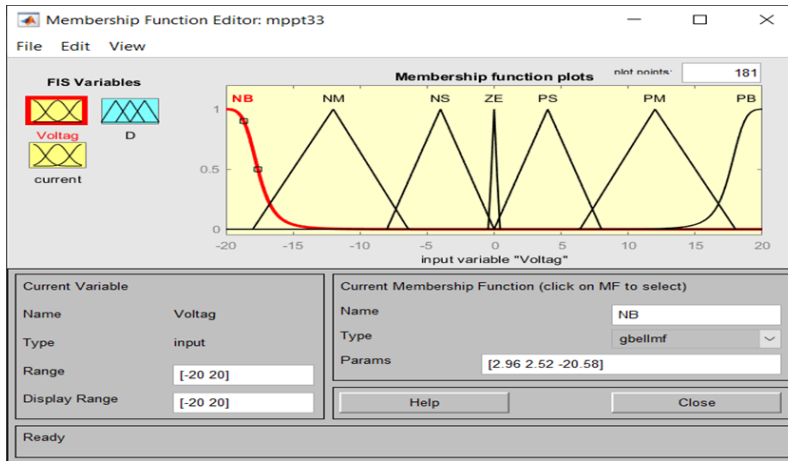


Figure 9. The membership functions editor's interface

4.3. Particle swarm optimization (PSO)

PSO is an optimization method based on the social behavior of birds or fish swarms. The PSO algorithm is based on the individual and herds social behavior of the organism (swarm). Due to its simple algorithm structures and fast convergence rates controlled by only a few parameters, this population-based optimization (PSO) method is frequently used by academic and industry researchers (Putri et al., 2019; Hu et al., 2019). Figure 10 shows the flowchart of the PSO algorithm design technique.

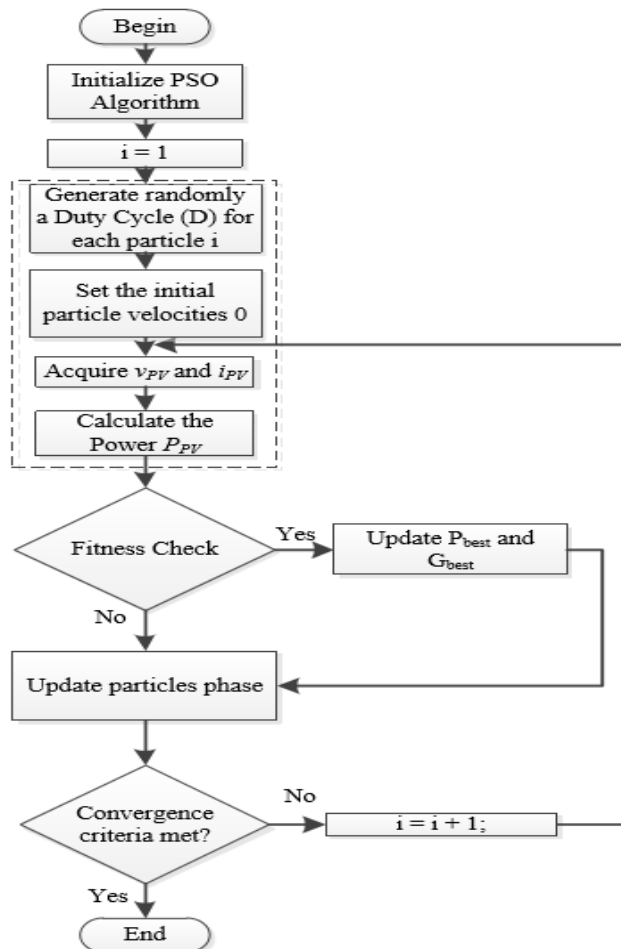


Figure 10. PSO algorithm flowchart(Rocha et al., 2019).

5. DC-DC Converters

Solar energy systems are not ideal for generating consistent power because they are strongly influenced by weather conditions. As a result, even if the maximum power point (MPP) is attained from photovoltaic panels, it is extremely difficult to transfer the maximum power generated by them straight to the loads on a continuous basis. Because the PV system is impacted by the intensity of sunlight and the temperature, the load curve must be adjusted in response to weather variations (Irwanto et al., 2020; Palanisamy et al., 2019). We can achieve this by adding an electronic system whose location is between the solar panels and the load. The duty cycle of the converter is controlled through MPPT technology to control the level of voltage to be output (Prabhu and Babu, 2021). In this study, a DC-DC boost converter will be used, as this converter has the advantage of raising the input voltage and outputting a higher voltage as needed. Figure 11 shows the electrical elements that make up the converter, whose values will be designed based on the data of the solar cell and the voltage required to be supplied to the load.

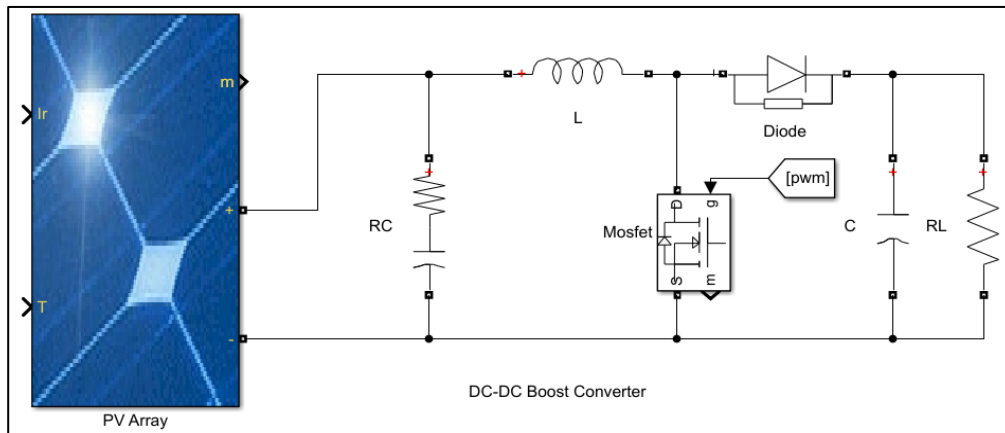


Figure 11. Simulink model of the DC-DC boost converter.

6. Design of MPPT Based on Several Algorithms Using MATLAB / Simulink

In this section, the photovoltaic system consisting of three main parts is simulated (solar panel, MPPT technology, DC-DC boost converter) with the application of three different algorithms (P&O, FLC, PSO) and tested under standard conditions (STC) and variable (change of irradiation intensity and temperature) using MATLAB/Simulink. Figures 12, 13, and 14 represent the simulation results for the signals (voltage, current, power) entering and leaving the photovoltaic system after processing and extracting the maximum power using MPPT technology based on three advanced algorithms (P&O, FLC, PSO), where it can be observed the difference between the signal In and out in terms of oscillation processing around MPP for comparison of algorithms.

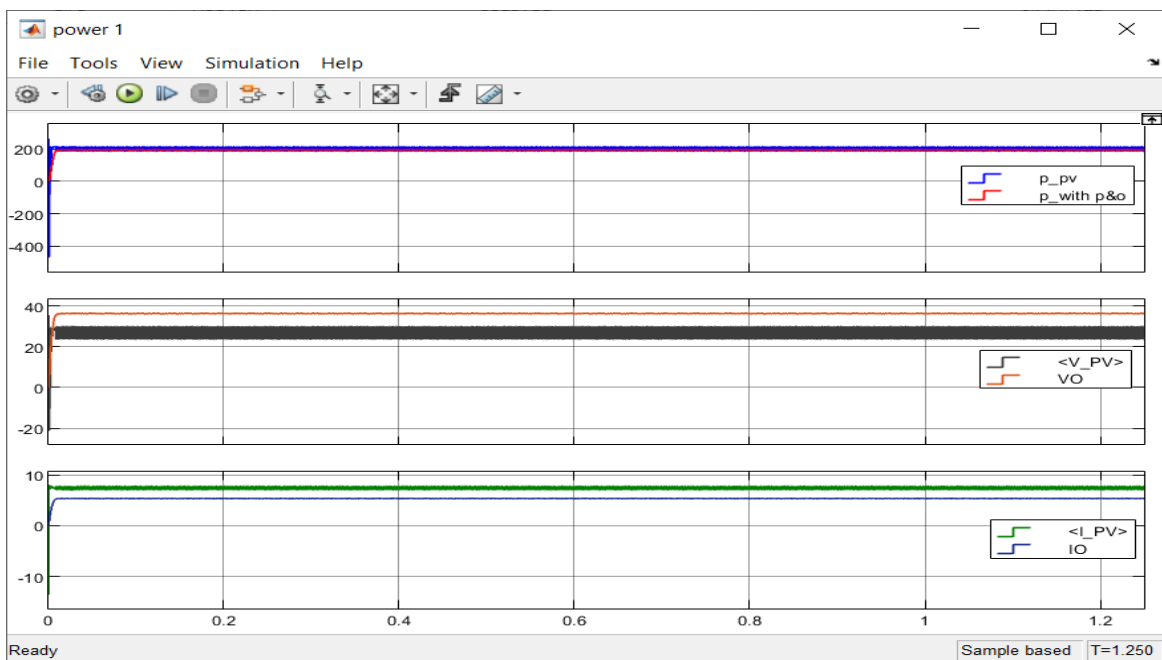


Figure 12a. Simulation of the (P&O) algorithm under standard test conditions.

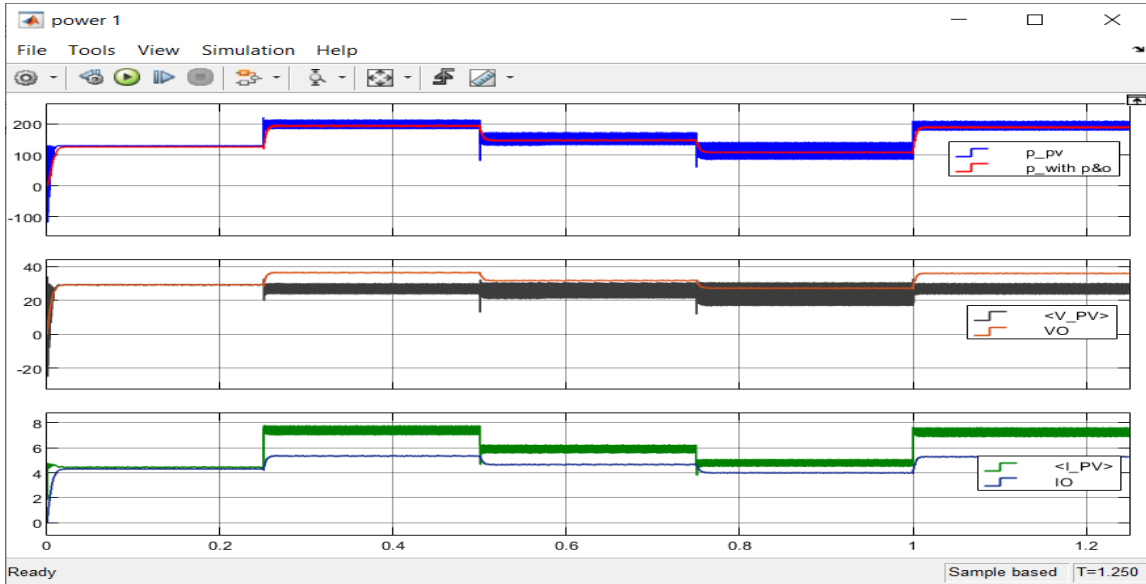


Figure 12b. Simulation of (P&O) algorithm when irradiation intensity changes.

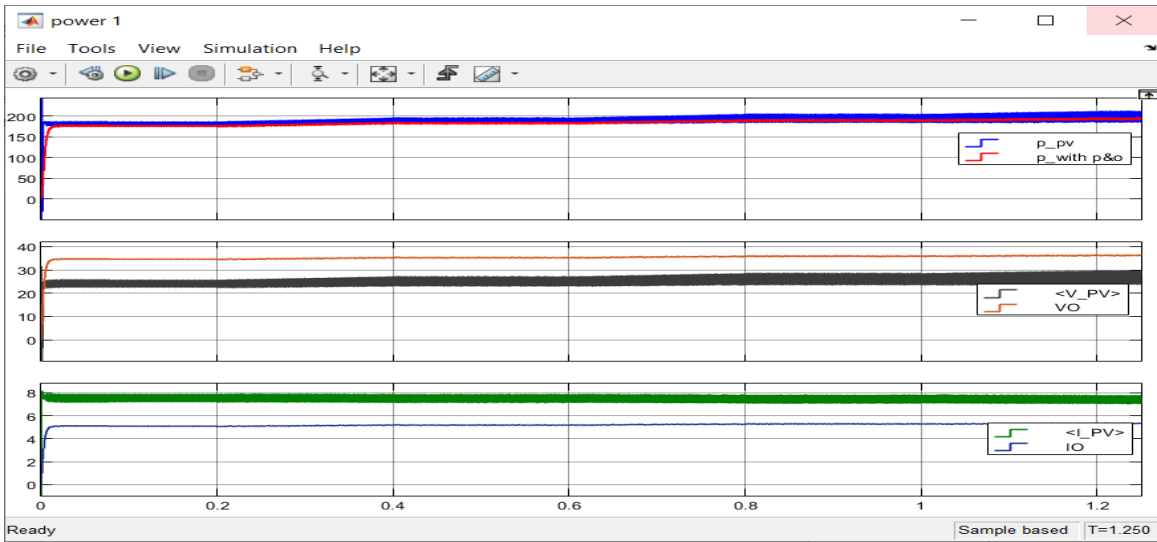


Figure 12c. Simulation of the (P&O) algorithm when the temperature changes

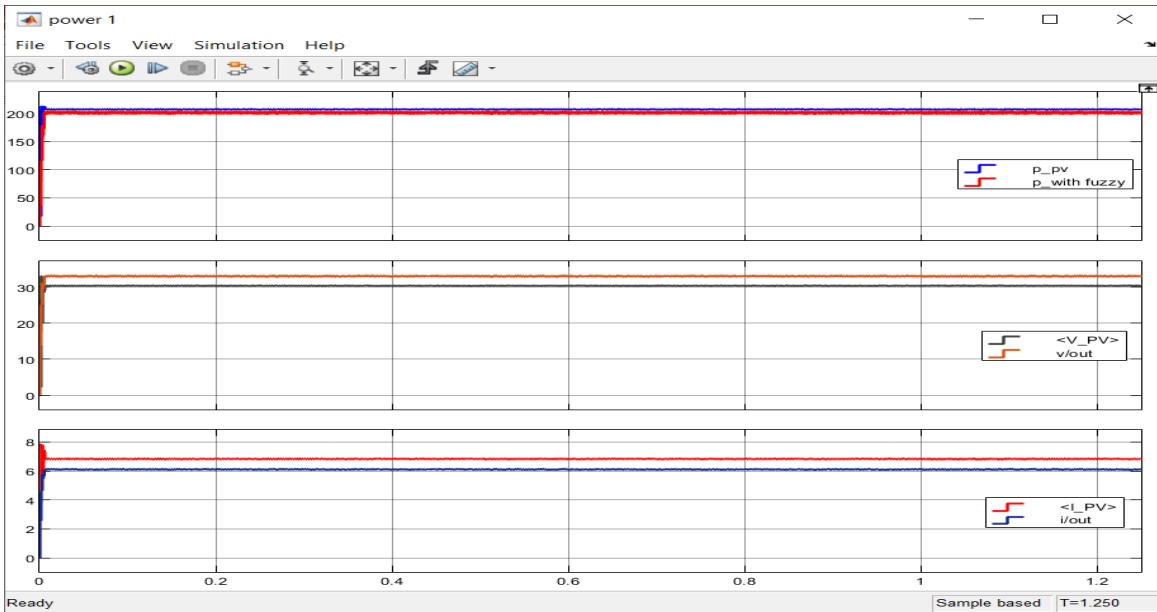


Figure 13a. Simulation of the (FLC) algorithm under standard test conditions.

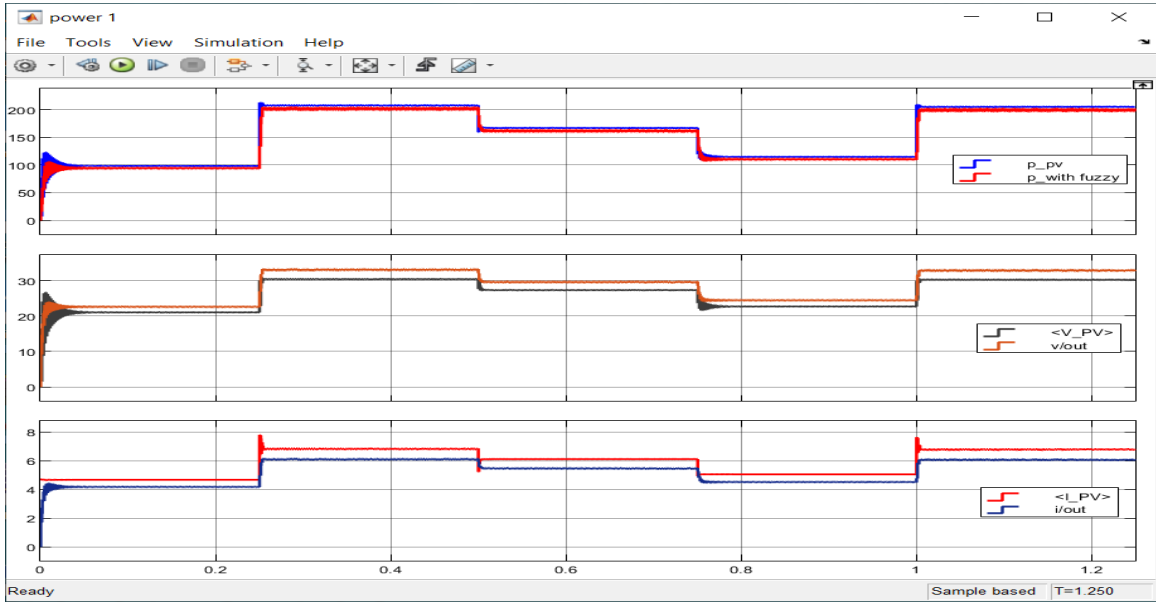


Figure 13b. Simulation of (FLC) algorithm when irradiation intensity changes.

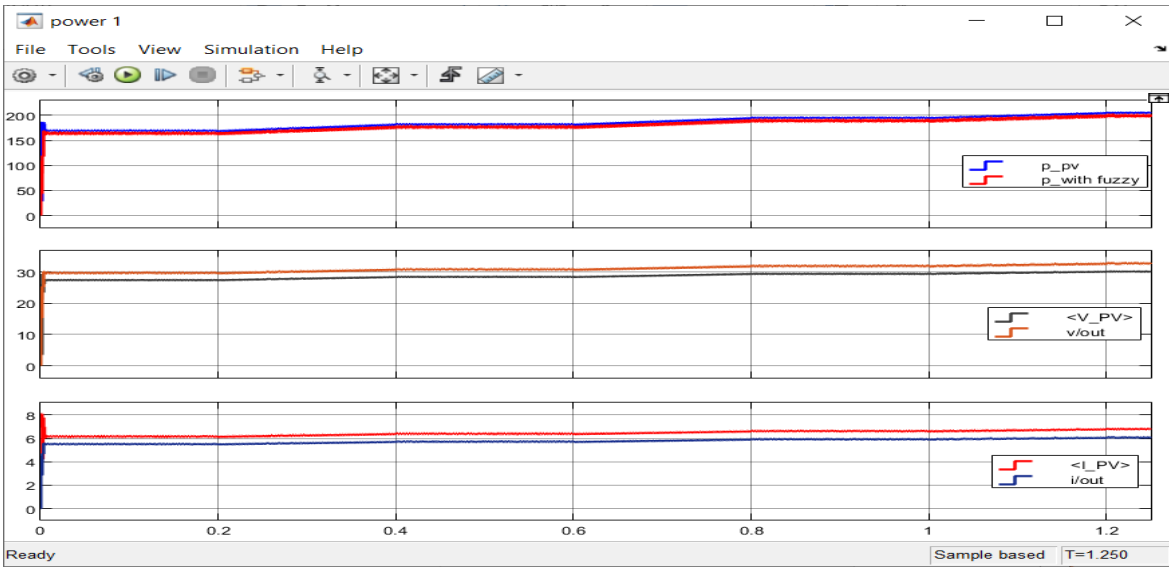


Figure 13c. Simulation of the (FLC) algorithm when the temperature changes.

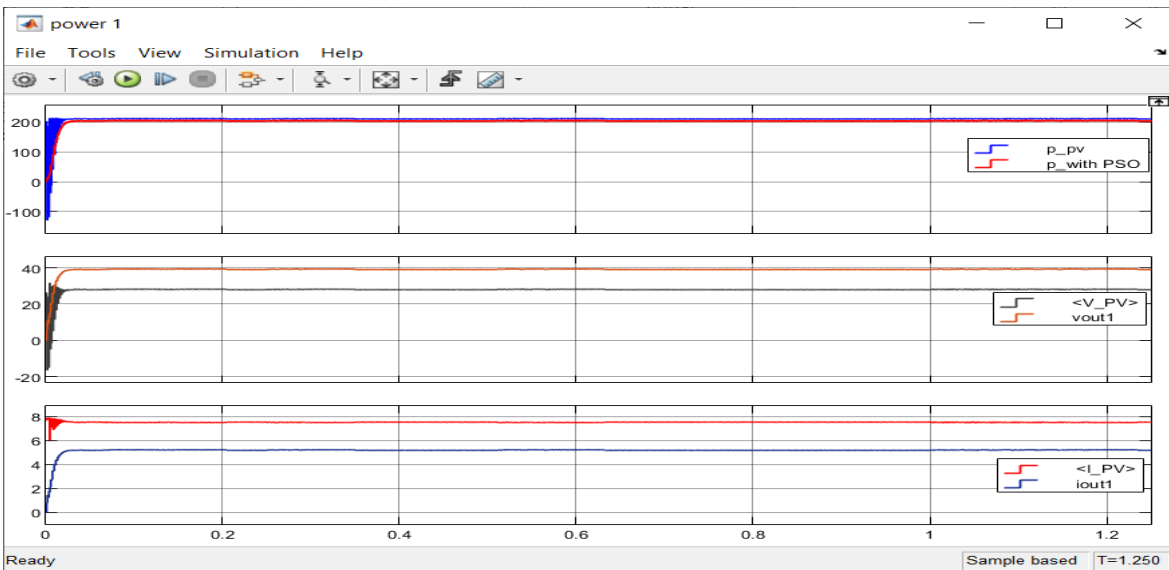


Figure 14a. Simulation of the (PSO) algorithm under standard test conditions.

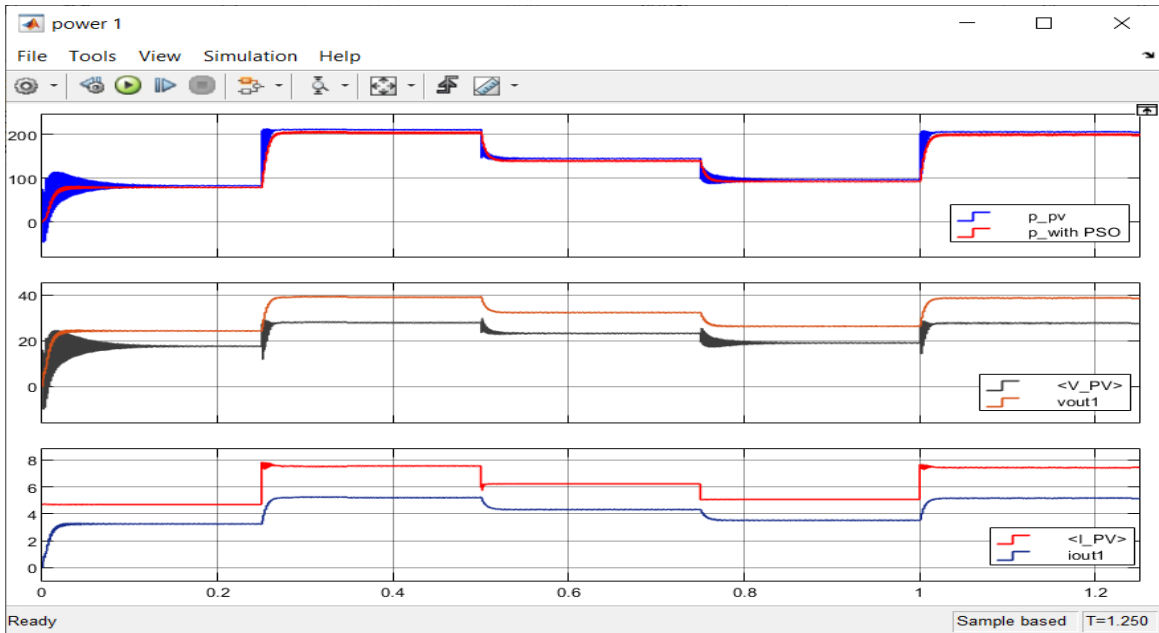


Figure 14b. Simulation of (PSO) algorithm when irradiation intensity changes

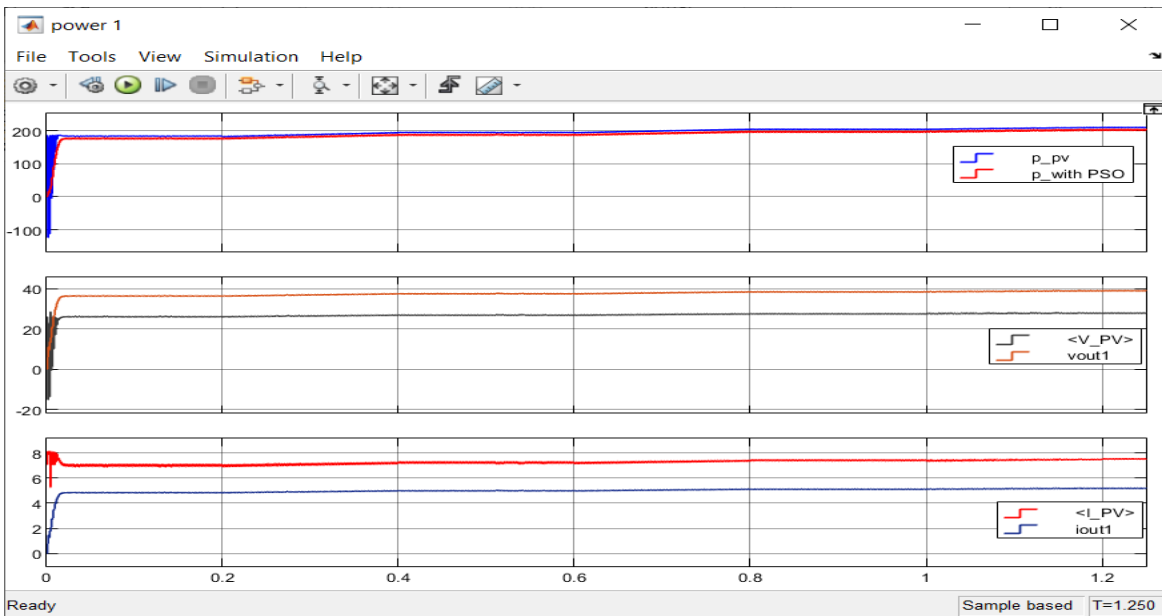


Figure 14c. Simulation of the (PSO) algorithm when the temperature changes.

7. Results and Discussion

Table 4 shows the results of simulation of the photovoltaic system based on three algorithms (P&O, FLC, PSO) under standard test conditions and others in which (irradiation intensity, temperature) change at a time when the efficiency was calculated in two locations, the first is the efficiency of extracting the maximum power from the solar panel and the second is the output efficiency of The maximum power when applying MPPT technology. The efficiency was calculated in order to compare the three algorithms and determine the best algorithm in extracting the maximum power, tracking the MPP point, reducing oscillation around it, and controlling the duty cycle of the boost converter. Through the simulation results, we note that the algorithms (P&O, FLC, PSO) that were developed and implemented in MPPT technology work very well and with very high performance, but there are simple differences that distinguish one from the other. We note the performance and efficiency of the (PSO) algorithm that is the best and the most efficient in extracting the maximum power and tracking the MPP point perfectly with the least swing around it, and controlling the duty cycle of the DC-DC boost converter perfectly to supply voltage to the load. Where the (PSO) algorithm achieved an efficiency of (99.22%), while the (FLC) algorithm achieved an efficiency of (98.56%), and finally the (P&O) algorithm achieved an efficiency of (96.64%) in the standard test conditions. Also, the (PSO) algorithm achieved the highest efficiency (98.65%) when changing weather conditions compared to the

two algorithms (P&O, FLC). It also achieved the highest voltage (39.38 volts) at the output of the photovoltaic system by controlling the duty cycle of the boost converter.

Table 4. Photovoltaic system simulation results

Test Conditions	Algorithms	$P_{I/P}$ (W)	$V_{I/P}$ (V)	$I_{I/P}$ (A)	Efficiency	$P_{O/P}$ (W)	$V_{O/P}$ (V)	$I_{O/P}$ (A)	MPPT
					Extracting Power				Technology Efficiency
Irradiation 1000W/m ² , Temp=25°C	P&O	206	26.89	6.934	96.64%	196	36.49	5.37	95.14%
	FLC	210.1	30.05	6.914	98.56%	204.6	33.26	6.152	97.38%
	PSO	211.5	28.14	6.763	99.22%	206.6	39.38	5.246	97.68%
Irradiation Intensity Change	P&O	201.2	26.8	8.394	96.31%	186.7	35.62	5.242	92.79%
	FLC	205.7	29.95	6.869	98.46%	200.3	33.01	6.067	97.37%
	PSO	206.1	27.77	6.673	98.65%	201.2	38.86	5.177	97.62%
Temperature Change	P&O	199.2	25.82	8.423	94.31%	190.6	35.99	5.296	95.68%
	FLC	207.8	29.88	6.875	98.39%	202.3	33.07	6.117	97.35%
	PSO	210.4	28.06	6.745	99.62%	205.5	39.28	5.232	97.67%

8. Conclusion

In this paper, three algorithms (P&O, FLC, and PSO) were developed and implemented in order to track the maximum power point and extract the maximum power from the photovoltaic system in various measurement conditions, and the simulation results were very satisfactory. Through the simulation results, it was found that the (PSO) algorithm has achieved the best performance and the highest efficiency (99.22%) by extracting the maximum energy from the solar panel and controlling the duty cycle of the booster transformer to produce an electrical voltage (39.38 volts), which is very close to the required voltage.

9. References

- Abdelaziz, A. Y., & Almoataz, Y. (2020). Modern maximum power point tracking techniques for photovoltaic energy systems. Springer Nature Switzerland AG.
- Abdellatif, W. S., Mohamed, M. S., Barakat, S., & Brisha, A. (2021). A Fuzzy Logic Controller Based MPPT Technique for Photovoltaic Generation System. *International Journal on Electrical Engineering & Informatics*, 13(2).
- Abdelwahab, S. A. M., Hamada, A. M., & Abdellatif, W. S. (2020). Comparative analysis of the modified perturb & observe with different MPPT techniques for PV grid connected systems. *International journal of renewable energy Research*, 10(1), 55-164.
- Abo-Sennah, M. A., El-Dabah, M. A., & Mansour, A. E. B. (2021). Maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems: a comparative study. *International Journal of Electrical & Computer Engineering* (2088-8708), 11(1).
- Acharya, P. S., & Aithal, P. S. (2020, December). A Comparative Study of MPPT and PWM Solar Charge Controllers and their Integrated System. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1712, No. 1, p. 012023). IOP Publishing.
- Ali, M. N., Mahmoud, K., Lehtonen, M., & Darwish, M. M. (2021). Promising MPPT Methods Combining Metaheuristic, Fuzzy-Logic and ANN Techniques for Grid-Connected Photovoltaic. *Sensors*, 21(4), 1244.
- Alshareef, M. (2021). An Improved MPPT Method Based on Fuzzy Logic Controller for a PV System. *Studies in Informatics and Control*, 30(1), 89-98.
- Al-Ghezi, M. K., Ahmed, R. T., & Chaichan, M. T. (2022). The Influence of Temperature and Irradiance on Performance of the photovoltaic panel in the Middle of Iraq. *International Journal of Renewable Energy Development*, 11(2), 501-513.
- Al-Majidi, S. D., Abbod, M. F., & Al-Raweshidy, H. S. (2018). A novel maximum power point tracking technique based on fuzzy logic for photovoltaic systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(31), 14158-14171.
- Al-Rubaye, M. J. M., Gino Morais Araujo, V., Kadhim Abed, J., & Van den Bossche, A. (2018). Review different types of MPPT techniques for photovoltaic systems. In *International Conference on Sustainable Energy and Environment Sensing (SEES 2018)*.
- Anowar, M. H., & Roy, P. (2019, February). A modified incremental conductance based photovoltaic MPPT charge controller. In *2019 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)* (pp. 1-5). IEEE.

- Arpaci, G. N., Taplamacioglu, M. C., & Gözde, H. (2019). Design and Comparison of Perturb & Observe and Fuzzy Logic Controller in Maximum Power Point Tracking System for PV System by Using MATLAB/Simulink. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 3(1), 66-71.
- Baramadeh, M. Y., Abouelela, M. A. A., & Alghuwainem, S. M. (2021). Maximum Power Point Tracker Controller Using Fuzzy Logic Control with Battery Load for Photovoltaics Systems. *Smart Grid and Renewable Energy*, 12(10), 163-181.
- Bollipo, R. B., Mikkili, S., & Bonthagorla, P. K. (2020). Critical review on PV MPPT techniques: classical, intelligent and optimisation. *IET Renewable Power Generation*, 14(9), 1433-1452.
- Bollipo, R. B., Mikkili, S., & Bonthagorla, P. K. (2020). Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: A review. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7(1), 9-33.
- Chao, K. H., & Rizal, M. N. (2021). A hybrid MPPT controller based on the genetic algorithm and ant colony optimization for photovoltaic systems under partially shaded conditions. *Energies*, 14(10), 2902.
- Hekss, Z., Abouloifa, A., Echalih, S., & Lachkar, I. (2019, April). Cascade nonlinear control of photovoltaic system connected to single phase half bridge shunt active power filter. In *2019 4th World Conference on Complex Systems (WCCS)* (pp. 1-6). IEEE.
- Hu, K., Cao, S., Li, W., & Zhu, F. (2019). An improved particle swarm optimization algorithm suitable for photovoltaic power tracking under partial shading conditions. *IEEE Access*, 7, 143217-143232.
- Irwanto, M., Leow, W. Z., Ismail, B., Baharudin, N. H., Juliangga, R., Alam, H., & Masri, M. (2020). Photovoltaic powered DC-DC boost converter based on PID controller for battery charging system. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1432, No. 1, p. 012055). IOP Publishing.
- Kamran, M., Mudassar, M., Fazal, M. R., Asghar, M. U., Bilal, M., & Asghar, R. (2020). Implementation of improved Perturb & Observe MPPT technique with confined search space for standalone photovoltaic system. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 32(7), 432-441.
- Mao, M., Cui, L., Zhang, Q., Guo, K., Zhou, L., & Huang, H. (2020). Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies. *Energy Reports*, 6, 1312-1327.
- Mars, N., Grouz, F., Essounbouli, N., & Sbita, L. (2017). Synergetic MPPT controller for photovoltaic system. *J. Electr. Electron. Syst*, 6(232), 2332-0796.
- Mohamed, S. A., & Abd El Sattar, M. (2019). A comparative study of P&O and INC maximum power point tracking techniques for grid-connected PV systems. *SN Applied Sciences*, 1(2), 1-13.
- Nkambule, M. S., Hasan, A. N., & Ali, A. (2019, November). MPPT under partial shading conditions based on Perturb & Observe and Incremental Conductance. In *2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)* (pp. 85-90). IEEE.
- Palanisamy, R., Vijayakumar, K., Venkatachalam, V., Narayanan, R. M., Saravanakumar, D., & Saravanan, K. (2019). Simulation of various DC-DC converters for photovoltaic system. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9(2), 917.
- Pilakkat, D., Kanthalakshmi, S., & Navaneethan, S. (2020). A comprehensive review of swarm optimization algorithms for MPPT control of PV systems under partially shaded conditions. *Electronics*, 24(1).
- Prabhu, H. U., & Babu, M. R. (2021, February). Performance Study of MPPT Algorithms of DC-DC Boost Converters For PV Cell Applications. In *2021 7th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)* (pp. 201-205). IEEE.
- Putri, R. I., Wiyanto, S., Syamsiana, I. N., Junus, M., Rifa'i, M., & Putra, E. S. (2019, December). Maximum power point tracking based on particle swarm optimization for photovoltaic system on greenhouse application. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1402, No. 3, p. 033104). IOP Publishing.
- da Rocha, M. V., Sampaio, L. P., & da Silva, S. A. O. (2019, November). Comparative analysis of ABC, Bat, GWO and PSO algorithms for MPPT in PV systems. In *2019 8th international conference on renewable energy research and applications (ICRERA)* (pp. 347-352). IEEE.

- Ronilaya, F., Setiawan, B., Kusuma, A. A., Mahfudi, I., & Yuliawan, D. M. (2018, August). Design Maximum Power Point Tracking of Wind Energy Conversion Systems Using P&O and IC Methods. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 407, No. 1, p. 012159). IOP Publishing.
- Said, S. M., & Latief, S. (2018). Determination Of Sensorless Input Parameters Of Solar Panel With Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (Anfis) Methods.
- Sampaio, P. G. V., & González, M. O. A. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 590-601.
- Senthilkumar, S., Mohan, V., Mangaiyarkarasi, S. P., & Karthikeyan, M. (2022). Analysis of Single-Diode PV Model and Optimized MPPT Model for Different Environmental Conditions. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2022.
- Szczepaniak, M., Otręba, P., Otręba, P., & Sikora, T. (2021). Use of the Maximum Power Point Tracking Method in a Portable Lithium-Ion Solar Battery Charger. *Energies*, 15(1), 26.
- Talbi, M., Mensia, N., & Ezzaouia, H. (2021). Modeling of a PV Panel and Application of Maximum Power Point Tracking Command based on ANN. *INTERNATIONAL ARAB JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGY*, 18(4), 568-577.
- Tirth, V., Algarni, S., Irshad, K., Islam, S., & Zahir, M. H. Investigation of MPPT Techniques Under Uniform and Non-Uniform Solar Irradiation Condition—A Retrospection.
- Zafar, M. H., Al-shahrani, T., Khan, N. M., Feroz Mirza, A., Mansoor, M., Qadir, M. U., ... & Naqvi, R. A. (2020). Group teaching optimization algorithm based MPPT control of PV systems under partial shading and complex partial shading. *Electronics*, 9(11), 1962.
- Zhang, F., Ye, W., Lei, G., Liu, Y., Wang, X., & He, C. (2021). Simulation and Analysis of Power-point Tracking via Photovoltaic Sensors. *Sensors and Materials*, 33(11), 3991-4001.



Investigation of the Effect of Sintering Temperatures on the Production of Porous NiTi Alloy by Loosen Sintering Method

Naci Arda Tanış¹ , Bülent Bostan² 

¹ Department of Metallurgy and Materials Engineering, Kırıkkale University, 71450 Kırıkkale, TURKEY

² Department of Metallurgy and Materials Engineering, Gazi University, 06500 Ankara, TURKEY

Başvuru/Received: 19/10/2022

Kabul / Accepted: 25/11/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 20/12/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Abstract

This article aims to produce NiTi shape memory alloys, which show superelasticity and shape memory effect, as well as good biocompatibility and corrosion properties, in open and porous sizes ranging from 100-500 μm , which are required for use as implants. This structure of pores is necessary to allow tissue growth and fluid flow inside the implants. Many powder metallurgy methods have been used in producing porous NiTi shape memory alloys. However, the packaging pressure used in these methods has not successfully created the desired pore distribution, shape, and size. The methods by which it can be produced are costly in terms of cost. In the study, production was carried out by sintering the powder mixture poured into molds without pressure with the help of binder polymers. This sintering process was carried out in an argon atmosphere for 1 hour at temperatures 1050, 1125, and 1200 °C. The study shows that pressureless loosen sintering can produce porous NiTi alloys, which is the more straightforward method. The pore distribution and proportions were examined. Homogeneous distribution and pores in desired sizes are created. It has also been determined that the binder polymer has a space-retaining effect. It was determined at which temperature the alloy sintered at different temperatures contained the desired B2 austenite phase for superelasticity. Austenite start and finish temperatures were determined for the alloy produced at each sintering temperature. As a result of this research, it was determined which phase was denser at which temperature, and the phase transformation temperatures were found. This method will decrease production costs, and more people will have access to this material. In general, the mechanism of sintering methods is joining the points in contact with the packaging pressure by necking. In this study, the combination of the grains with the polymer without packaging pressure with the thermal expansion mechanism reveals the originality of the study.

Key Words

“NiTi, Shape Memory Alloy, Powder Metallurgy, Porosity”

1. Introduction

NiTi alloys have superelastic and shape memory properties with combinations of thermoelastic transformation, acicular Ni₄Ti₃ phase, and twinning mechanisms. Thanks to its unique properties, good mechanical strength, relatively low elastic modulus, low corrosion resistance, and biocompatibility, it has a wide usage area in many sectors such as automotive, aerospace, aviation, medical, and implant (Lu et al., 2021). The elastic modulus of the bulk NiTi alloys used as implants in the human body is higher than the elastic modulus of the bones, making load transfer between the implant and the bone difficult. This situation causes local osteoporosis, which causes tissue loss in the bone called “stress shield” (LAI et al., 2021; Yuan et al., 2018). In order to eliminate such negativities, studies on NiTi alloys to reduce their density and elastic modulus by controlling their pores have been increasing recently. For example, reducing the mass weight in aircraft (Li et al., 2010) and reducing the stress shielding effect in implant applications (Bansiddhi et al., 2008) make this material very useful. In addition to reducing the stress shielding effect, porous implants should be able to grow in bone tissues and provide fluid passage within the implant (Xu et al., 2014). NiTi open-pore materials fulfill the requirements for implants. The first of these needs is that NiTi alloys show close biocompatibility compared to stainless steel and titanium. Second, it should provide a good combination of high strength to prevent deformation and cracks, relatively low hardness from reducing stress shielding, and high toughness to avoid brittle fractures. Finally, it provides good mechanical stability with bone tissue (Bansiddhi et al., 2008).

NiTi phase has a lower enthalpy of formation compared to other intermetallic phases. Elemental or pre-alloyed powders are used in the production of porous NiTi. However, using elemental powders, sintering methods cause incomplete NiTi formation because it takes place at low temperatures. This causes the formation of intermetallic phases such as Ni₃Ti and Ti₂Ni. These phases are difficult to remove even after prolonged high-temperature homogenization processes. Researchers have recently started using pre-alloyed NiTi powders to prevent this (Bansiddhi et al., 2008)

Since NiTi has a high melting point (1310 °C), the production of porous materials has been carried out by powder metallurgy methods. For the porous NiTi produced, the powder can be in elemental or pre-alloyed form. Many methods have been investigated to produce porous NiTi alloys with P/M. These methods are spark plasma sintering (SPS) (Özerim et al., 2022), self-propelled temperature synthesis (SHS) (Wisutmethangoon et al., 2009), hot isostatic pressing (HIP) (Farvizi et al., 2018), microwave sintering (MWS) (Xu et al., 2014), and additive manufacturing (AM) (M. Zhao et al., 2021). However, these production methods are generally expensive, and difficult to control the pore structure and shape. In addition, these methods are not very suitable for the production of complex shaped structures and mass production.

Researchers have recently used pore-forming methods by mixing space-retaining materials and powders to produce porous NiTi and then evaporate these powders. For example, NaCl (X. Zhao et al., 2009) in metal injection molding, NaF (Bansiddhi & Dunand, 2007) in hot-isostatic pressing, NH₄HCO₃ (Zhang et al., 2015) in free capsule hot isostatic pressing, and Mg in microwave sintering (LAI et al., 2021). In these studies, pressures between 100 and 700 MPa are applied for the packaging of powders. Due to the applied pressure, producing open pores of 100 – 500 microns is challenging, which is required for a porous implant. The intergranular channels connecting the large pores are closed by the packing pressure.

In powder metallurgy methods, sintering takes place by two different mechanisms, the necking of the grains in contact with the pressure at the contact points or the expansion of the grains during the sintering process and their union from these points by necking. In this study, the mechanism of grain expansion was used instead of the mechanism of grains in contact with the pressure used in traditional methods. By giving the NiTi powders fluidity with a binder, it is ensured that the molds take shape, then with the help of the same binder, pore formation and the raw sample remain in a bulk form. After sintering, the metallographic characterization of the samples was carried out.

2. Materials and Methods

In this study, eq.-atomic pre-alloyed NiTi powders obtained from the company (Nanoval GmbH) with an average grain size of 34 µm were used to produce porous NiTi samples. Firstly, NiTi powders were mixed with a binder mixture containing 83% PEG, 15% PP, and 2% SA in a turbo mixer at a ratio of 1:2 for one hour. The prepared mixture was then mixed for 30 minutes at 90 °C and poured into cylindrical molds with a diameter of 12 mm. The cooled samples in the molds were then removed in a cylindrical shape. In order to recover PEG from the extracted raw samples, the samples were kept in water at room temperature for one day, and the PEG polymer was removed from the sample. After the debinding process, dried samples were sintered for 1 hour at each temperature at 1050, 1125, and 1200 °C, respectively. During sintering, Ar gas was given to the furnace atmosphere from one end, and the tube was taken from the other end of the chamber. During this process, PP and SA were gasified between 300-500 C and removed from the system. The cylindrical geometry of the sintered samples was used to measure the porosity ratios. For this purpose, their actual densities were determined by using the volume/density formula (Eq. 1.1), and pore ratios were determined with Equation 1.2;

$$\rho_{true} = \frac{m}{V} \quad (1)$$

$$\%Porosity = \frac{\rho_{theoretical} - \rho_{true}}{\rho_{theoretical}} \times 100 \quad (2)$$

In Equation 1.1, m is the mass of the sample, and V is the volume of the sample. P is the theoretical density of the material considered to be fully charged, and ρ is the theoretical, actual post-production density of the material.

After calculating their densities and pore ratios, the samples were examined under an optical microscope to see the microstructure and pore distribution. Samples, sanding, and polishing operations were performed for microstructure examination. It was then etched in HF, HNO₃, and sterile water solution. The distribution and chemical analysis of the phases in the material microstructure were calculated using scanning electron microscopy (SEM) and electron diffraction spectrometry (EDS) devices. After these microstructure analyses, analyses on X-ray diffraction (XRD) were carried out to calculate the composition of the phases formed at different sintering temperatures from 20 to 90° 2 θ . To determine how the austenite start and end temperatures are affected by sintering temperatures, analyzes were performed on a differential scanning calorimetry (DSC) device.

3.Results and Discussions

Figure 1 gives optical microscope images of NiTi powders mixed with a binder (PEG 8000, PP, and SA) after molding, before, and after debinding. When we look at the material surface before debinding, it is seen that the PEG 8000 polymer spreads in certain areas in the microstructure at an average size of 100 - 300 microns, and this spread was homogeneous. In Figure 1. b, when the images of the same sample after sintering at 1125 C for 1 hour are analyzed, it is seen that pores are formed in the regions where PEG 8000 polymer is present. These pores are connected by the channels formed by the volatilization of PP and SA around the NiTi powder grains in the thermal polymer removal process before sintering. It is seen that they form necking zones from the contact at 1125 °C 1 hour and merge from these points.

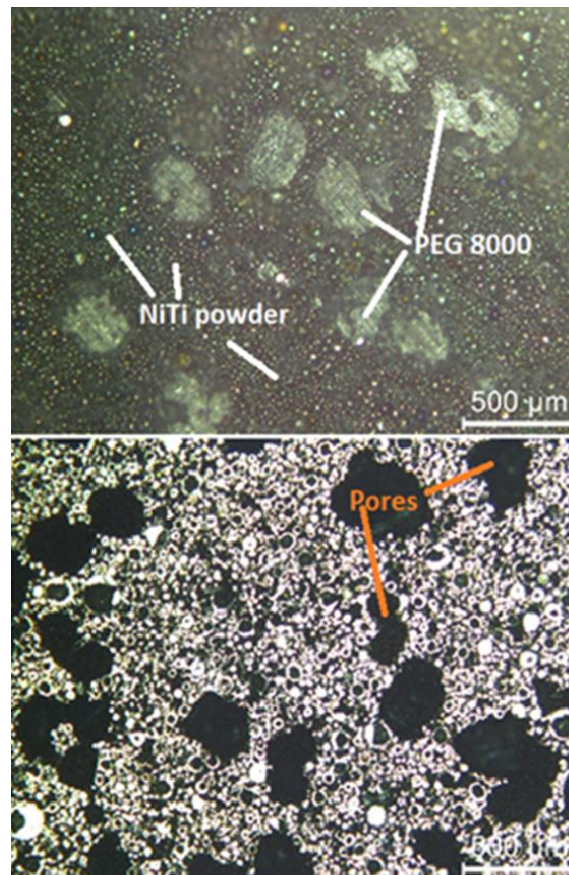


Figure 1. (a) Optical microscope image of the raw sample before the debinding process, (b) Optical microscope image of the sample sintered in Ar atmosphere at 1125 C for 1 hour

Considering the porosity rates given in Table 1 of the samples sintered in Ar atmosphere for 1 hour at 1050, 1125, and 1200 °C, it is seen that the porosity varies between 44-47% in all samples. It was determined that the main factor in pore formation was the binder/NiTi ratio in the initial feed mixture, and the temperature did not affect the overall porosity much.

Table.1. Densities and pore ratios of the samples produced by the non-pressure powder metallurgy method

Sample	Height (mm)	Diameter (mm)	Weight (g)	Volume (cm ³)	True Density (g/cm ³)	Theoretical Density (g/cm ³)	Porosity (%)
1050-1	13,63	12	5,5583	1,540	3,607	6,45	44,06
1125-1	15,14	12	5,9528	1,711	3,478	6,45	46,07
1200-1	9,04	12	3,6084	1,022	3,531	6,45	45,25

In Figure 2, SEM micrographs of the samples sintered for 1 hour at 1050, 1125, and 1200 °C are given at x1000 magnification. When these images were analyzed, it was determined that the dark gray part was the Ti-rich phase, the light gray part was the Ni-rich phase, and the gray part was the NiTi phase, as shown in the EDS analysis given in Figure 4. The NiTi phase is generally dominant in the structure in the pre-alloyed NiTi powders used before the process. However, increasing temperature, it has been determined that with the diffusion of Ni and Ti atoms in the NiTi alloys, especially Ni₃Ti, a NiTi₂ phase with Ti moving away from the structure is formed in the previous studies. It has been determined that as you go from the grain center to the grain boundary, firstly, the Ni₃Ti phase is formed, the increasing Ti atoms from there move to the grain boundary or the pore edges to form the Ti₂Ni phase. When this phase becomes stable, the increasing Ti atoms accumulate at the grain boundaries and form a Ti-rich phase. This diffusion event increases with time within 1 hour. When the SEM micrograph of the sample sintered at 1050 °C in Figure 3a is examined, it is seen that the gray NiTi phase covers a large area. In the sample sintered at 1125 °C in Figure 3b, the ratio of this NiTi phase decreases, and the ratio of Ni₃Ti and Ti-rich phase increases. It was observed that the NiTi phase almost completely disappeared in the sample sintered at 1200 °C. When we look at the bonding rate of the grains, it is seen that the Ti atoms in the Ti-rich phases at the grain boundary of the coalescence are displaced by the other atoms in the grain boundary, and diffusion occurs thanks to this realized diffusion process. When the dimensions of the neck region are examined, it is seen that the necking grooves are not fully completed at 1050 °C, but the grains come into contact with each other. When the SEM micrograph of the sample sintered at 1125 °C is examined, it is seen that these grains are in better contact with each other, the neck regions are wider, and there is better coalescence. In the sample sintered at 1200 °C, it was determined that the sintering took place completely, and the neck regions disappeared. Only the Ti-rich dark gray region remained at the grain boundaries. It is undesirable in producing open-pore NiTi because the pores connected by the channels around the complete union become closed. In the same way, in the sintering of press-prepared green samples at 1050 °C, Ismail et al., (2012) In their study, the channels connecting each other around the pores were closed.

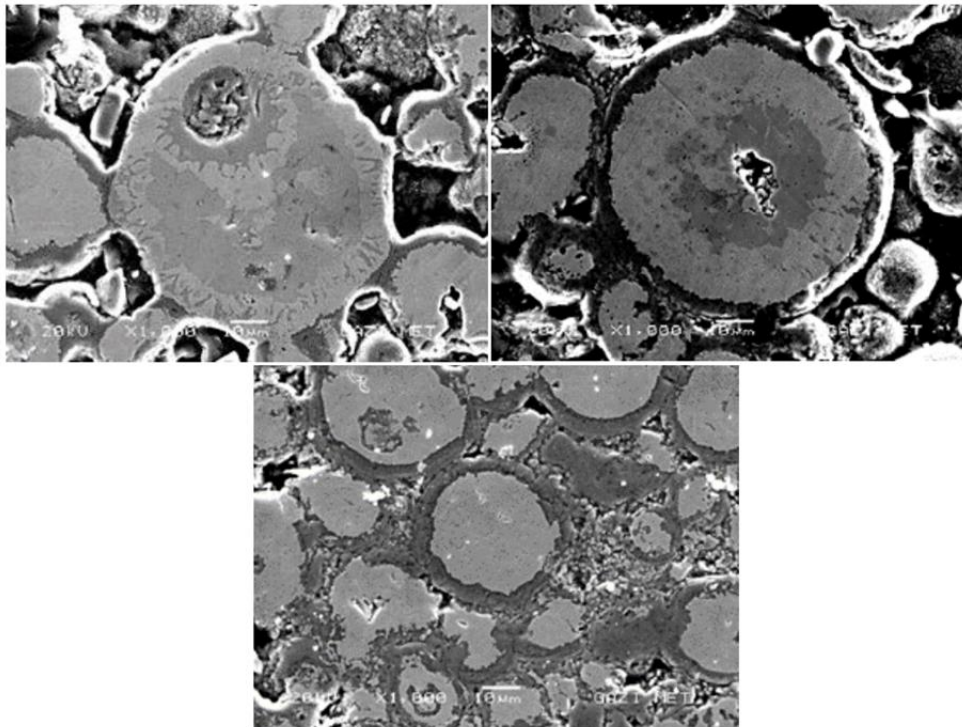


Figure 2. SEM micrograph of NiTi samples sintered for 1 hour a) 1050 C, b) 1125 C c) 1200 C

When looking at the micrograph analyses given in Figure 2, it was observed that closed pores were formed in the grain. The reason for these pores is explained as the formation of cavities in the center with an expansion of the grain after diffusion from the grain center to the grain boundaries. These spaces are called Kirkendall spaces. Yost et al., (2019) In their study on Ti coating on nickel wires, determined that the Kirkendall effect formed pores due to the diffusion mechanism between Ni-Ti. In this study, pores were formed due to diffusion between Ni-Ti.

The point EDS analysis of the sample sintered at 1125 C for 1 hour is given in Figure 3. In the point analysis taken from the center of the grain, Ni and Ti atoms are networked. 46.7% Ti and wt. 53.3% Ni was detected. It is possible to talk about the nearly equiatomic NiTi phase in this region. The Ti ratio is net in the point analysis taken from the light gray part away from the grain center, 36.5%, Ni content wt. 63.5% was found. When compared atomically according to the phase diagram, it was determined that the Nickel-rich phase was formed, but at this point, there was not precisely the Ni₃Ti stable phase. Any oxygen was found in the point analyses taken from these regions. In the elemental analysis, the mesh is at the necking point of the grain, and the dark gray part is at the grain edge. 88% Ti, wt. 4.5% Ni and wt. 7.5% O elements were detected. Here, the Ti atom is pushed to the grain boundaries as a result of diffusion, first forming the NiTi₂ stable phase with Ni. However, some Ti ions remained free in the saturated solution. When the free Ti ions were removed from the sample Ar atmosphere, they reacted with O atoms to form titanium oxide. Paz y Puente & Dunand, (2018) in their study on NiTi wires, reached the exact elemental percentages at the same contrast values as a result of EDS and SEM analyses and defined the regions.

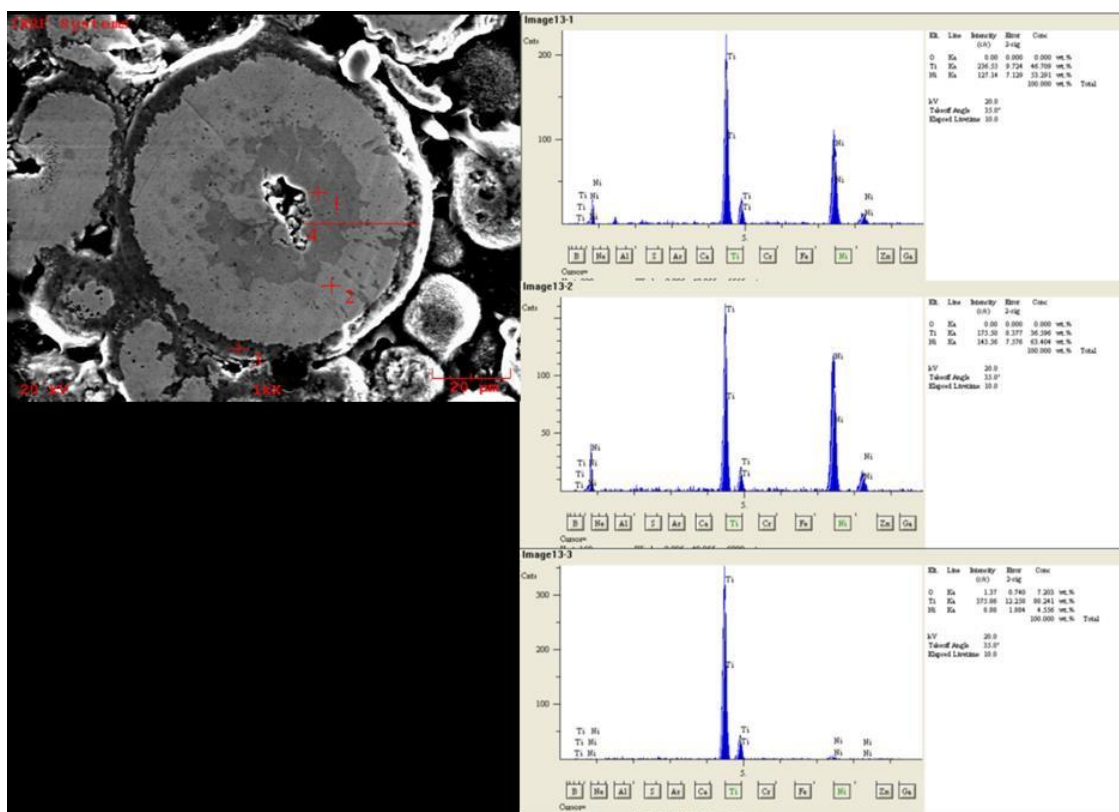


Figure 3. Point EDS analysis of the sample sintered in 1125 C 1 hour Ar atmosphere

XRD analyzes of the produced porous NiTi alloys are given in Figure 4. When the XRD peaks were examined, the peaks of the B19' martensite phase were observed at 1050 °C. The intensity of the B19' peaks decreased and disappeared at 1125 °C. The reason for that is thought to be the separation of Ti and Ni elements by diffusion and their transformation into stable Ti₂Ni and Ni₃Ti phases with the increasing temperature value. In the sample sintered at 1200 °C, the peaks of the B19' martensite phase were found again, which can be explained by the diffusion of Ti atoms in the Ti-rich phase at the grain boundary to the opposite grain and the transition to the Ni-rich phase with a lack of Ti concentration in the powders that diffusely merge at the grain boundaries. The peaks of the B2 austenite phase were observed at every temperature, especially at 1125 °C temperature, where the B19' phase was of low intensity, and the peak intensity increased. While the highest Ti₂Ni stable phase peak intensity was formed in the sample sintered at 1050 C, the peak intensity of this compound decreased with increasing temperature. While the peak intensity of the Ni₃Ti phase was found at the same degrees at 1050 and 1200 °C, it was determined that the intensity increased at 1125 °C compared to other temperatures. The increase in intensity at this temperature is due to the fact that there is more diffusion at 1050 °C, and there is no diffusion between the grains as at 1200 °C.

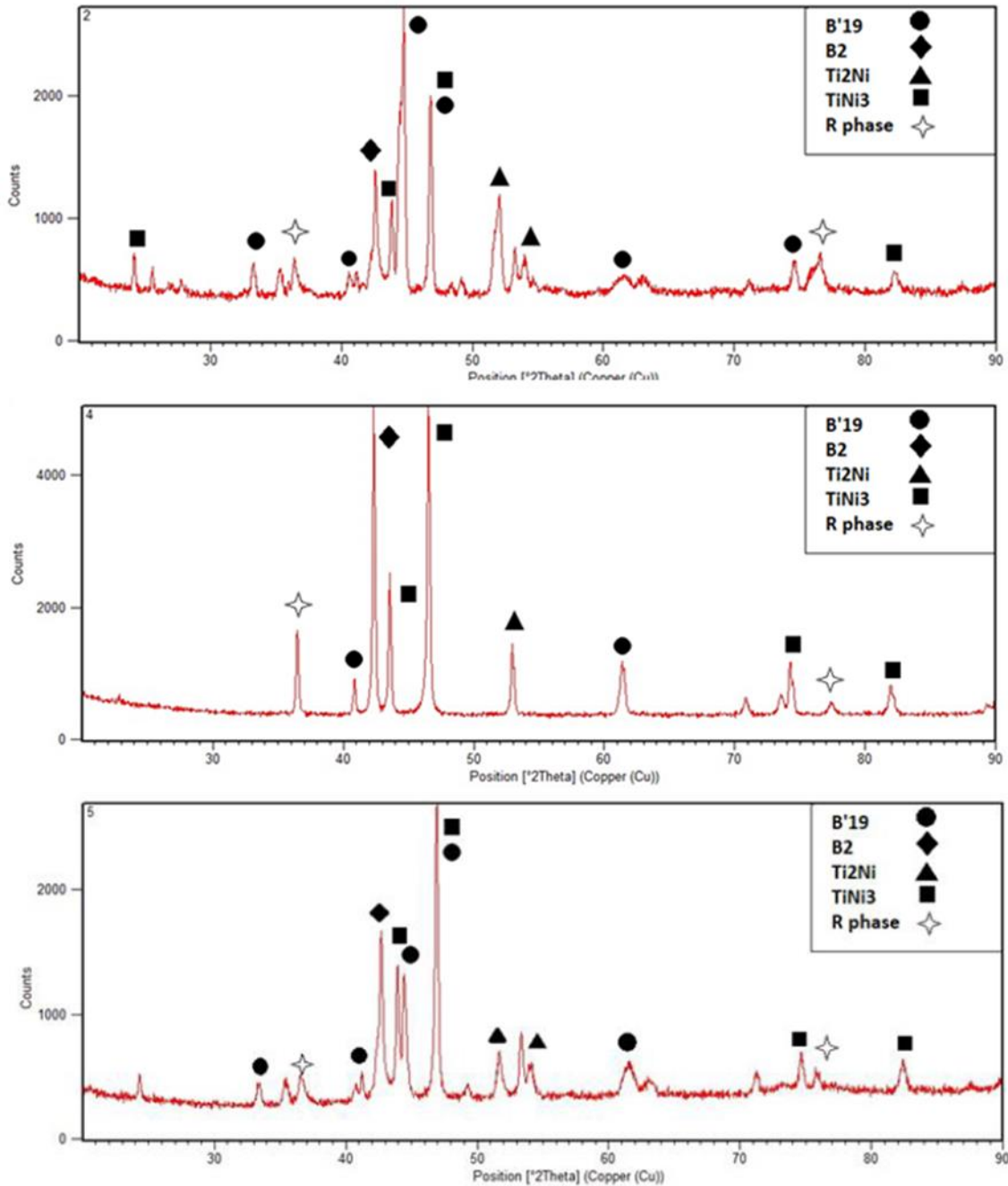


Figure 4. XRD analysis of samples produced by the non-pressure powder metallurgy method and sintered in Ar atmosphere for 1 hour (a) 1050 C, (b) 1125 C and (c) 1200 C

DSC analyzes of the samples were performed during heating. Analysis results are given in Figure 5. Considering the DSC analysis, the austenite initial temperature (A_s) of the porous NiTi alloy produced at 1050 °C was determined as 18.37 °C. The austenite finish temperature (A_f) was calculated as 91.1 °C. The austenite starting temperature of the sample produced at 1125 °C was found to be 13.4 °C, and the austenite ending temperature was 92.2 °C. Finally, the austenite starting temperature of the porous NiTi sample sintered at 1200 °C was found to be 16.6 °C, and the austenite ending temperature was determined as 90.3 °C. When the austenite start and end temperatures of the samples were examined, it was seen that these temperature values did not change much with the sintering temperature. In addition, the samples are not completely in the austenite phase at room temperature and contain a large amount of B19' martensite phase, as they are close to the austenite initial temperatures. Among the samples, the porous NiTi alloy sintered at 1125 °C for 1 hour showed the most accurate transformation behavior. The fact that the transformation range of the materials is extensive suggests that these materials are more prone to show superelasticity than shape memory properties. The XRD results given in Figure 4, on the other hand, support that the B2 phase will provide the most uniform transformation conditions due to the higher intensity of the sample sintered at 1125 °C and the low peaks of the other intermetallic phases.

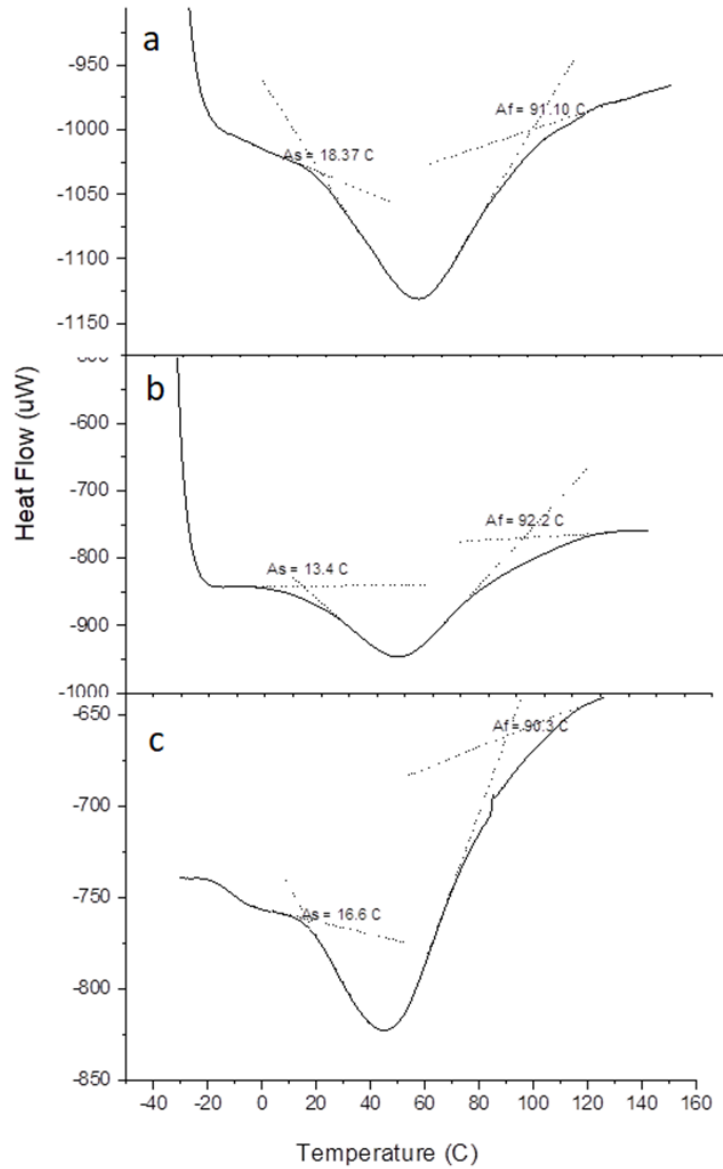


Figure 5. DSC curves of samples during heating (a) 1050 C, (b) 1125 C and (c) 1200 C

4. Conclusions

The study determined that the PEG 8000 polymer, which provides both space retention and fluidity, does its job and creates an open porous structure ranging from 100 to 500 microns. The pore measurements determined that there was not much change in the pore ratios with the sintering temperature, while the highest porosity was measured in the sample sintered at 1125 C for 1 hour. In SEM and EDS analyzes, it was determined that the diffusion process required for sintering was successful. In XRD analysis, while the peaks of B19' martensite phases were detected at 1050 °C and 1200 °C sintering temperatures, the B2 austenite phase was determined predominantly at 1125 °C. When we look at the DSC curves, it is seen that the sintering temperatures did not affect the austenite start and end temperatures of the sample. Still, the lowest austenite starting temperature and the highest austenite finish temperature were found for 1 hour of sintering at 1125 °C. In light of this study, it has been seen that the unpressurized system can produce porous NiTi shape memory alloys. In future studies, the samples to be made by this method were heat treated, paving the way for determining the phase structure and mechanical properties.

References

- Bansiddhi, A., & Dunand, D. C. (2007). Shape-memory NiTi foams produced by solid-state replication with NaF. *Intermetallics*, 15(12), 1612–1622. <https://doi.org/10.1016/J.INTERMET.2007.06.013>
- Bansiddhi, A., Sargeant, T. D., Stupp, S. I., & Dunand, D. C. (2008). Porous NiTi for bone implants: A review. *Acta Biomaterialia*, 4(4), 773–782. <https://doi.org/10.1016/J.ACTBIO.2008.02.009>
- Farvizi, M., Javan, M. K., Akbarpour, M. R., & Kim, H. S. (2018). Fabrication of NiTi and NiTi-nano Al₂O₃ composites by powder metallurgy methods: Comparison of hot isostatic pressing and spark plasma sintering techniques. *Ceramics International*, 44(13), 15981–15988. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.06.025>
- Ismail, M. H., Goodall, R., Davies, H. A., & Todd, I. (2012). Porous NiTi alloy by metal injection moulding/sintering of elemental powders: Effect of sintering temperature. *Materials Letters*, 70, 142–145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.12.008>
- LAI, T., XU, J., XIAO, Q., TONG, Y., HUANG, J., ZHANG, J., LUO, J., & LIU, Y. (2021). Preparation and characterization of porous NiTi alloys synthesized by microwave sintering using Mg space holder. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(2), 485–498. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65511-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65511-5)
- Li, D. S., Zhang, X. P., Xiong, Z. P., & Mai, Y.-W. (2010). Lightweight NiTi shape memory alloy based composites with high damping capacity and high strength. *Journal of Alloys and Compounds*, 490(1–2). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.10.025>
- Lu, H. Z., Ma, H. W., Luo, X., Wang, Y., Wang, J., Lupoi, R., Yin, S., & Yang, C. (2021). Microstructure, shape memory properties, and in vitro biocompatibility of porous NiTi scaffolds fabricated via selective laser melting. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 6797–6812. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.112>
- Özerim, G., Anlaş, G., & Moumni, Z. (2022). The effect of heat treatment on pseudoelastic behavior of spark plasma sintered NiTi. *Materials Today Communications*, 31, 103819. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103819>
- Paz y Puente, A. E., & Dunand, D. C. (2018). Synthesis of NiTi microtubes via the Kirkendall effect during interdiffusion of Ti-coated Ni wires. *Intermetallics*, 92, 42–48. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.intermet.2017.09.010>
- Wisutmethangoon, S., Denmud, N., & Sikong, L. (2009). Characteristics and compressive properties of porous NiTi alloy synthesized by SHS technique. *Materials Science and Engineering: A*, 515(1), 93–97. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.02.055>
- Xu, J. L., Jin, X. F., Luo, J. M., & Zhong, Z. C. (2014). Fabrication and properties of porous NiTi alloys by microwave sintering for biomedical applications. *Materials Letters*, 124, 110–112. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.03.088>
- Yost, A. R., Erdeniz, D., y Puente, A. E. P., & Dunand, D. C. (2019). Effect of diffusion distance on evolution of Kirkendall pores in titanium-coated nickel wires. *Intermetallics*.
- Yuan, B., Zhu, M., & Chung, J. (2018). Biomedical Porous Shape Memory Alloys for Hard-Tissue Replacement Materials. *Materials*, 11, 1716. <https://doi.org/10.3390/ma11091716>
- Zhang, L., Zhang, Y. Q., Jiang, Y. H., & Zhou, R. (2015). Superelastic behaviors of biomedical porous NiTi alloy with high porosity and large pore size prepared by spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, 644, 513–522. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2015.05.063>
- Zhao, M., Qing, H., Wang, Y., Liang, J., Zhao, M., Geng, Y., Liang, J., & Lu, B. (2021). Superelastic behaviors of additively manufactured porous NiTi shape memory alloys designed with Menger sponge-like fractal structures. *Materials & Design*, 200, 109448. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109448>
- Zhao, X., Sun, H., Lan, L., Huang, J., Zhang, H., & Wang, Y. (2009). Pore structures of high-porosity NiTi alloys made from elemental powders with NaCl temporary space-holders. *Materials Letters*, 63(28), 2402–2404. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2009.07.069>



Vakıf Üniversitelerinin Akademik Performans Analizi İçin Yeni Bir Bütünleşik ÇKKV Çerçevesi

A New Integrated MCDM Framework For Academic Performance Analysis Of Foundation Universities

Sinan Çizmecioglu^{1*}, Esra Boz², Ahmet Çalık²

¹Karatay Üniversitesi, Ticaret ve Sanayi Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, 42020 Karatay, Konya, TÜRKİYE

²Karatay Üniversitesi, İktisadi İdari Bilimler Fakültesi, Uluslararası Ticaret ve Lojistik Bölümü, 42020 Karatay, Konya, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 05/04/2022

Kabul / Accepted: 08/08/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin çoğu, birçok disiplin alanında ileri gidebilmek için; üniversitelerine nitelikli, kaliteli ve yaygın etkiye sahip bilgi üretmeleri için teşvikler vermektedir. Nitelikli bilgilerin üretilmesi ise akademik yayınlar ve benzeri çalışmalar ile sağlanabilmektedir. Bu çalışmada, Türkiye’de eğitimi rekabetçi ve daha kaliteli bir hale getirmeye çalıştıkları için örneklem olarak vakıf üniversiteleri tercih edilmiş ve vakıf üniversitelerinin akademik performansının ölçülmesine ilişkin bir araştırma yapılmıştır. Çalışmada, vakıf üniversitelerindeki yayın, proje ve atıf gibi performans indeksleri ÇKKV (Çok Kriterli Karar Verme) yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Entropi ve Critic yöntemleriyle akademik performans ölçümünde belirlenen kriterlerin ağırlıkları elde edilmiştir. Bu iki yöntemin sonuçlarını entegre etmek için ayrıca bir toplayıcı operatör kullanılmış ve ardından CoCoSo yöntemiyle vakıf üniversitelerinin akademik performans sıralaması oluşturulmuştur. Çalışmada elde edilen sonuçlar ise vakıf üniversitelerinin akademik performanslarını artırmasına yol gösterici bir nitelik taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler

“Akademik Performans, ÇKKV, Vakıf Üniversiteleri, Entropi, Critic, CoCoSo”

Abstract

Most developed and developing countries encourage their universities to produce competent, high-quality, and widely distributed information in order to advance in a variety of fields. Academic publications and other related studies can be used to generate qualified information. The purpose of this study was to assess the academic performance of Turkey's foundation universities. MCDM (Multi-Criteria Decision Making) approaches were used to analyze performance metrics such as publications, projects, and citations in foundation universities. The Entropy and Critic methods were used to calculate the weights of the criteria determined in the academic performance measurement. The results of these two approaches were combined using an adder operator, and the academic performance rating of foundation universities was established using the CoCoSo method. On the other hand, the study's findings have a guiding quality for foundation institutions looking to improve their academic performance.

Key Words

“Academical Performance, MCDM, Foundation Universities, Entropi, Critic, CoCoSo”

1. Giriş

Performans, bir sürecin sonunda veya süreç boyunca alınan çıktılarının önceden belirlenmiş olan kriterlere veya amaçlara yaklaşma derecesidir (Helvacı 2002). Birey veya kurumlar mevcut durumlarını ölçmek ve gelecek planları için bir aksiyon alma amacı ile performans analizi yapmaktadır. Bu performans analizi, bir performans değerlendirme problemi olup, ele alınan noktalara göre değişkenlikler gösterebildiği için belirsizlikler içermektedir. Aynı zamanda, öznel değerlendirilebilen ölçütler ve hiyerarşik bir yapıya sahiptir (Kaptanoğlu ve Özok 2010). Bu yüzden bir karar problemi olarak ele alınabilmektedir. Performans değerlendirme problemi çözümüne Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri ile ulaşılabilmektedir. ÇKKV yöntemleri, farklı kriterlere göre seçeneklerin sıralanmasını sağlayarak karar vericilere yol göstermektedir. ÇKKV yöntemleri literatürde çok yaygın olarak kullanılmakta olup pek çok karar probleminin çözümü sağlayabilmektedir. Ayrıca, farklı alanlarda, farklı faktörlerin performans değerlendirmesi için ise ÇKKV'nin kullanıldığı çalışmalara literatürde sıklıkla karşılaşılmaktadır (Aguetzoul ve Pires 2016; Karande, Zavadskas, ve Chakraborty 2016; Keshtkar 2017; Yalcin ve Ünlü 2018; Zhou vd. 2019).

Yükseköğretim kurumları ülke üzerinde etkisi büyük olan kurumlardır (Aladağ vd. 2018). Çünkü öğrencilere mesleklerini öğretirken aynı zamanda onların farklı konulara bakışlarını düzenleyebilen güçlü dinamiklere sahiptirler. Bu yüzden yükseköğretim kurumları performanslarını sürekli ölçerek mevcut durumlarını analiz etmeli, ölçüm kriterlerine göre eksik taraflarını geliştirmelidirler. Bunun için 2009 yılında kurulan URAP (Akademik Performansa Göre Üniversite Sıralaması-University Ranking by Academic Performance), farklı kriter ve niteliklere göre tüm yükseköğretim kurumlarının sıralamalarını gönüllü bir şekilde yapan ve bu sonuçları kamuoyuna duyuran bir kurumdur. Bu kurumun amacı üniversitelerin gelişmeye açık yönlerini keşfetmeleri ve sürekli geliştirme sağlamalarıdır. URAP dışında yükseköğretim kurumlarının performansını ölçen ve analiz eden başka kurumlarda bulunmaktadır. Bunlardan bazıları Dünya Üniversiteleri Akademik Sıralaması (ARWU), Times Dergisi Yüksek Öğretim Sıralaması (THES-QS) gibi kuruluşlardır. Ayrıca yükseköğretim kurumlarının bilimsel çalışma performanslarına göre sıralandığı sistemler bulunmaktadır. Bu sistemlerin başlıcaları Google Search Uluslararası Üniversiteler Sıralaması (G-FACTOR), Dünya Üniversiteleri Bilimsel Çalışmalar Performans Sıralaması (HEETACTION), Küresel Üniversite Sıralaması (WUHAN) gibi sistemlerdir. Bu kuruluşlar ve sistemler belirli bilimsel performans kriterlerine göre küresel çapta üniversitelerin sıralamalarını yapmaktadırlar (Yavuz ve Yaman 2011).

Bu çalışmada, ÇKKV yöntemleri aracılığı ile URAP verilerine göre vakıf üniversiteleri sıralaması yapılmıştır. Çalışmanın amacı, ÇKKV yöntemleri ile vakıf üniversitelerini sıralamak ve yöntemlerin sonuç sıralamalarını analiz etmektir. Çalışmanın literatüre katkısı, yenilikçi ÇKKV yöntemleri ile vakıf üniversite sıralamalarının yapılması ve belirtilen uygulama adımları ve veriler ışığında sonraki çalışmalar için yol gösterici olmasıdır. Ayrıca, vakıf üniversiteleri açısından da performans değerlendirme faktörü bu çalışmada gerçekleştirilmiş, sonuçları ise açık bir şekilde verilmiştir. Bu çalışmada, ÇKKV yöntemlerinden Kriterler arası Korelasyon Yoluyla Kriterlerin Önem Tespiti (CRITIC), Birleşik Uzlaşma Çözümü (Cocoso) ve Entropi yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlerin tercih edilme sebebi ise yenilikçi ÇKKV yöntemlerinin sıralama ve ağırlık belirleme konusunda daha hassas davranmalarından dolayıdır.

Bu çalışma devam eden şekilde düzenlenmiştir: Çalışmanın izleyen ikinci bölümünde üniversitelerin performans değerlendirmeleri üzerine bir literatür araştırması sunulmuştur. Üçüncü bölümde çalışmada uygulaması yapılan yöntem olan CRITIC, Cocoso ve Entropi yöntemleri anlatılmıştır. İzleyen dördüncü bölümde yöntemlerden elde edilen bulgular ifade edilmiştir. Son bölüm olan sonuç bölümünde ise çalışmanın sonuçları, sınırlılıkları ve gelecek çalışmalar için öneriler verilmiştir.

2. Literatür Araştırması

Akademik performans sıralaması küresel ve ulusal çapta üniversiteler arasında sıralama yapmak için benimsenen en önemli ölçütlerinden biridir. Üniversiteler bu sıralamalarda üst sıralara çıkmak için akademisyenlerine ve öğrencilerine teşvikler sunmakta ve çeşitli faaliyetler düzenlemektedirler. Akademik performans ile yapılan en temel çalışmalardan biri Lavin (1965) yayınlamıştır. Bu çalışmada akademik performansa ilişkin 300 'e yakın makale ve kitap sentezlenmiştir. Bunlara göre akademik performans; tahminin teorik ve metodolojik sorunları, entelektüel özellikler, kişilik özellikler, sosyal yapı, ileri araştırmalar için öneriler olmak üzere altı ana başlıkta özetlenebilir.

Ying-Feng ve Ling-Shou (2002) Tayvan'da üniversite hocalarının performanslarını sentetik bulanık karar verme yaklaşımıyla değerlendirmişlerdir. Performans değerlendirmesi öğrenim kalitesini artırmak, akademik araştırma atmosferini oluşturmak ve profesörlerin öğrencilerini tanımasına yönelik amaçlar doğrultusunda yapılmıştır.

Liu ve Cheng (2005) akademik performansa göre Çin Üniversiteleri ile Dünyadaki üniversitelerin farkını değerlendirmişlerdir. Değerlendirme kriterleri olarak yüksek atıf alan araştırmacılar veya dergilerde yayınlanan makaleler ele alınmıştır. Ayrıca SCI-E ve SSCI indeksli dergilerde yayınlanan makaleler de değerlendirme ölçütü olarak ele alınmıştır. Ülke üniversitelerinin en iyi üniversite sıralama sonuçlarına bakıldığında ise Çin'in 19. Sırada yer aldığı görülmektedir.

Özden (2008) Veri Zarflama Analizi ile Türkiye'deki vakıf üniversitelerinin görece toplam, teknik ve ölçek etkinliklerini ölçerek analiz etmiştir. Analizde toplam etkinlik (CCR) ve teknik etkinlik (BCC) modelleri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Analizler sonucunda toplam etkin üniversiteler arasında Sabancı üniversitesi ilk sırada yer almıştır.

Kaptanoğlu ve Özok (2010) bulanık AHP yöntemini uygulayarak akademik performans değerlendirme analizi yapmışlardır. Uygulamanın hiyerarşik yapısında 3 ana kriter ve birçok alt kriter bulunmaktadır.

Al-Juboori vd. (2011) akademik performansını incelerken çeşitli göstergeleri ele almışlardır. Göstergeleri incelerken arama motorlarındaki görünürlük, web sitesi büyüklüğü, web sitesindeki zengin içerik ve bilimsel içerikleri (atıf, yayın vb.) ele almışlardır. En iyi derecelere sahip üniversitelerin fakültelerdeki öğrenci sayısı oranlarının, uluslararası faktörlerin, fakülte başına atıf oranlarının ve akademik meslektaş değerlendirme oranlarının üst sıralarda olduğu söylenmiştir. Mester (2011) dünya üniversitelerin akademik sıralamalarına yönelik yapılan çalışmada üniversitelerin büyüklüğü, SCI-SSCI yayınlar, atıf sayıları ve Google akademikteki çıktılar analiz edilmiştir. Sonuçlara göre ilk 20 sıradaki üniversitelerin neredeyse tamamı Amerika'da yer almaktadır.

Wu vd. (2012) üniversite performanslarını hibrit ÇKKV yöntemlerinden AHP ve VIKOR yöntemleri kullanılmıştır. Akademik performans ölçmek için 12 özel üniversite belirlenmiştir. Hiyerarşik yapı içerisinde uluslararası yayınlar, bildiriler, akademik ödüller gibi akademik kriterlerin yanı sıra ders kredi miktarı, ders saatleri, öğrenci kredileri, dergi sayıları gibi geniş bir ölçüm yapan idari kriterler de bulunmaktadır. Hiyerarşik yapıda toplam 27 kriter 64 gösterge bulunmaktadır. En önemli 3 kriter tam zamanlı yabancı öğretim üyelerinin ve tüm öğretim üyelerinin oranı (0.0710), fakülte ve öğrenci oranı (0.0499), fakülte ve öğrenci ağırlıklı oranı (0.0489) olarak çalışmada belirlenmiştir.

Nisel ve Nisel (2013) Türkiye'de ki üniversitelerin akademik başarılarına göre performanslarını sıralamışlardır. Ampirik uygulama kısmında dahil edilen üniversitelerin devlet üniversitesi olması, 2000 yılından önce kurulması, tıp fakültesine sahip olması, birden fazla çalışma alanına sahip olması göz önünde bulundurulmuştur. AHP, ANP ve VIKOR yöntemi ile scsc uygulama sonuçlarına göre U23 (Hacettepe Üniversitesi), U5 (Ankara Üniversitesi), U26 (İstanbul Üniversitesi), U6 (Atatürk Üniversitesi) ve U16 (Ege Üniversitesi) en iyi performansa sahip üniversiteler olarak belirlenmiştir.

Alaşehir vd. (2014) Türkiye'deki üniversitelerin akademik performanslarına URAP-TR sıralamasını baz alarak birçok kritere göre bibliyometrik analiz ile değerlendirmişlerdir. Değerlendirme kriterlerinin içinde üniversitelerin makale, atıf, mezun doktora öğrencileri, fakülte başına düşen atıf sayısı ve fakülte başına düşen öğrenci sayısı gibi kriterler yer almaktadır. Makalede bibliyometrik analiz ile belirlenen URAP kriterlerine göre en başarılı üniversiteler görselleştirilerek verilmiştir.

Musani ve Jemain (2015) bulanık VIKOR yöntemi uygulaması yapılarak en iyi okul sıralamaları yapılmıştır. Mükemmellik, onur başarısı, ortalama, geçme ve kalma kriterleri olarak belirlenmiştir. Bu kriterler kullanılarak hazır verilere göre Malesyanın Sijil Pelajaran Malaysia eyaletindeki on okulun sıralaması yapılmıştır. Sonuçlara göre akademik olarak en başarılı olan öğrenim kurumu onuncu okuldur.

Gözükara (2015) belirli akademik kriterlere göre ülkemizdeki vakıf üniversitelerinin performanslarını incelemiştir. Vakıf üniversitelerinin performansları kümeleme analizi yaparak incelenmiştir. Analizdeki küme tiplerinde lisans ve ön lisans program sayıları, makale ve proje sayıları gibi kriterler yer almaktadır.

Ertuğrul vd. (2016) gri ilişkisel analizi yöntemi uygulanarak 10 Türk üniversitesinin akademik performansı analiz edilmiştir. Uygulama kısmında makale skorları, toplam atıf skorları, doktora öğrenci skorları, eğitmen ve öğrenci skorları değerlendirme kriterleri arasında yer almıştır. Çalışmanın sonuçlarında U4, U8 ve U10 akademik olarak yükselişte olan, U3, U6 ve U9 akademik olarak düşüşte olan üniversiteler olarak yer almaktadır.

Kocaeli üniversitesi mühendislik fakültesi bölümlerini belirli performans kriterlerine göre değerlendirmişlerdir. Değerlendirme kriterlerinden bazıları akademik yayın sayısı, akademik teşvik puanı, mezun lisans öğrenci sayısıdır. Bölümlerin performanslarının değerlendirilmesinde Veri Zarflama Analizi ve Promethee yöntemleri kullanılmıştır.

Esangbedo ve Bai (2019) Çin'in Xi'an kentindeki dört üniversitenin sıralanmasına yönelik bir uygulama yapmışlardır. Uygulamada 6 ana ve 18 alt kriter gri düzenleyici odak teorisi ile ağırlıklandırılmıştır. Analiz sonucunda AAA isimli üniversite en prestijli üniversite olarak bulunmuştur.

Naveed vd. (2020) internet tabanlı öğrenmenin daha etkili hale getirilmesi üzerine Grup Karar Verme, AHP ve Bulanık AHP yöntemlerini kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Uygulama 5 boyut ve 25 kriter kullanılarak yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre elektronik öğrenmeye katkıda bulunan en önemli kriterler Finansal Hazırlık, Verimli Teknoloji Altyapısı, Elektronik Öğrenmeye Yönelik Tutum, Altyapı Hazırlığı ve Güvenilirlik olarak elde edilmiştir.

Aliyev vd. (2020) beş İngiltere üniversitesinin performanslarının dört kritere göre karşılaştırmışlardır. Kriterler öğrenim, araştırma, atıf, uluslararası bakış olarak çalışmada yer almaktadır. Uygulama kısmı Bulanık AHP yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre E üniversitesi kriterlere göre en iyi performansı gösteren üniversitedir

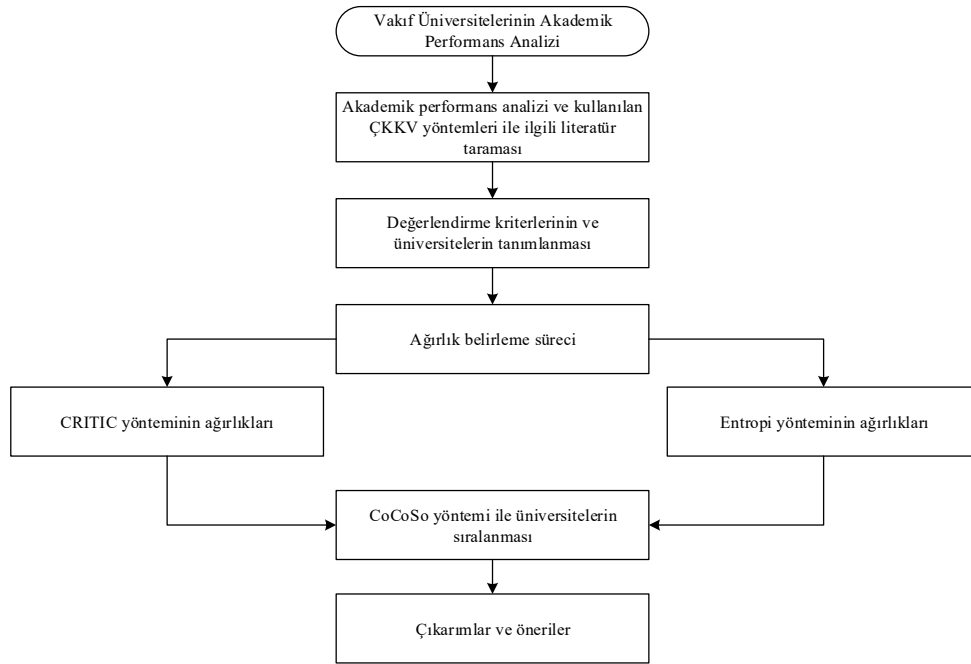
Demir (2021) 2020 yılı raporuna göre 56 vakıf üniversitesini 5 performans kriterine göre sıralamıştır. CRITIC yöntemi kriterlerin ağırlıklandırılmasında, WEBDA yöntemi ise üniversitelerin sıralamasının yapılmasında yöntem kısmında kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre en önemli kriter doktora puanı olurken, en iyi performansı Koç Üniversitesi göstermiştir.

Castro-Lopez vd. (2021) İspanya'daki farklı üniversitelerden 1912 öğrenciden oluşan bir örneklem üzerinde öğrencilerin üniversiteyi bırakmalarına yönelik bir uygulama yapmışlardır. Uygulamada AHP ve Bulanık Çıkarım Sistemleri kullanılmıştır. Sonuçlar öğrencilerin üniversite öğrenimini bırakma olgusu tek bir sebebe bağlı olmadığını göstermiştir. Üniversite öğrenimini terk etmede oto kontrol, adaptasyon ve tatmin gibi durumların birbirleriyle ilişkili olduğu sonuçları çalışmada elde edilmiştir.

Akademik performans değerlendirmesine yönelik literatür taramasına bakıldığında genellikle bibliyometrik ve zaman serisine yönelik çalışmaların yapıldığı görülmekte, aynı zamanda akademik performans ve ÇKKV çalışmalarının literatürde çok az olduğu da belirlenmektedir. Özellikle yenilikçi ÇKKV yöntemleriyle akademik performansa yönelik yapılan çalışma sayısının oldukça az olduğu görülmektedir. Bu kısımda incelenen akademik performans çalışmalarında genellikle ÇKKV yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Bunun sebebi akademik performansın diğer metotlara göre analizinin daha net ve daha doğru sonuçların elde edilebilmesinden kaynaklanmaktadır.

3. Önerilen Çerçeve

Bu çalışmada vakıf üniversitelerinin akademik performans değerlendirmeleri için CoCoSo, CRITIC ve Entropi olmak üzere 3 ÇKKV yöntemi kullanılmaktadır. Önerilen karar verme çerçevesinin akış şeması Şekil 1'de açıklanmıştır. Ardından kullanılan üç yöntem ile ilgili bilgiler verilmiş olup yöntemlerin sonuçları ise izleyen bölümde aktarılmıştır.



Şekil 1. Önerilen Karar Verme Çerçevesinin Akış Şeması

3.1. CRITIC Yöntemi

Verilerin objektif ağırlıklandırılmasına dayalı olarak uygulanan CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) metodu Diakoulaki vd. (1995)'nin literatüre kazandırmış olduğu ÇKKV tekniğidir. CRITIC yöntemi genel anlamda kriter ağırlığının bulunmasına yönelik problemlerin birçok çeşidinde kullanılmaktadır. Örneğin Demir (2021) 56 vakıf üniversitesinin performans sıralamasını CRITIC yöntemiyle analiz etmiştir. Apan ve Öztel (2020) CRITIC yöntemini finansal performans değerlendirmesinde kullanmışlardır. Ayrıca bu yöntem farklı ÇKKV yöntemleriyle entegre olarak uygulanabilmektedir.

CRITIC yöntemi aşağıda ifade edildiği üzere 5 adımdan oluşmaktadır (Diakoulaki vd. 1995):

Adım 1: Öncelikle başlangıç karar matrisi oluşturulur.

Karar matrisi Eşitlik (1)'de ifade edildiği gibi oluşturulmaktadır.

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

Burada 'i' alternatifleri, 'j' ise kriterleri belirtmektedir.

Adım 2: Karar matrisi normalize edilir.

Kriterlerin tek bir birimle gösterilebilmesi için normalizasyon işlemi yapılmaktadır. Bu işlemde süreç maksimizasyon ise Eşitlik (2), minimizasyon ise Eşitlik (3) kullanılmaktadır.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (3)$$

Eşitliklerde yer alan x_{ij} i. alternatifte ait j. kriter için normalize performans değerini gösterirken; $x_j^{\max} = \max(x_1, \dots, x_m)$ ve $x_j^{\min} = \min(x_1, \dots, x_m)$ ifade etmektedir.

Adım 3: İlişki katsayı matrisi oluşturulur.

Önceki adımda hesaplanmış olan normalize değerler arasındaki korelasyon katsayıları Eşitlik (4) aracılığıyla bulunmaktadır.

$$\rho_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \sum_{i=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}} \quad (4)$$

Adım 4: C_{ij} değerleri hesaplanır.

Bilgi miktarları Eşitlik (5)' de verildiği üzere hesaplanmaktadır. Ayrıca standart sapma ise Eşitlik (6) aracılığı ile bulunmaktadır.

$$C_{ij} = \sigma_j \sum_{k=1}^n (1 - \rho_{jk}) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)^2}{m}} \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

Adım 5: Kriter ağırlıkları hesaplanır.

Her bir kritere ait ağırlık değerleri Eşitlik (7) aracılığı ile hesaplanmaktadır.

$$w_j = \frac{c_j}{\sum_{j=1}^n c_j} \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

Bu formülasyon sonucunda ulaşılan ağırlıklar kıyaslandığında, en yüksek değere sahip olan kriterin, en öncelikli kriter olduğu ifade edilmektedir.

3.2. Entropi yöntemi

Entropi yöntemi son kullanıcıyı tüm karar verme sürecine dahil eden 2009 yılında literatüre kazandırılmış bir ÇKKV yöntemidir (Wang ve Lee 2009). Bu yöntemde, karar vericiler tarafından atanan öznel ağırlıklar, karşılaştırılabilir bir ölçüğe göre normalleştirilmektedir ve son kullanıcı derecelendirmeleri objektif bir ağırlık olarak kullanılmaktadır (Akçakanat vd. 2017). Bu yöntemin adımları aşağıda verildiği gibidir (Karami ve Johansson 2014; Wang ve Lee 2009):

Adım 1: Oluşturulan karar matrisi fayda ve maliyet indekslerine göre Eşitlik (8) ve Eşitlik (9) kullanılarak normalize edilir.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$r_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

Adım2: Eşitlik (10)' da verildiği üzere pij değeri hesaplanır.

$$p_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad \forall j \quad (10)$$

i: alternatifler
j: kriterler
 p_{ij} : normalize edilmiş değerler
 a_{ij} : verilen fayda değerleri

Adım 3. Bu adımda entropi değerleri Eşitlik (11)'de verildiği üzere hesaplanır.

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m [p_{ij} \ln p_{ij}] \quad \forall j \quad (11)$$

Adım 4. Bu adımda belirsizlikler Eşitlik (12)'de ifade edildiği gibi hesaplanır.

$$d_j = 1 - E_j \quad \forall j \quad (12)$$

Adım 5. Eşitlik (13)'de verildiği üzere ağırlıklar hesaplanır.

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad \forall j \quad (13)$$

3.3. CoCoSo Yöntemi

CoCoSo (Birleşik uzlaşık çözüm-Combine compromise solution) yöntemi Yazdani (2019) tarafından geliştirilmiştir. Yöntem karar matrisindeki alternatifler ile ideal değerler arasındaki ilişkilerin tanımlanmasına dayanmaktadır. Alternatifleri değerlendirmek ve sıralamak için kullanılan yenilikçi bir yöntemdir. Alternatifler ve ilgili kriterler belirlendikten sonra aşağıdaki adımlar uygulanmaktadır (Yazdani vd. 2019):

Adım 1: Başlangıç karar matrisi Eşitlik (14)'de gösterildiği gibi oluşturulur.

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$i = 1, 2, \dots, m$ (i:alternatif); $j = 1, 2, \dots, n$ (j:kriter); x_{ij} : j kriteri için i. alternatifin değeri

Adım 2: Karar matrisi, fayda ve maliyet için ayrı ayrı normalleştirilir. Eşitlik (15) fayda kriteri için kullanılır.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

r_{ij} : j kriteri için i. alternatifin normalize değeri

Eşitlik (16) maliyet kriteri için kullanılır.

$$r_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

Adım 3: Her bir alternatif için ağırlıklı karşılaştırılabilirlik dizisinin toplamı ve karşılaştırılabilirlik dizilerinin güç ağırlıklarının tamamı S_i ve P_i olarak hesaplanmıştır (Eşitlik (17) ve (18)).

$$S_i = \sum_{j=1}^n (w_j r_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

S_i , her bir alternatif için toplam ağırlıklı karşılaştırılabilirlik dizisini gösterir i. değer, gri ilişkisel üretim yaklaşımına göre elde edilir. w_j , her j kriterinin ağırlığını gösterir.

$$P_i = \sum_{j=1}^n (r_{ij})^{w_j} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

P_i , her alternatif i için karşılaştırılabilirlik dizisinin toplam güç ağırlığını gösterir.

Adım 4: Elde edilen veriler, aşağıdaki 3 farklı birleştirme stratejisi kullanılarak her bir alternatifin göreceli ağırlıkları hesaplanır. Bu hesaplama yöntemi Eşitlik (19), (20) ve (21)'de gösterilmiştir.

k_{ia} , k_{ib} ve k_{ic} i. alternatif için a, b ve c toplama stratejisini gösterir.

$$k_{ia} = \frac{P_i + S_i}{\sum_{i=1}^m (P_i + S_i)} \quad (19)$$

$$k_{ib} = \frac{S_i}{i^{min} S_i} + \frac{P_i}{i^{min} P_i} \quad (20)$$

$$k_{ic} = \frac{\lambda(S_i) + (1-\lambda)(P_i)}{(\lambda)i^{max}(S_i) + (1-\lambda)i^{max}(P_i)} \quad (21)$$

λ değeri karar vericiler tarafından seçilir ve λ değeri genellikle 0,5 olarak tercih edilir.

Adım 5: Alternatiflerin son sıralaması Eşitlik (22)'de gösterildiği gibi hesaplanır.

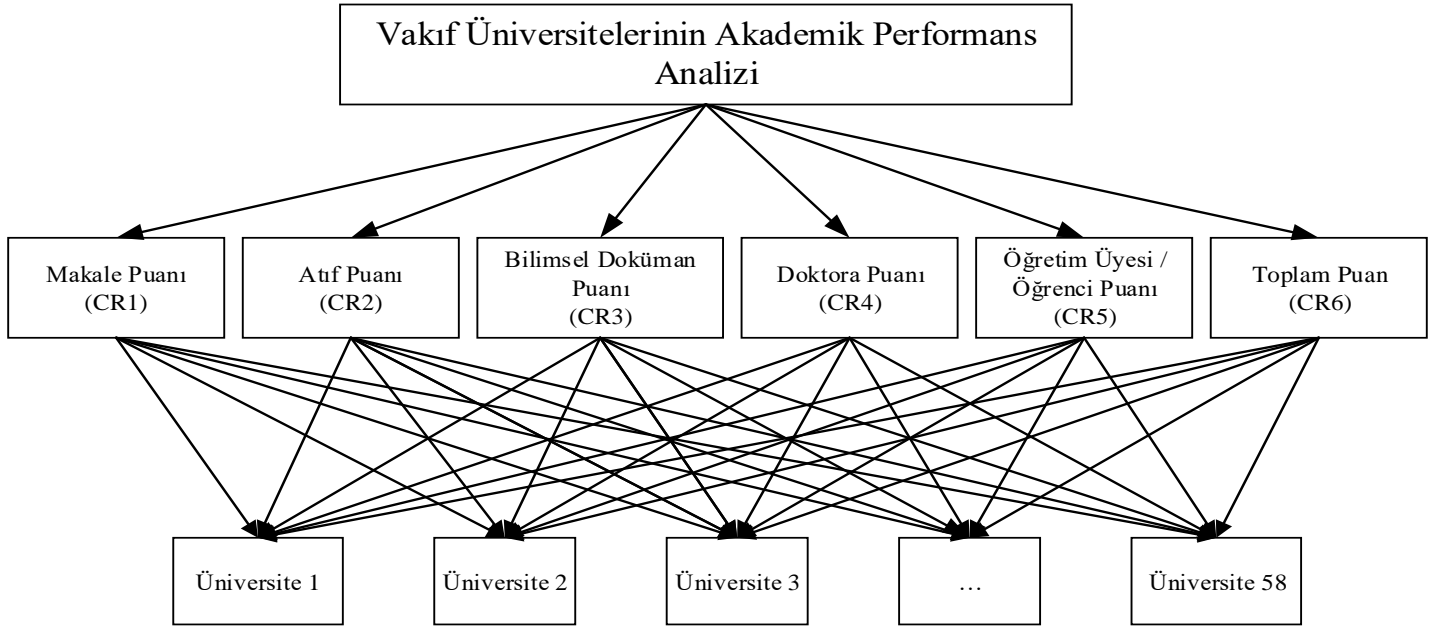
$$k_i = (k_{ia} k_{ib} k_{ic})^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{3}(k_{ia} + k_{ib} + k_{ic}) \quad (22)$$

Elde edilen en yüksek değer, CoCoSo yöntemine göre en iyi alternatifi temsil eder.

4. Bulgular

Bu çalışmada CRITIC-Entropi-CoCoSo tekniği, vakıf üniversitelerinin akademik performansını incelemek için kullanılmıştır. Akademik performans göstergelerinin nesnel ağırlıkları CRITIC-Entropi yöntemleri kullanılarak hesaplanmış ve üniversitelerin akademik performans puanını bulmak için CoCoSo yöntemi uygulanmıştır.

Vakıf üniversitelerinin, akademik göstergelere dayalı olarak performanslarını değerlendirmek için ilgili göstergeler belirlenmiştir. Bu çalışmadaki tüm göstergeler doğası gereği fayda kriteri olarak değerlendirilmektedir. Göstergeler belirlendikten sonra üniversitelerin verileri 2021-2022 yılı için URAP'ın sitesinden elde edilmiştir (URAP 2021-2022). Çalışmanın hiyerarşik yapısı Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Çalışmanın Hiyerarşik Yapısı

4.1. Ağırlık Belirleme Süreci

Bu bölümde CRITIC ve Entropi yöntemleri kullanılarak ağırlık belirleme işleminin sonuçları sunulmaktadır. Her iki yöntemin de başlangıç adımı karar matrisinin oluşturulmasıdır. Çalışmada yer alan üniversiteler ve göstergelerden oluşan karar matrisi Eşitlik (1)'e göre oluşturularak Tablo 1'de verilmiştir.

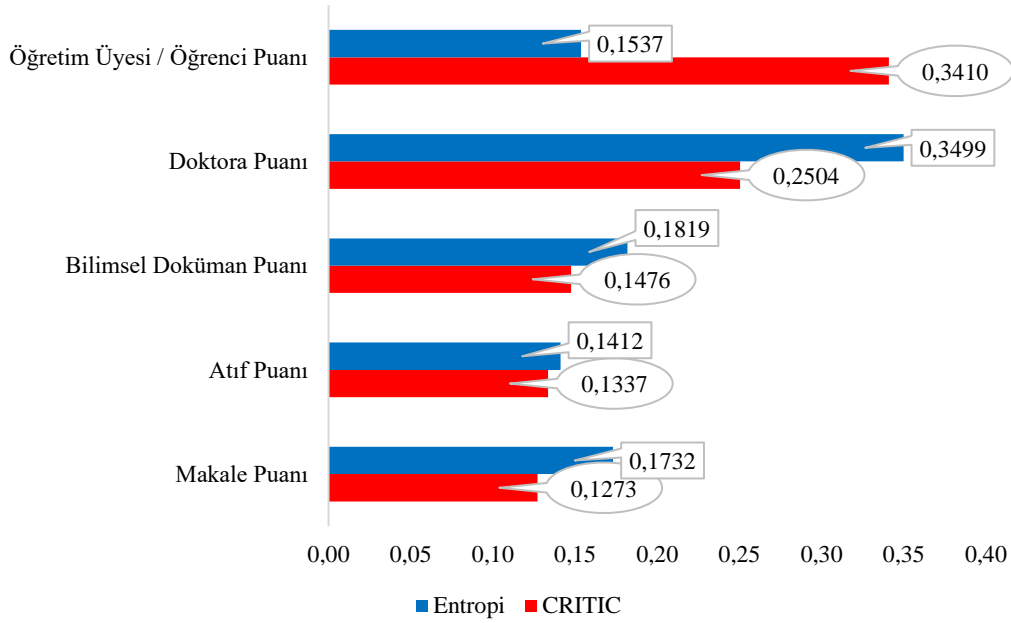
Tablo 1. Akademik Performans Karar Matrisi

Üniversite	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	Toplam Puan
Koç Üniversitesi	181,45	173,68	178,1	136,5	66,71	736,45
Sabancı Üniversitesi	163,48	163,57	164,55	107,58	56,11	655,28
İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi	159,52	183,76	169,65	100,05	41,96	654,93
Çankaya Üniversitesi	174,13	178,27	145,88	40,29	34,62	573,2
Bezm-i Âlem Vakıf Üniversitesi	115,47	129,55	149,48	61,43	88,81	544,74
Acıbadem Mehmet Ali Aydınlar Üniversitesi	119,2	113,33	128,89	71,16	93,45	526,02
Başkent Üniversitesi	86,7	103,73	128,09	94,58	76,14	489,24
Tobb Ekonomi Ve Teknoloji Üniversitesi	104,5	114,36	138,73	64,75	55,76	478,09
Atılım Üniversitesi	127,5	119,06	112,83	69,03	38,6	467,02
Yeditepe Üniversitesi	96,99	106,91	108,7	117,94	35,71	466,25
Özyeğin Üniversitesi	115,75	114,94	133,1	64,6	31,43	459,83
İstanbul Medipol Üniversitesi	105,21	106,86	115,31	85,22	41,06	453,65
Bahçeşehir Üniversitesi	117,61	115,17	121,87	72,29	8,12	435,07
İstanbul Arel Üniversitesi	87,97	99,64	82,87	100,05	47,39	417,92
Yaşar Üniversitesi	95,96	100,64	90,21	70,65	40,71	398,17

Üniversite	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	Toplam Puan
Kadir Has Üniversitesi	87,1	86,89	94,89	73,13	37,05	379,06
İzmir Ekonomi Üniversitesi	91,07	107,47	99,99	31,2	45,09	374,82
Üsküdar Üniversitesi	66,52	106,68	69,63	33,76	97,21	373,79
Demiroğlu Bilim Üniversitesi	64,93	106,63	105,43	7,63	80,54	365,16
Hasan Kalyoncu Üniversitesi	72,93	85,23	79,69	91,04	30,97	359,86
Piri Reis Üniversitesi	88,29	77,07	127,21	25,04	41,67	359,28
Çağ Üniversitesi	80,09	138,15	108,69	17,88	1,1	345,9
Altınbaş Üniversitesi	73,16	83,27	86,42	65,7	28,97	337,52
Konya Gıda Ve Tarım Üniversitesi	75,07	100,84	62,55	16,97	78,84	334,26
İstanbul Okan Üniversitesi	66,66	66,9	63,11	85,83	48,86	331,37
İstanbul Aydın Üniversitesi	57,06	63,74	108,41	63,58	32,95	325,73
Doğuş Üniversitesi	63,11	97,02	78,81	46,01	34,09	319,04
Maltepe Üniversitesi	52,16	53,67	51,53	91,12	60,43	308,9
Ted Üniversitesi	92,87	85,16	82,63	3,61	43,09	307,36
Biruni Üniversitesi	72,53	68,25	62,04	27,3	65,12	295,23
İstanbul Gelişim Üniversitesi	76,73	80,53	53,74	50,65	32,45	294,1
Yüksek İhtisas Üniversitesi	32,81	128,01	32,92	0,2	99	292,94
Kto Karatay Üniversitesi	55,3	99,24	84,96	19,29	30	288,8
Işık Üniversitesi	55,96	79,65	83,96	41,46	21,57	282,61
Beykent Üniversitesi	55,32	54,26	74,44	61,85	32,35	278,22
İstanbul Ticaret Üniversitesi	37,06	50,93	57,82	109,76	15,59	271,17
İstinye Üniversitesi	71,33	66,12	66,7	1,06	64,92	270,14
İbn Haldun Üniversitesi	23,63	44,45	23,19	95,82	79,12	266,21
Sanko Üniversitesi	68,79	45,3	63,1	2,05	83	262,23
İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi	46,68	52,11	41,76	108,62	11,86	261,02
İstanbul Kültür Üniversitesi	66,41	76,7	67,31	37,45	0,1	247,96
İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi	38,14	56,77	54,21	27,4	65,57	242,09
Mef Üniversitesi	74,05	62,34	69,61	0,2	35,23	241,43
Ufuk Üniversitesi	34,16	59,19	70,94	5,78	71,25	241,33
Ankara Sosyal Bilimler Üniversitesi	33,23	30,37	27,55	74,41	75,17	240,73
İstanbul Gedik Üniversitesi	49,71	35,7	36,62	56,96	48,61	227,6
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi	26,81	41,54	30,72	77,86	37,54	214,48
Toros Üniversitesi	36,46	53,98	36,61	14,05	50,2	191,31

Üniversite	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	Toplam Puan
Nuh Naci Yazgan Üniversitesi	48,12	38,68	41,63	0,2	46,32	174,94
Avrasya Üniversitesi	32,19	32,87	21,35	24,19	48,53	159,13
Alanya Hamdullah Emin Paşa Üniversitesi	35,78	25,55	10,96	0,2	82,72	155,21
Niğantaşı Üniversitesi	33,06	39,91	30,71	9,5	36,2	149,38
İstanbul Rumeli Üniversitesi	16,52	23,29	12,24	0,2	81,46	133,72
İstanbul 29 Mayıs Üniversitesi	0,2	0,2	1,74	64,94	57,81	124,88
İstanbul Esenyurt Üniversitesi	4,34	32,23	20,14	0,2	47,89	104,8
Beykoz Üniversitesi	5,79	12,68	2,9	0,2	57,86	79,43

Akademik performans matrisi oluşturulduktan sonra, Eşitlik (2) ve Eşitlik (8) kullanılarak, matris normalize edilmiştir. Ardından CRITIC yöntemi için Eşitlik (4)-(7) ve Entropi yöntemi için Eşitlik (10)-(13) kullanılarak kriterlerin ağırlıkları elde edilmiş ve Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Göstergelerin Ağırlıkları

4.2. CoCoSo Sonuçları

CoCoSo yöntemi için karar matrisi Tablo 1'de verilmiştir. Ardından Eşitlik (15) ile karar matrisi normalize edilmiş ve Tablo 2'de sunulmuştur. Sonrasında Eşitlik (17) ve (18) ile S_i ve P_i değerleri elde edilmiştir. Bu değerler için kriterlerin ağırlıkları CRITIC ve Entropi yöntemlerinden alınmıştır. Bir sonraki adımda, her üniversitenin uzlaşık çözümü (performans puanları), Eşitlik (19)-(21)'deki üç değerlendirme formülüne dayalı olarak hesaplanmıştır. Bu değerlendirme puanları kullanılarak, analize dahil edilen üniversitelerin son performans puanları Eşitlik (22) kullanılarak belirlenmiş ve Tablo 3'te nihai sıralamalar sunulmuştur. Tablo 3 sonuçlarına göre akademik performansı en yüksek üç üniversite Koç, Sabancı ve İhsan Doğramacı Bilkent iken, İstanbul 29 Mayıs, İstanbul Esenyurt, ve Beykoz Üniversiteleri ise en kötü üniversiteler olduğu bulunmuştur.

Tablo 2. Normalize Karar Matrisi

Üniversite	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5
Koç Üniversitesi	1,000	0,945	1,000	1,000	0,674
Sabancı Üniversitesi	0,901	0,890	0,923	0,788	0,566
İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi	0,879	1,000	0,952	0,733	0,423
Çankaya Üniversitesi	0,960	0,970	0,817	0,294	0,349
Bezm-İ Âlem Vakıf Üniversitesi	0,636	0,705	0,838	0,449	0,897
Acıbadem Mehmet Ali Aydınlar Üniversitesi	0,657	0,616	0,721	0,521	0,944
Başkent Üniversitesi	0,477	0,564	0,716	0,692	0,769
Tobb Ekonomi Ve Teknoloji Üniversitesi	0,575	0,622	0,777	0,474	0,563
Atılım Üniversitesi	0,702	0,648	0,630	0,505	0,389
Yeditepe Üniversitesi	0,534	0,581	0,606	0,864	0,360
Özyeğin Üniversitesi	0,638	0,625	0,745	0,472	0,317
İstanbul Medipol Üniversitesi	0,579	0,581	0,644	0,624	0,414
Bahçeşehir Üniversitesi	0,648	0,626	0,681	0,529	0,081
İstanbul Arel Üniversitesi	0,484	0,542	0,460	0,733	0,478
Yaşar Üniversitesi	0,528	0,547	0,502	0,517	0,411
İstanbul Bilgi Üniversitesi	0,533	0,577	0,742	0,338	0,011
Kadir Has Üniversitesi	0,479	0,472	0,528	0,535	0,374
İzmir Ekonomi Üniversitesi	0,501	0,584	0,557	0,227	0,455
Üsküdar Üniversitesi	0,366	0,580	0,385	0,246	0,982
Demiroğlu Bilim Üniversitesi	0,357	0,580	0,588	0,055	0,813
Hasan Kalyoncu Üniversitesi	0,401	0,463	0,442	0,666	0,312
Piri Reis Üniversitesi	0,486	0,419	0,711	0,182	0,420
Çağ Üniversitesi	0,441	0,752	0,606	0,130	0,010
Altınbaş Üniversitesi	0,403	0,453	0,480	0,481	0,292
Konya Gıda Ve Tarım Üniversitesi	0,413	0,548	0,345	0,123	0,796
İstanbul Okan Üniversitesi	0,367	0,363	0,348	0,628	0,493
İstanbul Aydın Üniversitesi	0,314	0,346	0,605	0,465	0,332
Doğuş Üniversitesi	0,347	0,527	0,437	0,336	0,344
Maltepe Üniversitesi	0,287	0,291	0,282	0,667	0,610
Ted Üniversitesi	0,511	0,463	0,459	0,025	0,435
Biruni Üniversitesi	0,399	0,371	0,342	0,199	0,657
İstanbul Gelişim Üniversitesi	0,422	0,438	0,295	0,370	0,327
Yüksek İhtisas Üniversitesi	0,180	0,696	0,177	0,000	1,000

Üniversite	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5
Kto Karatay Üniversitesi	0,304	0,540	0,472	0,140	0,302
Işık Üniversitesi	0,308	0,433	0,466	0,303	0,217
Beykent Üniversitesi	0,304	0,295	0,412	0,452	0,326
İstanbul Ticaret Üniversitesi	0,203	0,276	0,318	0,804	0,157
İstinye Üniversitesi	0,392	0,359	0,368	0,006	0,655
İbn Haldun Üniversitesi	0,129	0,241	0,122	0,702	0,799
Sanko Üniversitesi	0,378	0,246	0,348	0,014	0,838
İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi	0,256	0,283	0,227	0,795	0,119
İstanbul Kültür Üniversitesi	0,365	0,417	0,372	0,273	0,000
İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi	0,209	0,308	0,298	0,200	0,662
Mef Üniversitesi	0,407	0,339	0,385	0,000	0,355
Ufuk Üniversitesi	0,187	0,321	0,392	0,041	0,719
Ankara Sosyal Bilimler Üniversitesi	0,182	0,164	0,146	0,544	0,759
İstanbul Gedik Üniversitesi	0,273	0,193	0,198	0,416	0,490
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi	0,147	0,225	0,164	0,570	0,379
Toros Üniversitesi	0,200	0,293	0,198	0,102	0,507
Haliç Üniversitesi	0,214	0,238	0,210	0,318	0,197
Nuh Naci Yazgan Üniversitesi	0,264	0,210	0,226	0,000	0,467
Avrasya Üniversitesi	0,176	0,178	0,111	0,176	0,490
Alanya Hamdullah Emin Paşa Üniversitesi	0,196	0,138	0,052	0,000	0,835
Nişantaşı Üniversitesi	0,181	0,216	0,164	0,068	0,365
İstanbul Rumeli Üniversitesi	0,090	0,126	0,060	0,000	0,823
İstanbul 29 Mayıs Üniversitesi	0,000	0,000	0,000	0,475	0,584
İstanbul Esenyurt Üniversitesi	0,023	0,174	0,104	0,000	0,483
Beykoz Üniversitesi	0,031	0,068	0,007	0,000	0,584

Tablo 3. Entropi-CoCoSo ve CRITIC-CoCoSo Sonuçları

Üniversite	Entropi-CoCoSo Sonuçları	Sıra	Critic-CoCoSo Sonuçları	Sıra
Koç Üniversitesi	4,927	1	3,284	1
Sabancı Üniversitesi	4,43	2	3,012	2
İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi	4,33	3	2,899	5
ankaya Üniversitesi	3,611	8	2,536	10
Bezm-İ Âlem Vakıf Üniversitesi	3,823	5	2,907	4
Acıbadem Mehmet Ali Aydınlar Üniversitesi	3,834	4	2,926	3
Başkent Üniversitesi	3,809	6	2,82	6
Tobb Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	3,526	10	2,597	7
Atılım Üniversitesi	3,457	12	2,469	13
Yeditepe Üniversitesi	3,758	7	2,572	8
Özyeğın Üniversitesi	3,389	13	2,399	14
İstanbul Medipol Üniversitesi	3,526	9	2,508	12
Bahçeşehir Üniversitesi	3,251	14	2,181	26
İstanbul Arel Üniversitesi	3,492	11	2,516	11
Yaşar Üniversitesi	3,217	15	2,363	16
İstanbul Bilgi Üniversitesi	2,817	27	1,914	45
Kadir Has Üniversitesi	3,16	17	2,312	20
İzmir Ekonomi Üniversitesi	2,869	25	2,235	24
Üsküdar Üniversitesi	2,988	20	2,553	9
Demiroğlu Bilim Üniversitesi	2,715	30	2,332	18
Hasan Kalyoncu Üniversitesi	3,175	16	2,276	22
Piri Reis Üniversitesi	2,782	28	2,167	27
ağ Üniversitesi	2,43	39	1,738	48
Altınbaş Üniversitesi	2,927	21	2,158	29
Konya Gıda ve Tarım Üniversitesi	2,669	33	2,305	21
İstanbul Okan Üniversitesi	3,084	18	2,325	19
İstanbul Aydın Üniversitesi	2,894	23	2,161	28
Doğuş Üniversitesi	2,725	29	2,102	30
Maltepe Üniversitesi	3,053	19	2,361	17
Ted Üniversitesi	2,365	42	1,952	42
Biruni Üniversitesi	2,59	35	2,192	25
İstanbul Gelişim Üniversitesi	2,656	34	2,049	35

Üniversite	Entropi-CoCoSo Sonuçları	Sıra	Critic-CoCoSo Sonuçları	Sıra
Kto Karatay Üniversitesi	2,398	40	1,925	44
Işık Üniversitesi	2,526	36	1,93	43
Beykent Üniversitesi	2,69	32	2,055	34
İstanbul Ticaret Üniversitesi	2,892	24	2,021	37
İstinye Üniversitesi	2,229	45	1,974	40
İbn Haldun Üniversitesi	2,913	22	2,367	15
Sanko Üniversitesi	2,268	43	2,084	33
İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi	2,822	26	1,96	41
İstanbul Kültür Üniversitesi	2,064	48	1,55	55
İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi	2,375	41	2,086	32
Mef Üniversitesi	1,986	50	1,634	51
Ufuk Üniversitesi	2,199	46	2,017	38
Ankara Sosyal Bilimler Üniversitesi	2,69	31	2,248	23
İstanbul Gedik Üniversitesi	2,484	38	2,03	36
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi	2,516	37	1,975	39
Toros Üniversitesi	2,019	49	1,827	46
Haliç Üniversitesi	2,138	47	1,709	49
Nuh Naci Yazgan Üniversitesi	1,741	53	1,562	54
Avrasya Üniversitesi	1,955	51	1,773	47
Alanya Hamdullah Emin Paşa Üniversitesi	1,692	54	1,694	50
Nişantaşı Üniversitesi	1,771	52	1,619	53
İstanbul Rumeli Üniversitesi	1,587	55	1,633	52
İstanbul 29 Mayıs Üniversitesi	1,457	56	1,153	58
İstanbul Esenyurt Üniversitesi	1,376	57	1,363	56
Beykoz Üniversitesi	1,219	58	1,29	57

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, Türkiye’de yer alan vakıf üniversitelerinin akademik performansını değerlendirmek için CRITIC-Entropi ve CoCoSo yöntemleri ile bütünlük bir çerçeve kullanmaktadır. Akademik göstergelerin nesnel ağırlıkları CRITIC-Entropi yöntemleri kullanılarak hesaplanmış ve üniversitelerin akademik performans skorunu bulmak için CoCoSo yöntemi uygulanmıştır. Bu çalışmanın ana katkıları ve öneriler şu şekilde özetlenebilir:

- Vakıf üniversitelerinin akademik performanslarını henüz literatürde ele alınmayan akademik performans ile ilgili çeşitli göstergeler altında analiz etmektir.
- CRITIC, Entropi ve CoCoSo yöntemlerini kullanarak vakıf üniversitelerinin mevcut durumunu değerlendirmek için güvenilir bir karar destek çerçevesi geliştirmektir.

- CRITIC ve Entropi yöntemlerinden elde edilen kriter ağırlıklarını entegre etmek için ayrıca bir toplayıcı operatör kullanmaktadır.
- Vakıf üniversitelerinin akademik performansları çalıştırması diğer üniversiteler için de genişletilebilir ve değiştirilebilir.
- Önerilen çerçeve yeni göstergeler ve özelliklerle tamamen farklı bir soruna uygulanabilir.

Önerilen bütünlük çerçeve, diğer performans analizi çalışmalarında alternatifleri sıralamak için kullanılabilir. Performans analizinde uzmanların görüşlerini dâhil etmek için öznel ağırlık bulma yöntemleri tercih edilebilir. Bulanık küme genişlemeleri ile farklı çerçeveler geliştirilebilir. Çalışmanın sınırlılığı üniversitelerin kuruluş tarihinin dikkate alınmamasıdır. Ancak bundan sonraki çalışmalarda, örneğin 2012 yılından önce kurulan veya 2010 yılından sonra kurulan üniversiteler gibi bir ayırım yapılarak çalışma genişletilebilir.

Referanslar

- Aguezoul, Aicha, ve Silvio Pires. 2016. “3PL performance evaluation and selection: a MCDM method”. Ss. 87–94 içinde *Supply Chain Forum: An International Journal*. C. 17. Taylor & Francis.
- Akçakanat, Özen, EREN Hande, Esra Aksoy, ve Vesile Ömürbek. 2017. “Bankacılık sektöründe ENTROPI ve WASPAS yöntemleri ile performans değerlendirmesi”. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi* 22(2):285–300.
- Al-Juboori, Abbas Fadhil Mohammed Ali, Yunji Na, ve Franz Ko. 2011. “University ranking and evaluation: Trend and existing approaches”. Ss. 137–42 içinde *The 2nd International Conference on Next Generation Information Technology*. IEEE.
- Aladağ, Zerrin, Atakan Alkan, Ezgi Güler, ve Yasemin Özdin. 2018. “Akademik birimlerin veri zarflama analizi ve promethee yöntemleri ile performans değerlendirmesi: Kocaeli üniversitesi örneği”. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi* 34(1):1–13.
- Alaşehir, Oğuzhan, Murat Perit Çakır, Cengiz Acartürk, Nazife Baykal, ve Ural Akbulut. 2014. “URAP-TR: a national ranking for Turkish universities based on academic performance”. *Scientometrics* 101(1):159–78.
- Aliyev, Rashad, Hasan Temizkan, ve Rafiq Aliyev. 2020. “Fuzzy analytic hierarchy process-based multi-criteria decision making for universities ranking”. *Symmetry* 12(8):1351.
- Castro-Lopez, Adrián, Antonio Cervero, Celia Galve-González, Javier Puente, ve Ana B. Bernardo. 2021. “Evaluating critical success factors in the permanence in Higher Education using multi-criteria decision-making”. *Higher Education Research & Development* 1–19.
- DEMİR, Gülay. 2021. “4. VAKIF ÜNİVERSİTELERİNDE AKADEMİK PERFORMANS ANALİZİ: CRITIC-WEDBA BÜTÜNLEŞİK MODEL UYGULAMASI: ACADEMIC PERFORMANCE ANALYSIS IN VAKIF UNIVERSITIES: CRITIC-WEDBA INTEGRATED MODEL APPLICATION”. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ECONOMIC AND ADMINISTRATIVE ACADEMIC RESEARCH (E-ISSN: 2757-959X)* 1(1):39–50.
- Diakoulaki, Danae, George Mavrotas, ve Lefteris Papayannakis. 1995. “Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method”. *Computers & Operations Research* 22(7):763–70.
- Ertuğrul, İrfan, Tayfun Öztaş, Abdullah Özçil, ve Gülin Zeynep Öztaş. 2016. “Grey relational analysis approach in academic performance comparison of university a case study of Turkish universities”.
- Esangbedo, Moses Olabhele, ve Sijun Bai. 2019. “Grey regulatory focus theory weighting method for the multi-criteria decision-making problem in evaluating university reputation”. *Symmetry* 11(2):230.
- Gözükara, İzlem. 2015. “Vakıf üniversitelerinin akademik kriterler açısından kümeleme analizi ile incelenmesi”. *İşletme Araştırmaları Dergisi* 7(4):156–71.
- Helvacı, M. Akif. 2002. “Performans yönetimi sürecinde performans değerlendirmenin önemi”. *Ankara Üniversitesi Eğitim Bilimleri Fakültesi Dergisi* 35(1–2):155–69.
- Kaptanoğlu, Dilek, ve Ahmet Fahri Özok. 2010. “Akademik performans değerlendirmesi için bir bulanık model”. *İTÜDERGİSİ/d* 5(1).
- Karami, Amin, ve Ronnie Johansson. 2014. “Choosing DBSCAN parameters automatically using differential evolution”. *International Journal of Computer Applications* 91(7):1–11.

- Karande, P., E. Zavadskas, ve S. Chakraborty. 2016. "A study on the ranking performance of some MCDM methods for industrial robot selection problems". *International Journal of Industrial Engineering Computations* 7(3):399–422.
- Keshtkar, Mohammad Mehdi. 2017. "Performance analysis of a counter flow wet cooling tower and selection of optimum operative condition by MCDM-TOPSIS method". *Applied Thermal Engineering* 114:776–84.
- Lavin, David E. 1965. "The prediction of academic performance."
- Liu, Nian Cai, ve Ying Cheng. 2005. "The academic ranking of world universities". *Higher education in Europe* 30(2):127–36.
- Mehmet, APAN, ve Ahmet Öztel. 2020. "Girişim sermayesi yatırım ortaklıklarının CRITIC-PROMETHEE bütünleşik karar verme yöntemi ile finansal performans değerlendirmesi: Borsa İstanbul'da bir uygulama". *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi* (63):54–73.
- Mester, Gyula. 2011. "Academic Ranking of World Universities 2009/2010". *IPSI Journal, Transactions on Internet Research (TIR)* 7(1):44–47.
- Musani, Suhaina, ve Abdul Aziz Jemain. 2015. "Ranking schools' academic performance using a fuzzy VIKOR". S. 12036 içinde *Journal of Physics: Conference Series*. C. 622. IOP Publishing.
- Naveed, Quadri Noorulhasan, Mohamed Rafik Noor Qureshi, Nasser Tairan, AbdulHafeez Mohammad, Asadullah Shaikh, Alhuseen O. Alsayed, Asadullah Shah, ve Fahad Mazaed Alotaibi. 2020. "Evaluating critical success factors in implementing E-learning system using multi-criteria decision-making". *Plos one* 15(5):e0231465.
- Nisel, Seyhan, ve Rauf Nisel. 2013. "Using VIKOR methodology for ranking universities by academic performance". *GSTF Journal of Mathematics, Statistics and Operations Research (JMSOR)* 2(1):86.
- Özden, Ünal. 2008. "Veri zarflama analizi (VZA) ile Türkiye'deki vakıf üniversitelerinin etkinliğinin ölçülmesi". *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi* 37(2):167–85.
- URAP. y.y. "Vakıf Üniversiteleri". *University Ranking by Academic Performance 2021-2022*. Tarihinde (<https://newtr.urapcenter.org/Rankings/2021-2022/VAKIF-ÜNİVERSİTELERİ>).
- Wang, Tien-Chin, ve Hsien-Da Lee. 2009. "Developing a fuzzy TOPSIS approach based on subjective weights and objective weights". *Expert systems with applications* 36(5):8980–85.
- Wu, Hung-Yi, Jui-Kuei Chen, I. Shuo Chen, ve Hsin-Hui Zhuo. 2012. "Ranking universities based on performance evaluation by a hybrid MCDM model". *Measurement* 45(5):856–80.
- Yalcin, Nese, ve Ulaş Ünlü. 2018. "A multi-criteria performance analysis of Initial Public Offering (IPO) firms using CRITIC and VIKOR methods". *Technological and Economic development of Economy* 24(2).
- Yavuz, SAKA, ve Süleyman Yaman. 2011. "Üniversite sıralama sistemleri; kriterler ve yapılan eleştiriler". *Yükseköğretim ve Bilim Dergisi* (2):72–79.
- Yazdani, Morteza, Pascale Zarate, Edmundas Kazimieras Zavadskas, ve Zenonas Turskis. 2019. "A Combined Compromise Solution (CoCoSo) method for multi-criteria decision-making problems". *Management Decision*.
- Ying-Feng, Kuo, ve Chen Ling-Show. 2002. "Using the fuzzy synthetic decision approach to assess the performance of university teachers in Taiwan". *International journal of Management* 19(4):593.
- Zhou, Jianli, Yunna Wu, Chenghao Wu, Zhongqing Deng, Chuanbo Xu, ve Yong Hu. 2019. "A hybrid fuzzy multi-criteria decision-making approach for performance analysis and evaluation of park-level integrated energy system". *Energy Conversion and Management* 201:112134.



Sağlık Hizmetleri Performans Yönetiminde Kritik Başarı Faktörlerinin AAS Yöntemi İle Değerlendirilmesi

Evaluation of Critical Success Factors in Health Services Performance Management with ANP Method

Şeyda Gür¹ , Kübra Karakuş² , Burak Yeşilyurt² , Tamer Eren^{2*} ,

¹Harran Üniversitesi, Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksekokulu, Şanlıurfa Türkiye

²Kırıkkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale Türkiye

Başvuru/Received: 28/04/2022

Kabul / Accepted: 18/08/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Sağlık hizmetine olan rağbet gün geçtikçe artmakta olup hizmet veren kuruluşlarda buna bağlı olarak artmaktadır. Sağlık hizmetleri de hizmet sektöründeki lojistik vb. diğer kuruluşlar gibi verimliliklerini arttırmak maliyetlerini düşürmek gibi belirli hedefleri gerçekleştirmek için kurullar. Bu kurumlarda doğru, etkin ve verimli hizmet sunulması amaçlanarak daha iyiye ulaşılması hedeflenmektedir. Bu sebeple yapılan değerlendirme ile sağlık sektörünün verimliliğinin artırılmasına yönelik olarak hedeflenmiştir. Bu çalışmada Analitik Ağ Süreci yöntemi kullanılmıştır. Analitik Ağ Süreci yöntemi ile sağlık hizmetleri performans yönetiminde kritik başarı faktörleri değerlendirilmiştir. Bu hedeflere ulaşılıp ulaşamadığı, karşılaştırmalı analizler gibi performans ölçüm araçları ile belirlenir. Büyümeyi ve gelişmeyi hedefleyen sağlık kurumlarında hedefe ulaşmak için dinamik bir performans yönetiminin sağlanması gerekmektedir. Yapılan çalışma ile sağlık hizmetlerinde performans yönetiminde etkili olan faktörler ve ağırlıkları belirlenmiştir. Performans yönetiminin sağlanmasıyla birlikte sağlık kuruluşlarının genel olarak başarısının tespit edilmesi ve artırılması öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler

“Sağlık Hizmetleri, Performans Yönetimi, Başarı Faktörleri, Verim, AAS”

Abstract

The demand for health services is increasing day by day and the institutions providing services are increasing accordingly. Health services, logistics in the service sector, etc. Like other organizations, they are established to achieve certain goals, such as increasing their efficiency and reducing their costs. These institutions, it is aimed to achieve better by aiming to provide correct, effective, and efficient service. For this reason, it is aimed to increase the efficiency of the health sector with the evaluation made. In this study, the Analytical Network Process method was used. Critical success factors in health services performance management were evaluated with the Analytical Network Process method. The achievement of these goals is determined by performance measurement tools such as comparative analysis. Dynamic performance management must be provided in order to reach the target in health institutions that aim to grow and develop. The study determined the factors and weights that are effective in performance management in health services. With the provision of performance management, it is foreseen that the success of health institutions, in general, will be determined and increased.

Key Words

“Health Services, Performance Management, Success Factors, Efficiency, ANP”

1. Giriş

Performans, amacına ulaşılması istenen hedefin ne boyutta ulaşıldığını gösteren verileri çeşitli açılardan tanımlayan bir kavramdır (Yüreğir, 2007). Bu açılar sayısal olarak veya kalite olarak tanımlanabilir. Bir diğer ifadeyle tanımlamak istersek, kişilere yönelik tespit edilen yeteneklerine ve karaktere uygun olan işleri, önceden belirlenen en uygun çerçevede gerçekleştirmesidir (Uysal, 2015; Organizational Design and Hospital Performance,2020). Performans, işletmelerde liderler tarafından benimsenen önemli bir mevzudur. Performans çalışanın yaklaşımlarının bir belirtisidir. Bir bireyin ya da çalışanların, ilgili oldukları birimin, içsel ve dışsal katkılarının toplam katkısı olarak ifade edilebilir. Performans yönetimi ise, kuruluştaki tüm dengelerin faaliyet ve verimliliğini arttırmak için gerekli en önemli birim olarak düşünülmektedir (Yüreğir, 2007).

Literatüre bakıldığında birçok araştırmacı tarafından performans ölçümündeki çeşitliliğe dikkat çekilmiştir (Moers 2005). Ittner ve Larcker (1999) performans ölçütlerindeki çeşitliliğin bir kuruluşun ilerideki planlarına yansımaları ifade ederek çoklu performans ölçütleri kullanımının, performans ölçümünde eksiklikleri de getirdiğini savunmuşlardır. Moers (2005) ise performans değerlendirmesi yaparken çok yönlü ve tek yönlü olan öznel ölçütleri kullanarak bu değerlendirme sürecinde eksikliklere odaklanmıştır. Bu ölçülerin kullanımının onaylanabilirliğini yüksek başarı hedefine ulaşma ve sonraki kararlar üzerinde etkili olduğunu ifade etmiştir. Aynı şekilde Prendergast ve Topel (1993) de öznel performans değerlendirmekle birlikte bir grup dizgesel eksiklikler getirdiğini belirtmişlerdir.

Günümüzde hastane performansı kavramı araştırıldığında; kalitenin iyileştirilmesi, hastane ortaklarının memnuniyeti ve kaynakların verimli kullanılması anlaşılmaktadır (Arah 2003). Hastane performansı ile kaynakların ne kadar verimli kullanıldığı, bu kaynaklar ile ne derece kaliteli hizmet üretildiği ve hedeflerine hangi boyutta ulaşıldığı ile ilgili bir terimdir. Bu konuda sağlık hizmetlerinin hasta odaklı verilmesi ve hizmetlere ait verilerin karşılaştırılması ele alınmaktadır (Fitzpatrick ve Riordan 2016). Literatürde pek çok yazar hastane performansının hangi ölçütlere göre yapılması gerektiğini tartışmış ve tek bir ölçütün hastane performansını değerlendirmeye yetersiz olacağını belirtmiştir (Creteur ve Pochet 2002).

Hastane performansının değerlendirilmesiyle ilgili literatür araştırması yapıldığında çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan biri Veri Zarflama Analizi (VZA)'dir. Karar alma birimlerinde, işlek olmayan birimleri referans kümelerindeki bütün diğer birimler gibi işlek yapmak için gerekli olan girdi değerlerinin azaltılmasına yardımcı olmaktadır (Beylik ve Pekcan 2012). Bir diğeri ise Balanced Score Card'dır (BSC). Dengeli puan cetveli olarak bilinen bu değerlendirme aracında performans finansal, müşteri, operasyonel, öğrenme ve gelişme olarak dört boyutta ele alınmaktadır. Bu boyutlar kısa ve uzun süreli amaçlar arasında elde edilmesi gereken sonuçlar ve bu sonuçları etkileyecek sebepler arasında bir denklik oluşturulmasını sağlamaktadır (Güner 2008).

Sağlıklı bir millet için, kaynakların daha verimli ve dinamik kullanılmasında artış gözlenen istibdatlardan dolayı birden fazla ülkede sağlık sisteminin performansının ölçülmesi ve geliştirilmesi gerektiği yönünde düşünülerek bu çalışmalar sadece ulusal ölçekte değil uluslararası bir boyut kazanmıştır. Bu konuyla ilgili dönüm noktası, Dünya Sağlık Örgütü'nün 2000 yılında yayınlamış olduğu sağlık raporunda, sağlık sistemlerinin performansını değerlendirme hususundaki unsurları ayrıntılı olarak ele almış ve uluslararası karşılaştırmalara ortam hazırlamıştır (WHO 2000).

Performans yönetimi için yapılan tanımlamalara göre Ateş ve Aydın (2007), ölçülebilir hizmet için sağlık çalışanlarını olumlu etkilemek için motive etmesi, çalışanların daha verimli ve iyi işler yapmasının sağlanması ve kaliteli hizmet sunumunun teşvik edilmesi konusuna dikkat çekmişlerdir. Yine ölçülebilir hizmette Griffith (1999), sağlık kuruluşunu rekabet gücü açısından ele almış ve yönetimi iyi yapılan bir sağlık kuruluşlarında rekabet gücü artabileceğinden bahsetmiştir. Çevik (2007) ise konuya sağlık kuruluşlarını devlete bağlı olması ve özel olması açısından değerlendirmiş ve özel işletmelerde daha fazla dikkate alınmasına rağmen her iki açıdan da performans ölçümü yapılmasını gerektiğini savunmuştur. Literatürde sağlık hizmetleri hastaların sağlığı açısından önemli bir konu olarak belirtilmektedir ve verilen bu hizmetlerin kaliteli olması gerektiğine dikkat çekilmektedir. Jiang vd. (2020) bir sağlık kuruluşunun çok sayıda faktörden etkilendiğini ve sergilenen bu performansın hayati öneme sahip olduğunu belirtmişlerdir. Wallace vd. (2020) çalışması da bu faktörlere dikkat çekerek yerel halk sağlık merkezlerinde performans geliştirme üzerine yoğunlaşmıştır ve ele aldıkları bölgedeki halk sağlığı merkezleri arasında performans değerlendirmesi yapmışlardır. Campenella vd. (2021) sağlık hizmetleri performans değerlendirmesini e-sağlık hizmetleri üzerinde ele almışlardır. Taştan vd. (2022) akademik performans değerlendirmesi için analitik hiyerarşi prosesini kullanmışlardır. Gümüş vd. (2022) Borsa İstanbul'da farklı performans ölçüm araçları ile yatırım kararlarını değerlendirmişlerdir. Koçyiğit vd. (2022) hastane işletmelerinde finansal performans alanına yönelik çalışmışlardır.

Bu çalışmada sağlık hizmetleri performans yönetiminde kritik başarı faktörler incelenerek kriterler arasındaki en önemli etkenin seçilmesi hedeflenmiştir. Literatür araştırması sonucunda 14 kriter belirlenmiştir. Bu kriterlerin değerlendirmesinde Analitik ağ süreci (AAS) yöntemi kullanılmıştır. Performans ölçümü kavramı özellikle şirketlerin ya da kuruluşların uzun vadede hedeflerini gerçekleştirmede önemli bir rol oynadığı için literatürde sıklıkla ele alınan bir konudur. Karşılaştırmalı analizler gibi performans ölçüm araçları ile ele alınan kuruluş değerlendirilebilmektedir. Sağlık sektörü de kendi başına ülke gelirleri arasında önemli bir paya sahip olduğu için bu hizmeti veren kuruluşlarında performansları ayrıca önem kazanmaktadır. Sağlık sektöründeki performans değerlendirme kavramı bu çalışma içerisinde çok geniş kapsamlı kriterler açısından ele alınarak çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden AAS yöntemi ile değerlendirilerek niteliksel verileri nicele dönüştürülmesine olanak sağlamıştır. Böylece hangi

kriterin ne derece önemli olduğu görülerek bu noktalarda stratejilerin geliştirilmesi ihtimali bulunmaktadır. Ayrıca kriterlerin kendi aralarındaki etkileşimlerin de dikkate alınması hiyerarşik olarak değil de ilişkiyi gösteren ağ sistemi ile modellenmesi literatüre katkı sağlayan yönlerindedir.

Bu çalışma dört bölüme ayrılmıştır. İkinci bölümde çalışmanın çözümünde kullanılan ÇKKV tekniklerinden olan AAS yönteminden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde problem tanımlanmıştır. Dördüncü bölümde ise elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Analitik Ağ Süreci

Analitik ağ süreci, Saaty tarafından karşılaştırmalı analizler gerektiren karar verme problemleri için geliştirilmiştir (Saaty, 2004). Karar verme sürecinde etkili olan kriterler arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesi ele alınmaktadır (Şah 2010).

AAS adımları (Uslu vd., 2019):

Adım 1. Karar probleminin belirlenmesi: Bu adımda ele alınan problemin yapısı oluşturulmaktadır.

Adım 2. Ölçütlerin birbirleri ile olan ilişkilerin belirlenmesi: Ele alınan problem için kriterler ve kriterler arasındaki etkileşimlerin, ilişkilerin belirlendiği adımdır. Bu adımda amaç, kriterler ve alt kriterler net bir şekilde ifade edilmektedir.

Adım 3. Faktörler arası ikili karşılaştırmaların yapılması: ilişkileri ve etkileşimleri belirlenen kriterlerin ağ yapısı oluşturulduktan sonra kriterler arasındaki ikili karşılaştırma matrisleri kurulmaktadır. Bu adımda Saaty'nin 1-9 skalası kullanılmaktadır. Tablo 1'de Saaty'nin 1-9 skalası yer almaktadır.

Tablo 1. Saaty'nin 1-9 skalası

Değer	Tanım
1	Eşitlik
3	Az önemli
5	Oldukça önemli
7	Çok önemli
9	Son derece önemli
2,4,6,8	Ara değerler

Adım 4. Karşılaştırma matrislerinin tutarlılık kontrolü: İkili karşılaştırma matrislerinde kriterler ve alt kriterler arasındaki tüm etkileşimler dikkate alınmaktadır. 1-9 skalası kullanılarak ilişki içerisinde olan her bir kriter birbirine göre kıyaslanmaktadır. Daha sonra da öz vektör ağırlıkları hesaplanmaktadır. Öz vektör ağırlığının hesaplanması eşitlik (1) de gösterilmektedir.

$$A * w = \lambda_{max} * w \quad (1)$$

Bu değer hesaplandıktan sonra tutarlılık analizi yapılmaktadır. Tutarlılık analizlerinin amacı yapılan karşılaştırmaların sağlamlığını ve doğruluğu ölçmek içindir. Bu analiz sonucunun 0,1'den küçük olması yapılan karşılaştırmaların doğru olduğunu göstermektedir.

Adım 5. Süper matrislerin sırayla oluşturulması: Süpermatris yapısı ağ yapısındaki tüm etkileşimlerin gösterildiği yapıdır. Parçalı bir matris yapısına sahiptir. İkili karşılaştırma matrislerinden elde edilen özvektör ağırlıklarını içermektedir. Bir ağdaki bileşenler $C_h (h = 1, 2, \dots, n)$ şeklinde gösterildiğinde her bir bileşenin n_h tane ölçüte sahip olduğu bilinmektedir. Bu faktörler ise $e_{h1}, e_{h2}, e_{h3}, \dots, e_{hn}$ şeklinde gösterilmektedir. Şekil 1'de genel bir süpermatris yapısı gösterilmektedir.

$$W = \begin{matrix} & & & c_1 & & c_2 & & \dots & & c_N \\ & & & e_{11} & e_{12} & \dots & e_{21} & \dots & & e_{Nn_n} \\ c_1 & e_{11} & & & & & & & & \\ & e_{12} & & & & & & & & \\ & \vdots & & & & & & & & \\ c_2 & e_{21} & & & & & & & & \\ & \vdots & & & & & & & & \\ c_n & e_{nm_n} & & & & & & & & \end{matrix} \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & \dots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & \dots & W_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ W_{N1} & W_{N2} & \dots & \dots & W_{NN} \end{bmatrix}$$

Şekil 1. Süper matris yapısı

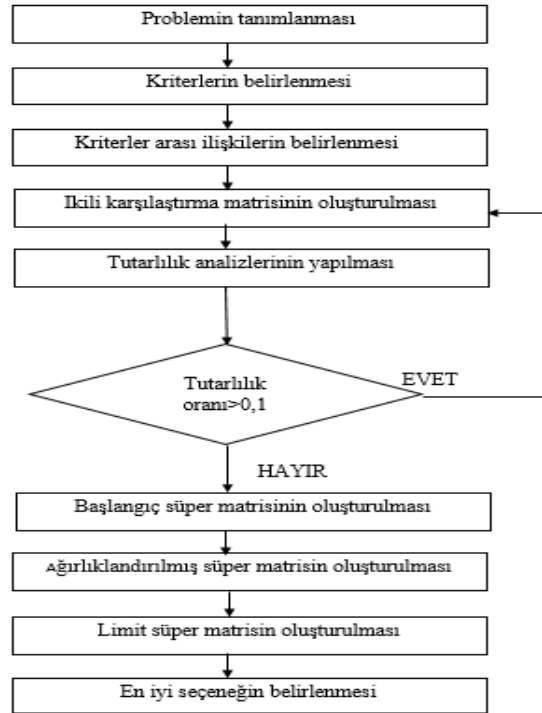
Süpermatrisin 3 formu bulunmaktadır. Bunlardan ilki ikili karşılaştırma matrislerinden elde edilen öncelik değerlerinin yer aldığı ağırlıklandırılmamış matris yapısıdır. İkincisi öncelik değerleri ile özvektör ağırlıklarının çarpılmasıyla elde edilen

ağırlıklandırılmamış matris yapısıdır. Üçüncüsü ise elde edilen matris değerlerinin birbirine yakınsaması için $(2k+1)$ sayıda üssel kuvvetlerinin alındığı limit matris yapısıdır. Buradaki k çok büyük bir sayıdır.

Adım 6. Sonuç ağırlıklarının bulunması ve en iyi seçimin yapılması: Limit matris yapısındaki değerler sonucunda alternatiflerin sıralaması yapılmaktadır. Elde edilen sonuca göre en iyi seçim yapılmaktadır.

3. Araştırmanın Amacı, Modeli ve Bulguları

Sağlık hizmetlerinin amacı toplumun sağlığı için daha verimli ve etkin bir hizmet sunmaktır. Bugünün şartlarında karşılaşılan farklılıklar sebebiyle sağlık kurumlarında başarıya olanak sağlayan unsurların arasında sağlık performansının değerlendirilmesi bulunmaktadır. Hizmet sektöründe önemli bir yeri olan sağlık kurumları elindeki mevcut insan gücü ve tıbbi ekipman kaynaklarıyla en iyi hizmeti sağlamaktadır. Ana hedef, herkese gereken sağlık hizmetini sunmak, ihtiyaç duyulan hizmeti etkin ve verimli bir şekilde sağlamak ve hizmetin her aşamada kaliteyi daha iyi hale getirmek ve hizmette eşitliği sağlamaktır. Sağlık kurumlarında çeşitli teknolojik ekipmanlarla uzmanlaşma seviyesi yükseltmek istenmektedir. Etkin ve verimli hizmet sunumu için sağlık alanındaki çalışanların doğru bir şekilde değerlendirme yapması önemsenmektedir (Karaman vd., 2019). Şekil 2’de de çalışma sürecini anlatan akış şeması yer almaktadır.



Şekil 2. Akış Şeması

Sağlık hizmetleri; bireylerin hastalık ve çeşitli rahatsızlıklardan kendini koruyarak, kişilerin ruhsal, fizyolojik ve sosyolojik açıdan uygun ve düzenli bir biçimde yaşamını idame ettirebilmesi için yapılan hizmetlerin tamamıdır. Sağlık hizmetleri; kişilerin veya toplumun sağlığını öncelikle korumak ve sonrasında geliştirmek, hastalıklarının oluşumunu ve türemesini önlemek, hastalananlara envanterleri de göz önünde bulundurarak en erken zamanda tanı koyarak tedavisini sağlamak, kusurları önlemek, sakatlananlara tıbbi ve sosyal esinlendirici hizmet sunmak ve kişilerin kaliteli, huzurlu ve sağlıklı bir yaşam idame ettirmesi için sunulan hizmetler bütünüdür (Tengilimoğlu vd. 2009). Performans değerlendirme, kurumda görevi fark etmeksizin kişilerin çalışmalarının, yeterliliklerinin, eksikliklerinin, fazlalıklarının, yetersizliklerinin her yönüyle gözden geçirilmesidir (Tengilimoğlu ve Toygar 2013). Bu çalışmanın amacı sağlık hizmetleri performans yönetiminde kritik başarı faktörlerinin değerlendirilmesidir. Hastane yöneticilerinin görüşleri ve literatür dikkate alınarak kriterler belirlenmiş olup ÇKKV tekniklerinden AAS yöntemi ile çözüm süreci geliştirilmiştir. Kriterler literatür yer alan çalışmalar dikkate alınarak ayrıca hastane yöneticileri ve sağlık alanında çalışan akademisyenlere başvurularak belirlenmiştir. Çalışma değerlendirmesine iki hastane yöneticisi ve iki sağlık alanında çalışan akademisyen katılmıştır. Bu değerlendirmeler geometrik ortalama yöntemi ile birleştirilmiştir. Bu şekilde sağlık hizmetleri performans yönetiminin değerlendirilmesine katkı sağlanacaktır. Sağlık hizmetleri performans yönetiminde kritik başarı faktörleri için belirlenen kriterler Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Kriterler ve Açıklamaları

BOYUTLAR	AÇIKLAMA	ALT BOYUT
Klinik Etki	Bir hastanenin mevcut bilgi ekranında klinik bakım veya hizmetler için hastalara en fazla yarar sağlayabilecek uygun bir performans boyutu	-Bakım süreçlerinin uygunluğu -Bakımın uygunluğu -Bakım süreçlerinin sonuçları -Etkili Hastane Hizmetleri -Verilen Hizmetlerin uygun olması
Verim	Bir hastane için, mevcut kaynaklar göz önüne alınarak, maksimum çıktının elde edilmesi.	-Bakım sonucuyla ilgili girdiler -Bakımın iyileştirilmesi -Mevcut teknolojinin kullanımı -Çalışılan ortam -Kişisel ihtiyaçlar
Personel Yönelimi	Hastane personelinin gerekli şeyleri sağlamaya uygun nitelikte olması; bakım, sürekli öğrenme ve eğitim fırsatına sahip olması; uyumlu çalışma ortamı ve çalışmalarından memnun olması gerekir.	-Sağlığın gelişimiyle ilgili çalışmalar -Güvenlik -Fiziksel tepkiler
Duyarlı Yönetim	Bir hastanenin toplumsal, fiziksel, demografik veya ekonomik ihtiyaçlar bakımından cevap verme becerisi, bakım ve koordinasyon sürekliliğinin sağlanması, yenilikçi olması.	
Emniyet	Sağlık hizmetleri sağlayıcılar sahip olduğu her şeyin güvenliğinden sorumludur.	-Hasta güvenliği -Personel güvenliği -Çevre Güvenliği
Hasta Merkezliliği	Bir hastanenin hastaları için hizmet sunumu, hastane destek ağlarına erişim, iletişim, gizlilik, hizmet sağlayıcı seçimi gibi unsurlara sahip olması	
Süreç Eşitliği	Sağlık hizmetinin adil bir şekilde olması	
Kalite	Sağlıkta en iyi en kaliteli hizmet “sürecin bütün kısımlarındaki beklenen kazançlar ve kayıplar dengesi hesaba katıldıktan sonra, hastanın iyilik halinin kapsamlı bir ölçüsünü en üst düzeye çıkarması beklenen hizmet” olarak ifade edilmektedir.	
Müşteri memnuniyeti	Bir hastanenin müşterisi hizmet verilen bireydir (Timur 2015). Sağlık kurumlarının sonuçlarından biri olan müşteri memnuniyeti, “hastaların beklediği şeylerin karşılanması veya tüm bunların üstünde hizmet verilmesi” olarak ifade edilebilir.	-Hasta Memnuniyeti -Doktorların Memnuniyeti
Takım çalışması	Hastanın sağlığıyla ilgili hem tedavi hem de tedavi sonrası ile ilgili her şeyin kontrolünün sağlanması hedeflenir. Hastanelerde sağlık ekibinin tüm hareketleri, hastanın tez zamanda sağlığına kavuşturulmasına içindir. Bu durum ekibin uyum içinde çalışmasını gerektirir.	
Etkili Bilgi Sistemler	Sağlık hizmetlerinde veri hem sürekli üretilmekte hem de sürekli kullanılmaktadır. Verinin sağlık kurumlarında verimli kullanılabilmesi için doğru bir şekilde işlenerek bilgiye çevrilmesi gerekir.	
Hukuksal Amaç	Amaç sağlık çalışanlarının hukuki çıkarlarını korumaktır. Tıbbi hata davaları için sağlık kayıtları birincil verilerdir.	
Hasta şikâyeti	Hastaya sağlanan sağlık hizmetinin her açıdan(kalite, güven vs.) düzenli olarak takip edildiği ve bunların “Hasta Şikâyet Sayısı” ile ölçüldüğü performans endeksidir.	
İletişim	Sağlık kuruluşlarında bulunan ve yararlanan bireyler arasında her zaman bir iletişim ortamı bulunur. Tıbbi geçmişi düzgün tutulan bir hastanın, sağlık kayıtları aracılığıyla da bu bilgilere istenilen zamanda erişiminin olabilmesi önemlidir. Hastanın tedavisinden sonrada iletişim önemini korur.	

Sağlık kurumları teknolojik ekipmanlarla birlikte gelişme ve yükselme yaşanan birimlerdir. Bu kurumlarda doğru, etkin ve verimli hizmet sunulması amaçlanmaktadır. Çalışmada AAS değerlendirmesi ile ortaya çıkan ağırlıklandırma, performans boyutlarının iyi

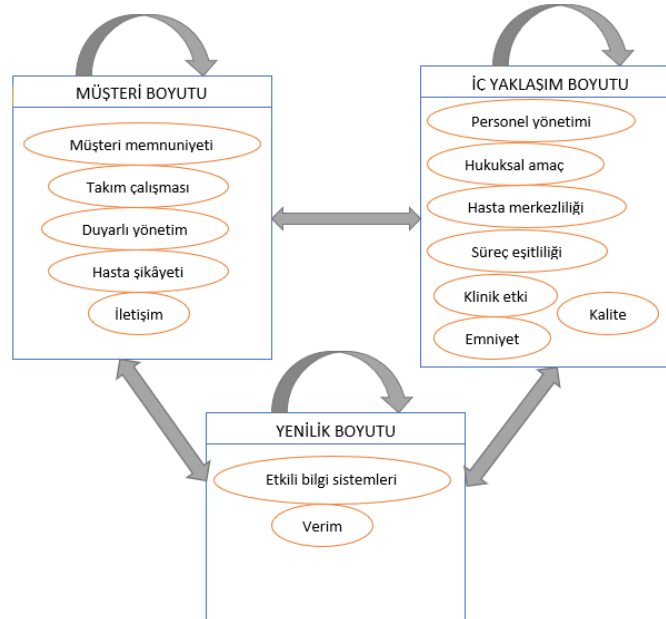
düzeyde olması sonucu ortaya çıkan verimliliktir. Sağlık kurumları bulundurmış olduğu malzeme ve ekipmanların pahalı ve kıt kaynaklar olması sebebiyle etkin ve verimli şekilde kullanarak en iyi hizmeti sunmaya çalışmaktadırlar. Sunulan hizmetin başarıya ne derece ulaştığının belirtisi ise verimliliktir. Verimlilik sağlık işletmelerinde, performansı en iyi konuma ulaştırmayı hedefler.

Sağlık kuruluşunun içinde bulundurduğu kaynakları ilgilendiren bir diğer önemli unsurda iletişimdir. İletişim, bireylerin karşılıklı olarak duygu, düşünce ve davranışlarını sözlü, yazılı veya beden hareketleri ile aktarmasıdır (Demirtaş 2010). Yani, bir bireyin kendini ifade edebileceği, aktarabileceği tüm süreçler olarak ifade edilmektedir (Shonner vd. 1949). Yöneticiler çalışanlarla etkili iletişim kurarak tüm yönetim fonksiyonlarını yerine getirebilirler. Bu durum duyarlı yönetimde yerine getirilmesinde rol oynar. İletişimin yöneticiler açısından önemi; süreç boyunca yöneticinin tüm birimler için işlevlerini yerine getirmesinde rol oynamaktadır. Sağlık yöneticilerinin iletişimi iyileştirme ve daha iyiye ulaşmak için geliştirmesi, yaşanan iletişimle alakalı sıkıntıları gidermek için, çalışanlarıyla iletişimde açık, anlaşılır ve güvenilir olmaları, dinleme odaklı olmaları gerekmektedir. Ve çalışanlarda bu konuda aynı şekilde davranmaları gerekmektedir. Çünkü sağlık kuruluşundaki yönetici ve çalışanların iletişim becerilerinin hastane performansını iyi ya da kötü olarak etkilediği düşünülmektedir.

Sağlıkta sektörde kalite, topluma verilen sağlık hizmetlerinde hedeflenen endekslere ulaşabilecek şekilde hizmetlerin verilmesidir (Bilgin ve Göral 2017). Sağlıkta hizmet kalitesi hastanın, sağlık kurumundan beklentileri ile aldığı hizmetlere dair değerlendirmeleri içermektedir. Hastalar açısından ise hizmet kalitesi, hastanın beklentilerini ya da daha fazlasını karşılaması gerekmektedir. Sağlıkta hizmet kalitesi; yönetici, çalışan ve müşteri memnuniyetini, adil bir sağlık hizmetini yani süreç eşitliliğini, takım çalışmasının sonuçlarını, hasta merkezliliğini konu almasını ve hastaya özen göstermesini, çalışan, hasta ve çevre güvenliği ile birlikte sağlık kurumunu da içeren veri bilgi sistemlerinin etkili kullanılması gibi birçok unsuru içermektedir. Özetle Kalite “Bir mal veya hizmetin ihtiyaç ve beklentileri karşılayabilme yeteneğini” ifade etmektedir.

Sağlık işletmelerinde hastaların ihtiyaçları ve bunlara bağlı olarak çeşitli beklentileri bulunmaktadır. Bireyin tedavisi süresince ihtiyaçlarına ve geçmiş deneyimlere bağlı olarak sağlık kurumlarından beklentileri oluşur. Sağlık kurumları topluma çeşitli hizmetler sunmaktadır. Bireyin beklentisi ile işletmenin verdiği hizmet karşılaştırıldığında kişinin memnuniyet derecesi ortaya çıkmaktadır. Hasta memnuniyeti her bireyde değişiklik gösterir ve her hastanın memnuniyet düzeyi farklı olmaktadır. Performans yönetiminde hasta memnuniyetine bağlı olarak gelen hasta sayısı, hasta şikâyetleri, hastaların klinik etki sonuçları ve iletişim gibi kriterleri dikkate alınmaktadır.

Belirlenen kriterler arasında ikili karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu karşılaştırmalar çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden AAS yönteminde kullanılarak kriterlerin ağırlıkları hesaplanmıştır. Bu hesaplama için Super Decision paket programından yararlanılmıştır. Kriterler arasında ilişkiler ve etkileşimler Şekil 3’ de gösterilmektedir.



Şekil 3. Kriterler Arasında İlişkiler ve Etkileşimler

Hizmet sektörünün en önemli parçalarından biri sağlık kurumlarıdır. Çalışmamızda belirlenmiş olan performans endeksleri üç ana başlık içerisinde değerlendirilmektedir. Birincisi; yenilik boyutudur. Bunlar verim ve etkili bilgili sistemlerinden oluşmaktadır. İkincisi müşteri boyutu; müşteri memnuniyeti, takım çalışması, duyarlı yönetim, hasta şikâyeti ve iletişim birimlerinden oluşmaktadır. Üçüncüsü; iç yaklaşım boyutudur. Bunlar sağlık hizmetlerinde kalite, emniyet, klinik etki, süreç eşitliği, hasta merkezliliği, hukuksal amaç ve personel yönelimidir.

Sağlık hizmetleri performans yönetiminde kritik başarı faktörlerinin AAS yöntemi ile değerlendirilmesi için kriterlerin ağ yapısına bakılmıştır. Böylece aralarında karşılaştırma matrisleri kurulmuştur. Çözümleme sonucunda kriter ağırlıkları elde edilmiştir. Ağırlıklar süper decision paket programı yardımı ile hesaplanmıştır ve Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3. AAS Yöntemi ile Kriter Ağırlıklarının Bulunması

Ana Kriter	Ana Kriter Ağırlıkları	Alt Kriter	Alt Kriter Ağırlıkları
Müşteri Boyutu	0,35	Müşteri memnuniyeti	0,31048
		Takım çalışması	0,10729
		Duyarlı Yönetim	0,16746
		Hasta şikâyeti	0,04911
		İletişim	0,36566
İç Yaklaşım Boyutu	0,273	Personel Yönelimi	0,08845
		Hukuksal amaç	0,05693
		Hasta Merkezliliği	0,12752
		Süreç Eşitliği	0,2893
		Klinik Etki	0,05027
		Kalite	0,33223
Yenilik Boyutu	0,377	Emniyet	0,0553
		Etkili bilgi sistemleri	0,10694
		Verim	0,89306

Tablo 2'de yer alan sonuçlara bakıldığında, en önemli ağırlığa sahip olan verim kriteri ön plana çıkmaktadır. Verim kriteri hastanelerin dolayısıyla da sağlık sektörünün performansını doğrudan etkileyen kriterler arasında yer almaktadır. Yöneticiler verimliliği artırıcı stratejiler belirleyerek uzun vadede hedeflerine ulaşabilmeleri mümkün görünmektedir. Bu kriteri ise iletişim kriteri takip etmektedir. İletişim kriteri yine verim kriteri etkileşimi ile performansa doğrudan etkide bulunmaktadır. Personeller arasındaki iletişimin sağlıklı olması yürütülen hizmetin doğru ve sağlam olmasını etkileyeceğinden hem sunulan hizmetten duyulan memnuniyetini arttıracak hem de böylece kuruluşların performansını arttırmış olacaktır. Bu noktada bakıldığında her bir kriterin birbirini etkilemesi sebebiyle hepsine dikkat edilerek önem derecelerine göre stratejilerin belirlenmesi sağlık kuruluşları açısından performans artırıcı etkiye sahiptir. Sağlık hizmetlerinde performans yönetimi ne kadar iyi yapılırsa hizmette o kadar başarılı olmaktadır. Performans yönetimi boyutlarından herhangi birinin dikkate alınmaması durumunda başarısızlık ortaya çıkabilir. Sağlıkta performans boyutunun ölçümü ile sağlık kurumlarının verimliliğinin ölçülmesi ve bu verimliliği artırmanın yollarını araştırılmaktadır.

4. Sonuç

Performans ölçümü, hastaneler için mevcut sistemlerin durumlarının değerlendirilmesi ve kaynakların ne derece verimli olduğunun kontrolünün sağlanmasında rol alan bir boyuttur. Hastanelerde Performans ölçümü ile sağlık hizmetlerinin daha verimli hale gelmesi için yapılan iyileştirmeler konusunda neler yapılabildiğinin ve bunun sonuçlarının, belirlenen hedeflerle karşılaştırması etkili olmaktadır. Ancak hastanelerde bulunan birçok birimin birlikte yürütülmesi, performans ölçümünü etkileyerek tüm faaliyet sonuçlarına da etkileşimde bulunmaktadır.

Ülkemizde hastanelerdeki en önemli mesele verimsizliktir. Sağlık hizmetlerinde kalite ve verimliliğin artırılması için eldeki kıt kaynakların en ideal şekilde kullanılmasını sağlamak, sağlık kurumlarındaki yöneticilere aittir. Yapılan çalışmada da sağlık hizmetlerinde performans yönetimini etkileyen kritik başarı faktörleri belirlenmiştir. Ayrıca 3 başlık altında toplanarak incelenmiştir. Müşteri boyutunda; duyarlı yönetim, müşteri memnuniyeti, takım çalışması, hasta şikâyeti, iletişim kriterleri, yenilik boyutunda; verim, etkili bilgi sistemleri kriterleri ve iç yaklaşım boyutunda; klinik etki, personel yönelimi, emniyet, hasta merkezliliği, süreç eşitliği, kalite ve hukuksal amaç kriterleri yer almaktadır. Bu kriterler birbiriyle bağlantılı olup sağlık hizmetlerinde performansın daha iyi ve verimli olması hedeflenmektedir. Verim en önemli etkidir. Verimin artması yönetime, çalışana ve hastaya bağlıdır. Hastaların sağlık hizmetinden memnun olması, yönetimin iyi ve adil bir disiplin çerçevesinde yapılması, çalışanların ister bireysel isterse birtakım olarak uyum içinde çalışması tüm performansı etkilemektedir.

ÇKKV yöntemleri ile literatürde birçok çalışma teması bulunmaktadır. Bu çalışmada da ÇKKV tekniklerden biri olan AAS yöntemi kullanılmaktadır. Yapılan değerlendirmede belirlenen kriterler, belirli literatür araştırması sonucu belirlenmiştir. Çalışmada sağlık hizmetlerinde performans yönetimini etkileyen kritik başarı faktörleri için belirlenen kriterler AAS yöntemi ile sonuçlandırılmıştır. Bu değerlendirme sonucunda belirlenen kriterler arasında sağlık hizmetlerinde performans yönetiminde en önemli kritik başarı faktörü verim olarak belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde görülmektedir ki, sağlık sektöründe verimlilik oranının yüksek olması maliyetleri, elde edilen geliri, memnuniyet oranını doğrudan etkileyerek arttırmaktadır. Dolayısıyla en yüksek ağırlığa sahip verim

kriteri dikkate alınarak sağlık kuruluşlarındaki yöneticiler verimliliği artırıcı yönde çalışmalar yapmalıdırlar. Bunlardan ilki sistem içerisindeki iletişimi kuvvetlendirmek ve bu iletişimin sürekli olarak sağlıklı olmasını sağlamaktır. Çünkü çalışanlar arasında iletişimin sağlıklı olarak yürütülmesi sisteminde sağlıklı işleme sebep olacaktır. Sunulan hizmet kalitesinde de artış sağlanmış olacaktır. Hastanelerde birçok işlev aynı anda yerine getirildiği için iletişimin önemi bu noktada ön plana çıkmaktadır. Sağlıklı iletişim de beraberinde kaliteyi getirmektedir. Bir diğer önemli kriter arasında yer alan kalite kriteri sağlık kuruluşları içerisinde hizmet kalitesi olarak ifade edilmektedir. Hizmet kalitesinin yüksek olması diğer kriterler ile ilişkilidir. Hastalarla ve diğer çalışanlar ile kurulan sağlıklı iletişim, güçlü ifade biçimleri hastanın tedavi sürecini olumlu yönde etkileyebilmektedir. Bu noktalardan bakıldığında elde edilen sonuçlar dikkate alınarak sağlık yöneticileri uzun vade planlamalarında stratejilerini oluşturmalıdırlar. Araştırmacılar ilerleyen çalışmalarda performans yönetimi için kriterlerin kapsamını genişletebilir ve farklı çözüm teknikleri kullanarak değerlendirme yapabilir. Ayrıca belirlediğimiz kriterler sağlık sektörü dışındaki kuruluşlarında performansının ölçülmesine katkıda bulunabilir. İlerleyen çalışmalar için farklı ölçüm metotları kullanılarak sonuçların karşılaştırılması yapılabilmeye de mümkündür.

Referanslar

Arah, O.A., ve Custers, T., Klazinga, N.S (2013). Updating The Key Dimensions of Hospital Performance: The Move Towards A Theoretical Framework. Third Workshop on Hospital Performance Measurement, Barcelona, 13-14.

Ateş, H., Kırılmaz, H., ve Aydın, S. (2007). Sağlık Sektöründe Performans Yönetimi: Türkiye Örneği. Asil Yayın Dağıtım, 1-498.

Beylik, U. ve Pekcan, A. Y. (2012). Eğitim ve araştırma hastanelerinde etkinlik analizleri ve değerlendirilmesi. Sağlıkta Performans ve Kalite Dergisi, 3, 119-156.

Bilgin, Y. ve Göral, M. (2017). Sağlık Kuruluşlarında Hizmet Kalitesinin Hasta Memnuniyetine Etkisi: Bartın Devlet Hastanesi Örneği. Bartın Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 8(16), 151-176.

Campanella, F., Serino, L., Mustilli, M., Crisci, A., and D'ambra, A. (2021). The evaluation of performance in the european public e-health services sector by generalized estimating equations. Socio-Economic Planning Sciences, 73, 100813.

Creteur M., ve Pochet Y. (2002). Organizational Design and Hospital Performance', Louvain School Of Management Research Institute, Working Paper, [Http://Www. Uclouvain, Be/Cps/Ucl/Doc/Íag/Documents/Wp51creteur. Pdf](http://www.uclouvain.be/Cps/Ucl/Doc/Íag/Documents/Wp51creteur.Pdf).

Çevik, H.H. (2007). "Kamu Kurum ve Kuruluşlarında Performans Yönetimi", İçinde: Sağlık Sektöründe Performans Yönetimi, (Ed.) H. Ateş vd., Ankara Aktüel Yayınları.

Demirtaş, M. (2010). Örgütsel iletişimin verimlilik ve etkinliğinde yararlanılan iletişim araçları ve halkla ilişkiler filmleri örneği. Marmara Üniversitesi İİBF Dergisi, 28(1), 411-444.

Fitzpatrick, F., and Rıordan, M.O. (2016). Performance management of clostridium difficile infection in hospitals-the carrot or stick approach? Anaerobe, 37, 8-12.

Griffith, J.R. (1999). The Well-Managed Healthcare Organization., Usa, Chicago: Illinois Aupha Press, 1-558.

Güner, M. F. (2008). Bir stratejik yönetim modeli olarak balanced scorcard. Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 10(1), 247-265.

Ittner, C. D., Larcker, D. F., Nagar, V., Rajan, M. V. (1999). Supplier selection, monitoring practices, and firm performance. Journal of Accounting and Public Policy, 18(3), .253-281.

Jiang, S., Shi, H., Lin, W., and Liu, H. C. (2020). A large group linguistic z-dematel approach for identifying key performance indicators in hospital performance management. Applied Soft Computing, 86, 105900.

Karaman, M., Karatepe, H. K., Kuşcu, F. N. (2019). Sağlık işletmelerinde performans değerlendirme ve ölçme yöntemleri hakkında bir derleme çalışması. Yönetim Ekonomi Edebiyat İslami ve Politik Bilimler Dergisi, 4(1), 153-171.

Moers F. (2005). Discretion and bias in performance evaluation: the impact of diversity and subjectivity. Accounting, Organizations and Society, 30(1), 67-80.

Organizational Design and Hospital Performance, (2020). İnternet Kaynağı: [tp://Www.Uclouvain.Be/Cps/Ucl/Doc/Íag/Documents/Wp51creteur.Pdf](http://www.uclouvain.be/Cps/Ucl/Doc/Íag/Documents/Wp51creteur.Pdf) (Erişim Tarihi: 17.07.2020).

- Prendergast C., and Topel R. (1993). Discretion and bias in performance evaluation. *European Economic Review*, 37, 355-365.
- Saaty, T. L. (2004). Decision making—the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). *Journal of systems science and systems engineering*, 13(1), 1-35.
- Shonner, Clavde and Worren Weorner. (1949). *The Mathematical Theory of Communication*, Univercity Illinois Pres, 1-131.
- Şah, N. (2010). Analitik Serim Süreci Yöntemi ile Mersin-Torino Arasındaki Güzergâh Alternatiflerinin Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, 1-92.
- Tengilimoğlu, D., Işık, O., Akbolat, M. (2009). *Sağlık İşletmeleri Yönetimi*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 1-630.
- Tengilimoğlu, D., ve Toygar, A., (2013). Hastane performansının ölçümünde path yöntemi. *Sosyal Güvenlik Dergisi*, 3(1), 50 – 70.
- Timur, B. (2015). Termal Turizmde Hizmet Kalitesi, Algılanan Destinasyon İmajı ve Tekrar Ziyaret Niyeti Arasındaki İlişkilerin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir, 1-112.
- Uslu, B., Gür, Ş., & Eren, T. (2019). Endüstri 4.0 uygulaması için stratejilerin AAS ve TOPSIS yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B-Teorik Bilimler*, 7(1), 13-28.
- Uysal, Ş. (2015). Performans yönetimi sisteminin tanımı, tarihçesi, amaç ve temel unsurlarına genel bir bakış. *Electronic Journal of Vocational Colleges*, 5(2), 32 – 39.
- Yüreğir, O. H. (2007). Performans ölçümü ve ölçüm sistemleri: genel bir bakış. *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 16(2), 545-562.
- Wallace, M., Sharfstein, J., and Lessler, J. (2020). Performance and priorities: a cross-sectional study of local health department approaches to essential public health services. *Public Health Reports*, 135(1), 97-106.
- Who (World Health Organization). (2000). *The World Health Report, Health Systems: Improving Performance*, World Health Organization Publishing, Geneva.



Hedef Programlama İle Uzaktan Eğitim Ders Programı Çizelgeleme Problemi Ve Bir Örnek Uygulama

The Problem Of Schedule Of Distance Education Lesson Schedule With Goal Programming And An Example Application

Hacı Mehmet Alakaş^{1*}, Mustafa Uğurlu¹

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 71450 Yahşihan, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 18/05/2022 **Kabul / Accepted:** 08/09/2022 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Üniversitelerde ders programı çizelgesi oluşturulması, karışık ve hazırlanması zaman alan bir süreçtir. Ders programı çizelgeleme problemi aynı zamanda ders ve bu derslerden sorumlu öğretim elemanlarının problemle ilgili kısıtlar ve kurumun özelliklerini dikkate alarak en uygun zaman dilimlerine tahsis edilmesini ifade eden bir zaman planlama problemidir. Bu çalışmada, pandemi döneminin getirmiş olduğu şartlardan dolayı eğitim sisteminin yüz yüze yapılamaması ve bunun sonucunda uzaktan eğitim ile derslerin ilerlemesi ile ilgili olarak uzaktan eğitim ders programı çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Pandemi eğitim sürecinde büyük bir değişikliğe yol açmış ve uzaktan eğitim şartlarından dolayı ele alınan problem literatürdeki diğer çalışmalara göre kısıtları farklılık göstermektedir. Ele alınan bu problemde derslerin ait oldukları sanal dersliklere atanması ve hafta sonu derslerin atanabilmesi gibi kısıtları içermektedir. Çalışmada ders programı çizelgeleme alanında yapılmış çalışmalar ele alındıktan sonra Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü ders çizelgeleme problemi analiz edilmiştir. Hafta sonu günlerine, birinci öğretim öğrencilerinin alacağı derslerin geç saatlere ve ikinci öğretim öğrencilerinin alacağı derslerin erken saatlere atanmamasını dikkat alan bir hedef programlama modeli önerilmiştir. Model bir optimizasyon programı ile çözümlenerek ders çizelgesi elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

"0-1 Tamsayı Programlama, Ders Programı Çizelgeleme, Uzaktan Eğitim, Çizelgeleme, Hedef Programlama"

Abstract

Creating a curriculum schedule in universities is a complex and time-consuming process. The syllabus scheduling problem is also a time scheduling problem that expresses the allocation of the course and the instructors responsible for these courses to the most appropriate time slots, considering the problem's constraints and the institution's characteristics. In this study, the distance education course scheduling problem is discussed concerning the fact that the education system cannot be made face-to-face due to the conditions brought by the pandemic period, and as a result, the progress of distance education and courses. The pandemic has caused a significant change in the education process, and the problem addressed due to the distance education conditions differs from other studies in the literature. This problem discussed includes constraints such as assigning the courses to the virtual classrooms they belong to and assigning the weekend courses. In the study, after the studies in the field of curriculum scheduling were discussed, the course scheduling problem of the Kırıkkale University Engineering and Architecture Faculty Industrial Engineering Department was analyzed. A goal programming model has been proposed that considers not to assign the courses to be taken by the regular teaching students to the late hours, the courses to be taken by the secondary teaching students to the early hours, and the courses to be taken on the weekend. The model was solved with an optimization program, and the course schedule was obtained.

Key Words

"0-1 Integer Programming, Course Scheduling, Distance Education, Scheduling, Goal Programming"

*Sorumlu Yazar: hmalagas@kku.edu.tr

1. Giriş

Eğitim öğretim sürecinde ders programının hazırlanması bir eğitim kurumunda öne çıkan süreçlerdendir. Etkili bir şekilde bu sürecin yönetilebilmesi için ders planının hazırlanması mümkün olduğunca iyi düzenlenmelidir. Bir akademik kurumdaki tüm operasyonel kuralları ve ihtiyaçları karşılayan, aynı zamanda personelin ve öğrencilerin birçok istek ve gereksinimlerini karşılayan bir zaman çizelgesinin oluşturulması, çizelgeyi hazırlayacak personel için önemli ancak son derece zor bir iştir. Çoğu kurumda bu görev idari bir personele bırakılmıştır ve bu mevcut uygulama, önceki yılların zaman çizelgelerinin küçük değişikliklerle tekrarlanarak oluşturulması ile sonuçlanmıştır. Ancak son yıllarda yaşanan olaylar ve gereksinimler sebebiyle bu yöntem işlevsel bir kullanım ortaya koyamamaktadır. Bu koşullar altında hem donanım hem de yazılım teknolojilerinde kaydedilen ilerlemenin ışığında bilimsel, verimli ve arzu edilir zaman çizelgeleri oluşturmak için yazılımlar geliştirilmektedir.

Genel olarak, üniversite ders çizelgeleme problemi, üniversite derslerinin haftanın beş iş günü boyunca belirli zaman dilimlerine ve kayıtlı öğrenci sayısı ile her dersin ihtiyaçlarına uygun belirli sınıflara atanması süreci olarak tanımlanmaktadır. Covid-19 ve pandemi şartları ile birlikte gelişen uzaktan eğitim modelleri yeni problemleri ortaya çıkarmıştır. Bunlardan bir tanesi de uzaktan eğitim ders programı çizelgeleme problemidir. Öğrenci, öğretim üyesi vb. kriterleri dikkate alınarak bu ders programlarının hazırlanması gerekmektedir.

Bu çalışmada pandemi ile daha çok yaygınlaşmasından dolayı ve literatürde konu ile ilgili boşluğu doldurmak amaçlanarak uzaktan eğitim ders çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Uzaktan eğitimin özel şartları da dikkate alınarak üniversitenin bir bölümü için güz dönemi derslerinin çizelgelenmesi planlanmıştır. Önerilen hedef programlama yöntemi ile problemin çözümü elde edilmiştir ve analizler sunulmuştur.

Çalışmanın ikinci bölümünde, literatürde bulunan tamsayı ve hedef programlama formülasyonlarına odaklanan zaman çizelgeleme problemlerinin kısa bir incelemesi sunulmuştur. Ardından üçüncü bölüm, modelimizin arkasındaki mantığı açıklamaktadır. Dördüncü bölümde, kullanılacak olan programlama yöntemi hakkında bilgi verilmektedir. Beşinci bölümde Kırıkkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü ile ilgili verilen derslere yönelik özellikler açıklanmakta ve problemin formülasyonu, kısıtların tam tanımını ve modelin amaç fonksiyonunu içeren kısımlar yer almaktadır. Çizelgenin, hazırlanan yazılım programından elde edilen sonucu hakkındaki yorumlar ve önerilerin olduğu kısım altıncı bölümde verilmiştir.

2. Literatür Araştırması

Ders programı çizelgeleme probleminde kullanılan yöntemler arasında, 0-1 tamsayılı matematiksel model, doğrusal matematiksel modelleme, hedef programlama, genetik algoritma, karınca kolonisi, bulanık mantık ve metasezgisel yöntemler gibi birçok yöntemin öne çıktığı görülmüştür.

Badri (1996), üniversite ders çizelgeleme probleminde 0-1 tamsayılı ve iki aşamalı çok amaçlı bir yöntem kullanmış olup ilk olarak üniversite öğretim üyelerinin derslere atanmasındaki isteklerinin en büyüklenmesi ve sonraki aşamada ise derslerin istenen zaman aralıklarına atamalarının yapılması isteklerinin en büyüklenmesi amaçlamıştır. Dimopoulou ve Miliotis (2001), hazırladıkları çalışmalarında ders ve sınav programlarının yazılım kullanılarak oluşturulması gerektiğine yoğunlaşmışlar ve bunun gerekliliğini de sürekli değişen öğrenci sayıları, öğretim üyelerinin istekleri ve zaman dilimlerine bağlı kısıtlamalar olarak göstermiştir. Sonuç olarak ise ders çizelgeleme probleminde elde ettiği çözümü ile sınav çizelgeleme probleminin bazı sezgisel yöntemlerle çözümünde kullanarak iki problem için de gerekli çizelgelerin oluşturulmasını sağlamıştır. Daskalaki ve diğerleri (2004), birçok üniversitede ders programı çizelgeleme problemini ele almak için kısıtlamalar tasarlamıştır. Çözülen problemler arasında, bazı kesin sınırlamalara ek olarak, laboratuvar dersleri gibi zaman çizelgesine çoklu atama gerektiren dersleri de dikkate alan tamsayılı bir matematiksel model oluşturmuşlardır. Daskalaki ve Birbas (2005), problem için yeni bir 0-1 tamsayılı matematiksel model geliştirerek kurdukları modelde derslerin atamalarına yönelik maliyet fonksiyonu belirlemişler ve birbirini takip eden bir saatten fazla oturum gerektiren derslerin belirli bir programda atanmasından kaynaklanan maliyeti ifade eden bir öneri sunarak minimize edilen bir yöntem kullanmışlardır. Bu yöntem ile dersler için öğretim süreleri, haftanın günleri ve hatta dersliklerle ilgili tercihlerin memnuniyetini göz önünde bulundurarak bir model amaçlanmıştır. Burke ve diğerleri (2006), belirli sayıda etkinliğin (dersler, sınavlar gibi) sınırlı sayıda zaman dilimine, kısıtlamaları karşılayacak şekilde tahsis edilmesi olarak ders programı çizelgelemeyi tanımlamıştır. Bakır ve Aksop (2008), ders programı çizelgeleme problemini çözmek için önce verileri indekslere göre alt gruplara ayırarak çözüm uzayını daraltmışlar ve daha sonra problemi en uygun şekilde çözebilmişlerdir. Chaudhuri ve De (2010), ders programı çizelgeleme probleminin çözümü için bulanık genetik sezgisel algoritma yöntemini önermişlerdir. Köçken ve diğerleri (2014), hazırladıkları modelde yapılacak atamaların, olabildiğince öğretim kalitesini arttıracak ve üniversitenin ilgili öğretim elemanlarının istekleri doğrultusunda hareket edecek nitelikte bir çalışma ortaya koymuşlardır. Demir ve Çelik (2016), unvanlarına göre öğretim üyelerinin memnuniyetini amaç edinen, daha yüksek unvana sahip bir öğretim üyesinin daha memnun olmasını hedefleyen tam sayılı doğrusal programlama ile bir model geliştirmişlerdir. Altunay ve Eren (2016), 0-1 tamsayılı modelleme yöntemi kullanarak öğretim üyelerinin tercihlerini olabilecek en üst düzeyde karşılamaya yönelik bir model geliştirerek en uygun çözüme ulaşmışlardır. Uçar ve İşleyen (2016), hazırladıkları modellerde birçok farklı senaryo ortaya koymuşlardır. Taş ve diğerleri (2018), 0-1 tamsayılı matematiksel modeli ile öğretim üyelerinin memnuniyeti göz önünde bulundurarak bir model kurmuşlardır ve modelde öğrencilerin istekleri kısıt olarak değerlendirilmiştir. Amaçlarından biri uygun ders programı oluşturulurken seçmeli derslerin çıkışma sayısını en aza indirerek

öğrencilerin seçenek sayısını artırmaktır. Song ve diğerleri (2018), ders programı çizelgeleme problemini çözmek için yinelemeli bir yerel arama algoritması geliştirerek katı kısıtlarına ek olarak, her dersin teknik olarak atanabilir bir sınıfa ve saat dilimine atanmasına ilişkin katı kısıtlamaları gevşetilmiş ve atanmamış olası birkaç derse esnek bir kısıt olarak eklemiştir. Yasari ve diğerleri (2019), iki aşamalı stokastik programlama yöntemi ile üç amaçlı derslerin iptal ve erteleme olabileceği durumlar ile ilgili bir ders programı çizelgeleme problemini ele almıştır. Ceylan ve diğerleri (2019), geliştirdiği hedef programlama modeli ile iki farklı amaca ulaşmak istemiştir. Birinci amaç, sınavlara giren öğrencilerin başarısını maksimize ederek bununla birlikte geçmiş senelerin ders başarı yüzdelelerini de dikkate alarak aynı güne atanan başarı oranı düşük sınavların birbirine yakın saat dilimlerine atanmasını engelleyen ceza matrisi kullanılmış ve birinci amaç fonksiyonunu minimize etmeye çalışmıştır. Yurtsal ve Kaynar (2019), yaptıkları çalışmada bir fakülteye ait 9 bölümün bilgilerini içeren bir dosyada bulunan bilgilerin değiştirilerek farklı eğitim kurumlarına uygulanabileceği bir program hazırlanmıştır. Khamechian ve Petering (2021), ders programı çizelgeleme probleminde, öğrencinin zamanında mezun olmasını sağlayan bir ders programı tasarlaması ile ilgili çalışma yapmışlardır. Bir bölümün ders çizelgesi planlama probleminde, öğrencilerin zamanında mezuniyetini kolaylaştırmak için bir akademik bölümün hangi yarıyılıda hangi dersleri sunacağına karar vermesi gerektiği ile ilgili bir çalışma yapmışlardır.

Literatürden edinilen bilgiler ışığında, pandemi dönemi ile birlikte uzaktan eğitim programlarının yaygınlaştığı, dolayısı ile uzaktan öğretim için dikkate alınacak kriterlerin örgün öğretime göre farklılaştığı görülmektedir. Değişen şartlar eşliğinde üniversitelerde kullanılacak uzaktan eğitim ders programı çizelgelemesi ile ilgili literatürde çalışmaya rastlanmamış olup bu çalışmanın literatürdeki bu boşluğa katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

3. Ders Programı Çizelgeleme Problemi

Ders programı çizelgeleme problemi, dersler ve bu derslerden sorumlu öğretmenlerin probleme ilişkin kısıtlar ve kurumsal özellikler dikkate alınarak en uygun derslik ve zaman dilimlerine atanmasını ifade eden bir çizelgeleme problemidir.

Hazırlanacak olan ders programı çizelgeleri, öğretmenlerin verecekleri derslerin birbiri ile çakışmamasını hedefleyerek her zaman uygulanması gereken zorunlu kısıtlar ve esnek kısıtlar olarak eğitim kurumlarının belirlediği amaçlar doğrultusunda yapılmaktadır. Zorunlu kısıtlamalar, derslerin uygun sürelerle ayrılmasını sağlayan tabloyu oluşturmak için yerine getirilmesi gereken kısıtlamalardır. Öte yandan, esnek kısıtlarda ise ifade edilen hedefler zorunlu değildir, ancak uygulanırsa çözümün kalitesinin artmasına yardımcı olur (Taş vd., 2018). Zorunlu kısıtlara örnek verecek olursak; Aynı zaman diliminde bir öğretim elemanı birden fazla ders veremez. Bir diğer örnek ise tüm dersler, ders programına haftalık ders saati kadar ataması yapılması gerekmektedir. Esnek kısıtlara örnek verecek olursak; Dersler, mümkün olabildiğince günlerin son saatlerine atanmamalıdır.

Ders programı çizelgeleme probleminin çözümünde kullanılacak gerekli bilgilerin tamamının verilerine net bir şekilde ulaşıldıktan sonra kısıtlar dahilinde bir amaç belirlenip model kurulumu yapılmalı ve çıkan sonuçların olabilirliği de kontrol edilip en uygun senaryo uygulanmalıdır. Problemin çözümü için genel olarak ihtiyaç duyulan veriler; derslerin haftalık ders saatleri, dersi veren öğretim üyesi, dersin verildiği şube bilgisi, derslerin atanabileceği sınıf sayısı ve kapasiteleri olduğu söylenebilir (Altunay ve Eren, 2016). Uzaktan eğitim ders programı çizelgeleme probleminde örgün eğitime göre dikkat çeken en büyük faktörlerden bir tanesi derslik kısıtıdır. Uzaktan eğitimde üniversitelerin sunmuş olduğu sistemlere göre sanal sınıflar yer almaktadır ve her bölüme özgü bir sanal sınıf ayrılacağı için derslik çakışması olmamaktadır. Uygulamanın yapıldığı bölümde de iki sanal sınıf bulunmaktadır.

Schaerf (1999), eğitim planlaması problemini üç gruba ayırmıştır: dersleri haftalık müfredatlara atayan ders programı çizelgeleme, üniversite derslerini haftalık müfredatlara atayan ders programı çizelgeleme ve üniversite sınav problemlerini planlayan üniversite sınav çizelgeleme problemi. Bununla birlikte Burke ve Petrovic (2004), ders programı çizelgeleme problemini iki sınıfa ayırmıştır: ders çizelgeleme ve sınav çizelgeleme. Bu çalışmada üniversite ders çizelgeleme problemi uzaktan eğitim şartları da dikkate alınarak ele alınmıştır.

4.Hedef Programlama

Kurumsal firmalar, yaptıkları işin kârını artırmak isterken maliyetlerinin en aza indirilmesi, piyasadaki hacminin artması ve ortaya konan ürünün devamlılığının sağlanması gibi farklı amaçlar edinmektedir.

Hedef programlama karar verme problemlerinin çözümünde kullanılan ve bütün özellikleri belirli olan hedeflere yönelik karar vericinin hedeflerine ulaşılmasında hedeften sapmaları minimize etmek için kullanılan analitik bir yöntemdir (Alakaş ve Yazıcı, 2021).

Hedef programlama modeli, çok amaçlı programlama modellerinin bir türüdür. Hedef programlama modelinde, amaç fonksiyonları için ulaşılmak istenen erişim değerlerini(hedefleri) karar vericinin belirlemesi ve her bir hedef fonksiyonu için sapma değişkenlerinin tanımlanması gerekir.

Hedef programlama yöntemi, matematiksel model yaklaşımlarının yaygın bir şekilde kullanılan yöntemlerindedir. Diğer matematiksel yöntemlerden en büyük farkı, karar vericiye alternatif sonuçlar da sunabilmesidir (Koçtepe vd., 2021).

Sapma değişkenleri, hedef fonksiyonlarının erişim düzeylerinden ne kadar uzaklaştığının ölçülmesini sağlar. Sapma değişkenleri, negatif ve pozitif sapma olarak iki kısımda ele alınır.

d_i^- değişkeni ile ifade edilen negatif sapma değişkeni sıfırdan farklı bir değer aldı ise ilgili hedef için belirlenen erişim düzeyinin altında bir değere ulaşıldığı; d_i^+ ile gösterilen pozitif sapma değişkeni sıfırdan farklı bir değer aldı ise ilgili hedef için belirlenen erişim düzeyinin aşıldığı söylenebilmektedir.

Eğer ilgili hedef için pozitif ve negatif sapma değişkenlerinin değeri sıfır ise, belirlenen erişim düzeyine tam olarak ulaşıldığı anlaşılır. Bir hedeften eş zamanlı olarak tek bir sapma söz konusu olduğu için, sapma değişkenlerinin negatif değer almaması gerekir. Hedef programlama modelinde; hedefler için belirlenen erişim düzeylerinden oluşabilecek istenmeyen sapmalar minimize edilir. Model genel olarak aşağıdaki gibidir:

Parametreler

Q: Hedef sayısı

P: Kısıt sayısı

M: Karar değişkeni sayısı

Z: Amaç Fonksiyonu

X_{ij} : j.işin i. kaynak tüketim miktarı

D_j : j.işin karar değişkeni

F_j : Max kaynak miktarı

d_i^- ve d_i^+ sapma değişkenleri

Amaç Fonksiyonu

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^Q (d_i^- + d_i^+) \quad (1)$$

Kısıtlar

Hedef Kısıtlar

$$\sum_{j=1}^M (X_{ij}D_j - d_i^- + d_i^+) = F_j \quad \forall i = 1 \dots Q \quad (2)$$

Sistem Kısıtları

$$\sum_{j=1}^M X_{ij}D_j = F_j \quad \forall i = Q + 1 \dots Q + P \quad (3)$$

$$d_i^-, d_i^+, D_j \geq 0, \forall i, j \quad (4)$$

5.Uzaktan Eğitim Ders Programı Çizelgeleme ve Bir Uygulama

Bu bölümde Şekil 1'de verilen akış şemasına uygun olarak problemin adımları takip edilmiştir ve her bir adımda yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir.



Şekil 1. Uzaktan Eğitim Ders Programı Çizelgeleme Problemi Uygulama Akış Şeması.

5.1. Problemin Tanımı

Bu çalışmada uzaktan eğitim ders programı çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Problemin ele alınmasındaki neden ise literatürde konu ile ilgili bir boşluk bulunması ve bunun doldurulmaya çalışılması ile birlikte pandemi sürecinde yaygınlaşan bu uzaktan eğitim sistemi için bir modele rastlanmamasıdır. Çalışmada önerilen model Kırıkkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümüne ait veriler ile test edilmiştir. Uzaktan eğitim ders programı problemi modelinin hazırlanması için bölümün 2020–2021 güz dönemi dersleri dikkate alınarak çizelge hazırlanmıştır. Uzaktan eğitim programlarının pandemi döneminde artması ile birlikte alışılmış ders programı çizelgeleme problemlerinden farklı olarak sanal sınıf ortamlarına uygun olarak belirlenen kısıtlar ve model doğrultusunda çizelge oluşturulmuştur. Derslerin en verimli şekilde işlenebilmesi öğrencilerin hafta sonu ve hafta içi belirlenen saatlere daha az dersin atandığı çizelgeler oluşturulmuştur.

5.2. Verilerin toplanması

Bölümde birinci öğretim ve ikinci öğretim olmak üzere iki programda eğitim verilmektedir. Birinci öğretim ve ikinci öğretim öğrencileri de şubelere ayrılarak toplamda 8 şubeye eğitim olanağı sağlanmaktadır (1. Sınıf birinci öğretim, 1. Sınıf ikinci öğretim, 2. Sınıf birinci öğretim, ..., 4. sınıf ikinci öğretim).

Uzaktan eğitim verilecek dersler haftanın tüm günlerinde sabah 08:00 ile 22:00 arasında olup 28 zaman diliminde verilebilmektedir. Her ders 30 dk sürmektedir. Şubelerin ders zamanlarının bir ayrımı yoktur.

Dersler uzaktan eğitim merkezi tarafından sağlanan sanal sınıflarda verilmektedir. Birinci öğretime bir adet ve ikinci öğretime bir adet olmak üzere iki adet sanal sınıf bölüm dersleri için ayrılmıştır. Yani birinci öğretime ait dört şube bir sanal sınıfta eğitim alacaktır, ikinci öğretime ait dört şube bir sanal sınıfta eğitim alacaktır.

Endüstri Mühendisliği Bölümünde öğretim programında 1. sınıflar için 9, 2. sınıflar için 7, 3. sınıflar için 7, 4. sınıflar için ise 3 ders zorunlu ve 8 ders seçmeli olmak üzere toplamda 34 ders verilmektedir (Tablo 1).

Kırıkkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünde 11'i dışardan ve 9'u bölüm içi olmak üzere 20 öğretim elemanı eğitim vermektedir. Her bir ders için haftalık ders saati, derste görevli öğretim elemanı ve dersi alan öğrenci sayılarına ilişkin veriler EK-A ve EK-B'de verilmiştir.

Tablo 1. Endüstri Mühendisliği Bölümü Güz Yarıyılı Dersleri

1.	Sınıf	2.	Sınıf	3.	Sınıf	4.	Sınıf
Endüstri Mühendisliğinde Ofis Yazılımları	Z	İş Etüdü	Z	Benzetim	Z	Üretim Sistemleri	Z
Genel Ekonomi	Z	Malzeme Bilgisi(2.sınıf)	Z	Yönetim Bilgi Sistemleri	Z	Mühendislik Ekonomisi ve Yatırım Analizi	Z
Davranış Bilimlerine Giriş	Z	Olasılık Teorisi	Z	Yöneylem Araştırması 1	Z	Atatürk İlkeleri ve İnkilap Tarihi 1	Z
Teknik Resim	Z	Bilgisayar Programlama 1	Z	Üretim Planlaması 1	Z	Montaj Hattı Dengeleme	S
Fizik 1	Z	Maliyet Muhasebesi 1	Z	İşletmelerde İletişim	Z	Mühendislikte Deney Tasarımı	S
Mühendisliğe Giriş	Z	İş Sağlığı ve Güvenliği 1	Z	Malzeme Bilgisi(3.sınıf)	Z	Enerji Sistemleri Planlaması	S
Matematik 1	Z	Lineer Cebir	Z	Gönüllülük Çalışmaları	Z	Oyun Teorisi	S
Türk Dili 1	Z					Simülasyonla Vaka Analizi	S
İngilizce 1	Z					Yalın Altı Sigma	S
						Yapay Zeka ve Uzman Sistemler	S
						Çizelgeleme	S

5.3. Varsayım ve Kabuller

Uzaktan eğitim sisteminde, 5 gün hafta içi eğitim yerine 7 gün boyunca haftanın her günü eğitim verilebilmektedir. Ancak bu durum ileride uzaktan eğitim sisteminden örgün sisteme geçişte yaşanabilecek olası problemleri ortadan kaldırmak için hafta sonuna olabildiğince az ders atanması yapılmak istenmektedir.

- Birinci öğretim öğrencilerinin akşam saat 19.00'dan sonra ve ikinci öğretim öğrencilerinin ise saat 12:30'dan önce ders atanması istenmemektedir.
- Normal ve ikinci öğretim için birer sanal sınıf verilecektir.
- Yüz yüze eğitimde 45 dakika olan her bir dersin, sanal sınıfta 30 dakika yapılması gerekmektedir.
- Sanal sınıflarda yoğunluk oluşmaması için dersler Cumartesi ve Pazar günleri de yapılabilir.
- Her bir dersin atandığı zaman diliminde o dersi verecek öğretim elemanının başka bir dersi olmaması gerekmektedir.
- Aynı zaman diliminde normal ve ikinci öğretim dersleri yapılabilir.
- Normal ve ikinci öğretim derslerinde dersi veren öğretim elemanına aynı zaman diliminde ders verilmemelidir.
- Dersler saat 08:00'da başlayıp 22:00'da son bulacaktır.
- Her bir ders haftalık ders programında belirtilen ders saati miktarınca ders programına atanmalıdır.
- Ders verimliliğinin artırılması için ise verilen derslerden 2 saat olan dersler ardışık, 3 saat olan dersler mümkün olduğunca ardışık veya 2+1, 4 saat olan dersler ise 3+1 veya 2+2 olacak şekilde atanmıştır.
- Dersi alan öğrenci sayısı fazla olan derslerin, mümkün olduğunca hafta sonuna atanması istenmektedir.

5.4. Hedef Programlama Modeli

Parametreler:

i: Dersler

j: Günler

t: Zaman Dilimleri

l: Akademisyenler

D_i : i. dersin haftalık toplam ders saati

F_i : i. dersin alan öğrenci sayısı

G_l : l. öğretim elemanının vermiş olduğu dersler kümesi

I_1 : Birinci öğretim dersleri kümesi

I_2 : İkinci öğretim dersleri kümesi

Karar değişkeni:

X_{ijt} : 1, i. ders j. günün t. ders saatine atanırsa

: 0, Diğer durumlar

Hedeften Sapma Değişkenleri:

d_{j1}^+ : j. günde ikinci öğretim öğrencilerinin tercih etmediği saatlere atanan öğrenci sayısı hedefinden pozitif sapması

d_{j1}^- : j. günde ikinci öğretim öğrencilerinin tercih etmediği saatlere atanan öğrenci sayısı hedefinden negatif sapması

d_{j2}^+ : j. günde birinci öğretim öğrencilerinin tercih etmediği saatlere atanan öğrenci sayısı hedefinden pozitif sapması

d_{j2}^- : j. günde birinci öğretim öğrencilerinin tercih etmediği saatlere atanan öğrenci sayısı hedefinden negatif sapması

d_{j3}^+ : j. günde hafta sonuna atanan öğrenci sayısı hedefinden pozitif sapma değeri

d_{j3}^- : j. günde hafta sonuna atanan öğrenci sayısı hedefinden negatif sapma değeri

Ders programı çizelgeleme probleminin çözümü için sunulan hedef programlama modeline yönelik istenen karar değişkeni; ders, gün ve zaman dilimi bilgilerini içermekte olup, 0-1 tamsayı özellikte bir değişken olarak verilmiştir.

Kısıtlar

- Bir öğretim elemanının verdiği dersler aynı ders saatine atanmamalıdır (Denklem 5).

$$\sum_{i \in G_l} X_{ijt} \leq 1 \quad \forall (j, t) \quad (5)$$

- Birinci öğretim dersleri aynı ders saatine atanmaması (Denklem 6), ve ikinci öğretim dersleri aynı ders saatine atanmaması kısıtları (Denklem 7).

$$\sum_{i \in I_1} X_{ijt} \leq 1 \quad \forall (j, t) \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I_2} X_{ijt} \leq 1 \quad \forall (j, t) \quad (7)$$

- Tüm dersler haftalık ders saatleri kadar ataması yapılmalıdır (Denklem 8).

$$\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^r X_{ijt} = D_i, \forall i \quad (8)$$

- Derslerin haftalık ders saatlerine göre ardışık olması ve bölünmemesi kısıtı. 2 saatlik dersler arka arkaya atanmalıdır ve 4 saatlik ders 2+2 şeklinde veya 3+1 şeklinde atanmalı, arasına herhangi bir ders girmemelidir. 3 saatlik dersler ise 2+1 veya 3+0 şeklinde atanmalıdır (Denklem 9).

$$X_{ijt} - X_{ij(t+1)} - X_{ij(t-1)} \leq 0; \quad \forall (i, j, t) \quad (9)$$

- Birinci öğretim öğrencilerinin saat 19.00'dan sonra ders istemediklerini içeren hedef kısıt (Denklem 10) ve ikinci öğretim öğrencilerinin saat 12:30'dan önce ders istemediklerini belirten hedef kısıt (Denklem 11).

$$\sum_{i \in I_1} \sum_{t=23}^{28} F_i * X_{ijt} - d_{j2}^+ + d_{j2}^- = 0; \quad j \in (1, \dots, 5) \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I_2} \sum_{t=1}^{10} F_i * X_{ijt} - d_{j1}^+ + d_{j1}^- = 0; \quad j \in (1, \dots, 5) \quad (11)$$

- Hafta sonuna az sayıda öğrencinin olduğu dersin atanmasını sağlayacak kısıt (Denklem 12) gibidir.

$$\sum_{i=1}^{34} \sum_{t=1}^{28} F_i * X_{ijt} - d_{j3}^+ + d_{j3}^- = 0; j \in (6,7) \quad (12)$$

Amaç Fonksiyonu

Öğrencilerden alınan istekler doğrultusunda birinci öğretim derslerinin saat 19.00'dan sonraya atanması istenmemektedir. Benzer şekilde ikinci öğretim derslerinin ise 12.30'dan önce başlaması istenmemektedir. Ayrıca, hafta sonuna da ders atanması hem öğretim elemanları hem de öğrenciler tarafından istenmemektedir. Bu istekler dikkate alınarak belirtilen saatlere atanan derslerin olabildiğince alan öğrenci sayısı az olan ders olması için ilgili sapma değişkenlerinin enküçüklenmesi hedeflenmiştir (Denklem 13).

$$\text{Min } \sum_{j=1}^7 (d_{j1}^+ + d_{j2}^+ + d_{j3}^+) \quad (13)$$

5.5. Sayısal Sonuçlar

Çalışmanın uygulama safhasında önerilen hedef programlama modeli ile Kırıkkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümünün 2020-2021 güz yarıyılına ait uzaktan eğitim ders programı hazırlanmıştır. Kırıkkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünde lisans programında güz yarıyılı döneminde verilen dersler, dersleri verecek akademisyenler, derslerin haftalık saati ve dersleri alan öğrenci sayılarına ait veriler birinci öğretim için Ek-A, ikinci öğretim için ise Ek-B'de verilmiştir.

Varsayım kısmında belirtildiği üzere 7 gün boyunca haftanın her günü eğitim verilmektedir. 68 adet ders bulunmaktadır. Derslerin her biri birbirleriyle çakışmayacak şekilde iki sanal sınıfta çizelgelenmiştir. İstenen kısıtlar doğrultusunda birinci öğretim öğrencilerinin olabildiğince saat 19.00'dan sonra, aynı şekilde ikinci öğretim öğrencilerinin de saat 12.30'dan önce ders almamaları sağlanacak şekilde çizelgeler oluşturulmuştur. 28 zaman dilimine ayrılan günlerin ders başlama saati 08.00 olup bitiş saati 22.00'dır. Her bir zaman dilimi yarım saatlik bölümden oluşmaktadır.

İlk senaryo çözümünü alırken ağırlıkları 1 olarak alıp çözüme ulaştık. İkinci senaryoda ise hedef sapma değişkenlerinden d1 ve d2 değişkenlerinin ağırlık katsayılarını 0,25 alırken, d3 hedef sapma değişkenini ise 0,5 katsayısı ile birlikte hesapladık. İkinci senaryoda bu katsayıların eklenmesi d3 değişkeninin önemini daha artırdığı için hafta sonuna ders atanması yapılmadı, öğrenciler için de öğretim elemanları için de 2 günlük boşluk oluşturulduğu görülmektedir. Birinci senaryoda ikinci senaryoya göre 3 saatlik dersleri arka arkaya atamasını daha fazla yaparken ikinci senaryoda 2+1 şeklinde atamaların daha fazla yapıldığı görülmektedir, bu da dersin verimliliğini etkileyebilir. İkinci öğretim dersleri belirlenen zaman aralığında hiç boşluk olmadan atanması iki senaryoda da yapılmıştır, bu durum oluşabilecek bir sunucu probleminde dersin ertelenmesini veya dersin o gün gerçekleşmeyeceği gibi problemler doğurabilir. Senaryolara göre atanan derslere göre amaç fonksiyonunda belirtilen hedeflerden sapan değerlerin atandığı günlerin tablosu Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Amaçtan Sapan Derslerin Günlere Göre Dağılımı

Ders	Öğrenci Sayısı	1. Senaryoda Atanan Günler	2. Senaryoda Atanan Günler
Simülasyonla Vaka Analizi	17	Salı, Cumartesi, Pazar	Çarşamba
2.ÖĞRETİM Mühendislikte Deney Tasarımı	17	Perşembe	Perşembe, Cuma
Çizelgeleme	10	Salı, Cumartesi	Çarşamba, Perşembe

6. Sonuç ve Öneriler

Üniversitelerde ders programı çizelgesi hazırlamak her dönem başı bir problem olup çeşitli kısıtlar doğrultusunda sürekli farklılık gösterebilmektedir. Son dönemlerde yaşanan salgın hastalıkları, Covid-19 pandemisi sürecinde oluşan problemler insan hayatını olumsuz etkilemiştir. Bu süreçler her alanı olduğu gibi eğitim sistemini de etkilemiş çoğu eğitim kurumu uzaktan eğitim sistemleri üzerinden eğitimlerine devam etmek zorunda kalmıştır.

Bu çalışmada Covid-19 pandemisi döneminde yaşanan uzun süreli salgın süreci boyunca çoğu eğitim kurumunun uzaktan eğitim vermesine dayanarak ve literatürde konu hakkında daha önce bir çalışma görülmemesi üzerine bu boşluğu doldurmak amacıyla bir model hazırlanmıştır.

Hazırlanan modelde öğretim programlarındaki öğrencilerin istemedikleri zaman dilimleri ve hafta sonuna az sayıda öğrencinin ders alacağı şekilde çizelge hazırlanmış olup istenilen amaca ulaşılmıştır.

Oluşan çizelge sonrası elde edilen sonuçlara bakıldığında ilk senaryoda, istenildiği gibi birinci öğretim derslerinin tamamı hafta içine yerleştirilmiş ve 19.00'dan sonra hiç ders ataması yapılmamıştır. İkinci öğretim dersleri ise hafta içi dört zaman dilimlik ders 12.30'dan önceye atanmıştır. Bu dersler dışında diğer dersler saat 12.30'dan sonraya atanmıştır. Ayrıca hafta sonuna üç zaman dilimine iki dersin atandığı görülmektedir (Çizelgeleme 1 saat, Simülasyonla Vaka Analizi Cumartesi 1 saat, Simülasyonla Vaka Analizi Pazar 1 saat). Bu derslerden Çizelgeleme dersini alan öğrenci sayısı 10, Simülasyonla Vaka Analizi dersini alan öğrenci sayısı ise 17 olup bu dersler ikinci öğretim dersleri arasında en az öğrenci sayısına sahip derslerdir.

İkinci senaryoda da aynı şekilde birinci öğretim derslerinin tamamı hafta içine yerleştirilmiş ve 19.00'dan sonra hiç ders ataması yapılmamıştır. İlk senaryoya göre burada ortaya çıkan sonuçta ikinci öğretim dersleri hafta içi altı zaman dilimlik ders olarak 12.30'dan önceye atanmıştır. İlk senaryoda hafta sonuna üç zaman dilimlik ders atanmıştı burada hafta sonuna hiç ders ataması yapılmadığı görülmüştür.

Varsayımlarımız arasında yer alan ders ardışıklığına göre atamaların yapıldığı derslerden örnekler verecek olursak; 3 saatlik ders olan ve 2. sınıf dersi olan Malzeme Bilgisi dersi iki senaryoda da ve birinci ile ikinci öğretim için oluşan ders programında kısıtlarımızdaki gibi 3 saat ardışık şekilde ataması yapılmıştır. 4 saatlik Matematik 1 dersi 2+2 şeklinde atamasının yapılmasını kısıtlarda belirttiğimiz gibi 2+2 şeklinde çizelgede yerini almıştır. 2 saatlik dersler ise tamamı ardışık olacak şekilde atamaları yapılmıştır.

Uygulama sonucunda elde edilen çizelgelere bakılarak öğrencilerin ders görmek istemedikleri zaman dilimlerine ek olarak öğretim elemanlarının da istekleri dikkate alınarak sonraki çalışmalarda geliştirilebileceği öngörülmüştür. Ek olarak uzaktan eğitim sisteminin yaygınlaşması ile ilgili ve pandemi gibi ileriki dönemlerde yaşanacak olaylara tedbir amaçlı çalışmanın uzaktan sistem ile faaliyetlerini sürdürebilecek alanlar için de kısıtlar oluşturarak geliştirileceği düşünülmektedir.

Referanslar

- Alakaş, H.M., & Yazıcı, E. (2021). Hedef Programlama ile Toplu Ulaşımında Araç Çizelgeleme Probleminin Çözümü: Kırıkkale Kampüs Hattı Örneği. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(2), 417-427.
- Altunay, H., & Eren, T. (2016). DERS PROGRAMI ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN 0-1 TAMSAYILI PROGRAMLAMA MODELİ VE BİR ÖRNEK UYGULAMA. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 21(2), 473-488.
- Badri, M.A. (1996). A two-stage multiobjective scheduling model for [faculty-course-time] assignments. *European Journal of Operational Research*, 94(1), 16-28.
- Bakır, M.A., & Aksop, C. (2008). A 0-1 INTEGER PROGRAMMING APPROACH TO A UNIVERSITY TIMETABLING PROBLEM. *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics*, 37(1), 41-55.
- Burke, E.K., & Petrovic, S. (2004). University timetabling. *Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis*, 45.
- Burke, E., Petrovic, S., & Qu, R. (2006). Case-based heuristic selection for timetabling problems. *Journal of Scheduling*, 9, 115-132.
- Ceylan, Z., Yüksel, A., Yıldız, A., & Şimşak, B. (2019). Sınav Çizelgeleme Problemi için Hedef Programlama Yaklaşımı ve Bir Uygulama. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 12(2), 942-956.
- Chaudhuri, A., & De, K. (2010). Fuzzy genetic heuristic for university course timetable problem. *Int. J. Advance. Soft Comput. Appl.*, 2(1), 100-123.
- Daskalaki, S., & Birbas, T. (2005). Efficient solutions for a university timetabling problem through integer programming. *European Journal of Operational Research*, 160(1), 106-120.
- Daskalaki, S., Birbas, T., & Housos, E. (2004). An integer programming formulation for a case study in university timetabling. *European Journal of Operational Research*, 153, 117-135.
- Demir, Y., & Çelik, C., (2016). Müfredat bazlı akademik zaman çizelgeleme probleminin çözümüne tam sayılı doğrusal programlama yaklaşımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(1), 145-159.
- Dimopoulou, M., & Miliotis, P. (2001). Implementation of a university course and examination timetabling system. *European Journal of Operational Research*, 130(1), 202-213.
- Khamechian, M., & Petering, M.E.H. (2021). A mathematical modeling approach to university course planning. *Computers & Industrial Engineering*, 168, ISSN 0360-8352.
- Koçtepe, S., Eren, T., & Cürebal, A. (2021). Hedef Programlama Yöntemi ile Akaryakıt İstasyonları Tanıtımı için Personel Çizelgeleme Problemi. *Politeknik Dergisi*, 1-1.
- Köçken, H.G., Özdemir, R. & Ahlatçioğlu, M. (2014). Üniversite ders zaman çizelgeleme problemi için ikili tamsayılı bir model ve bir uygulama. *Journal of the School of Business Administration Istanbul University*, 43(1), 28-54.
- Schaerf, A. (1999). A survey of automated timetabling. *Artificial Intelligence Review*, 13, 87-127.
- Song, T., Liu, S., Tang, X., Peng, X., & Chen, M. (2018). An iterated local search algorithm for the university course timetabling problem. *Applied Soft Computing*, 68, 597-608.
- Taş, C., Eren, T., & Bedir, N. (2018). 0-1 Tamsayılı Programlama İle Ders Programı Çizelgeleme Probleminin Çözümü: Bir Yükseköğretim Kurumunda Uygulama. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3), 166-175.
- Uçar, U.Ü., & İşleyen, S.K. (2016). TELAFİ DERSİ ÇİZELGELEME PROBLEMİNİN (TDÇP) MATEMATİKSEL MODELLE ÇÖZÜMÜ: GERÇEK BİR UYGULAMA. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), 331-346.
- Yasari, P., Ranjbar, M., Jamili, N., & Shaelaie, M.H. (2019). A two-stage stochastic programming approach for a multi-objective course timetabling problem with courses cancelation risk. *Computers and Industrial Engineering*, 130, 650-660.
- Yurtsal, A., & Kaynar, O. (2019). Ders Programı Çizelgeleme Probleminin Genetik Algoritma ile Optimizasyonu. *Journal of Information Systems and Management Research*, 1(1), 9-14.

Ekler*Ek-A. Birinci Öğretim Derslerine Ait Bilgiler*

Dersler	Öğretim Üyesi	Ders Saati	Öğrenci Sayısı	Dersler	Öğretim Üyesi	Ders Saati	Öğrenci Sayısı
Davranış Bilimlerine Giriş	A1	2	54	Genel Ekonomi	A12	2	67
Üretim Sistemleri	A2	3	100	Türk Dili 1	A13	2	41
Yapay Zeka ve Uzman Sistemler	A2	3	20	İngilizce 1	A14	2	38
Endüstri Mühendisliğinde Ofis Yazılımları	A3	3	57	Benzetim	A15	3	111
Enerji Sistemleri Planlaması	A3	3	21	Simülasyonla Vaka Analizi	A15	3	14
Lineer Cebir	A4	3	112	Olasılık Teorisi	A16	3	84
Fizik 1	A5	4	68	Mühendislikte Deney Tasarımı	A16	3	21
Atatürk İlkeleri ve İnkılap Tarihi 1	A6	2	76	Teknik Resim	A17	4	76
Matematik 1	A7	3	110	Maliyet Muhasebesi 1	A18	3	87
Malzeme Bilgisi(2.sınıf)	A8	3	66	Yönetim Bilgi Sistemleri	A18	3	92
Malzeme Bilgisi(3.sınıf)	A8	3	87	Mühendislik Ekonomisi ve Yatırım Analizi	A18	3	84
İş Sağlığı ve Güvenliği 1	A9	1	63	Üretim Planlaması 1	A19	3	91
İş Etüdü	A10	4	91	Oyun Teorisi	A19	3	21
Montaj Hattı Dengeleme	A10	3	21	Çizelgeleme	A19	3	14
Mühendisliğe Giriş	A11	2	60	Yöneylem Araştırması 1	A20	3	139
Bilgisayar Programlama 1	A11	4	102	Yalın Altı Sigma	A20	3	20
İşletmelerde İletişim	A11	2	33				
Gönüllülük Çalışmaları	A11	3	32				

Ek-B. İkinci Öğretim Derslerine Ait Bilgiler

Dersler	Öğretim Üyesi	Ders Saati	Öğrenci Sayısı	Dersler	Öğretim Üyesi	Ders Saati	Öğrenci Sayısı
Davranış Bilimlerine Giriş	A1	2	77	Genel Ekonomi	A12	2	82
Üretim Sistemleri	A2	3	74	Türk Dili 1	A13	2	76
Yapay Zeka ve Uzman Sistemler	A2	3	18	İngilizce 1	A14	2	66
Endüstri Mühendisliğinde Ofis Yazılımları	A3	3	83	Benzetim	A15	3	110
Enerji Sistemleri Planlaması	A3	3	21	Simülasyonla Vaka Analizi	A15	3	17
Lineer Cebir	A4	3	109	Olasılık Teorisi	A16	3	87
Fizik 1	A5	4	89	Mühendislikte Deney Tasarımı	A16	3	17
Atatürk İlkeleri ve İnkılap Tarihi 1	A6	2	62	Teknik Resim	A17	4	96
Matematik 1	A7	3	115	Maliyet Muhasebesi 1	A18	3	98
Malzeme Bilgisi(2.sınıf)	A8	33	71	Yönetim Bilgi Sistemleri	A18	3	95
Malzeme Bilgisi(3.sınıf)	A8	3	87	Mühendislik Ekonomisi ve Yatırım Analizi	A18	3	75
İş Sağlığı ve Güvenliği 1	A9	1	75	Üretim Planlaması 1	A19	3	104
İş Etüdü	A10	4	97	Oyun Teorisi	A19	3	19
Montaj Hattı Dengeleme	A10	3	19	Çizelgeleme	A19	3	10
Mühendisliğe Giriş	A11	2	87	Yöneylem Araştırması 1	A20	3	128
Bilgisayar Programlama 1	A11	4	106	Yalın Altı Sigma	A20	3	19
İşletmelerde İletişim	A11	2	35				
Gönüllülük Çalışmaları	A11	3	27				

Ek-C. İlk Senaryo Sonrası Birinci Öğretim İçin Oluşan Ders Programı Çizelgesi

	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma	Cumartesi	Pazar
08:00 - 08:30	Yönetim Bilgi Sistemleri	Gönüllülük Çalışmaları	Çizelgeleme	Üretim Sistemleri	Yalın Altı Sigma		
08:30 - 09:00	İş Etüdü	Malzeme Bilgisi(2. sınıf)	Bilgisayar Programlama 1	Yönetim Bilgi Sistemleri			
09:00 - 09:30	İş Etüdü	Malzeme Bilgisi(2. sınıf)	Bilgisayar Programlama 1	Yönetim Bilgi Sistemleri	İş Sağlığı ve Güvenliği 1		
09:30 - 10:00	Maliyet Muhasebesi 1	Malzeme Bilgisi(2. sınıf)	Enerji Sistemleri Planlaması	Matematik 1			
10:00 - 10:30	Maliyet Muhasebesi 1	Türk Dili 1	Enerji Sistemleri Planlaması	Matematik 1			
10:30 - 11:00	Maliyet Muhasebesi 1	Türk Dili 1	Enerji Sistemleri Planlaması	Teknik Resim	Üretim Sistemleri		
11:00 - 11:30	Genel Ekonomi	Montaj Hattı Dengeleme		Teknik Resim	Üretim Sistemleri		
11:30 - 12:00	Genel Ekonomi	Montaj Hattı Dengeleme	Yalın Altı Sigma	Çizelgeleme	Malzeme Bilgisi(3. sınıf)		
12:00 - 12:30	Fizik 1	Montaj Hattı Dengeleme	Yalın Altı Sigma	Çizelgeleme	Malzeme Bilgisi(3. sınıf)		
12:30 - 13:00	Fizik 1	Matematik 1			Malzeme Bilgisi(3. sınıf)		
13:00 - 13:30		Matematik 1	İngilizce 1	Teknik Resim	Benzetim		
13:30 - 14:00	Endüstri Mühendisliğinde Ofis Yazılımları		İngilizce 1	Teknik Resim	Benzetim		
14:00 - 14:30	Endüstri Mühendisliğinde Ofis Yazılımları		Lineer Cebir	Davranış Bilimlerine Giriş	Benzetim		
14:30 - 15:00	Endüstri Mühendisliğinde Ofis Yazılımları	Simülasyonla Vaka Analizi	Lineer Cebir	Davranış Bilimlerine Giriş	Yöneylem Araştırması 1		
15:00 - 15:30		Simülasyonla Vaka Analizi	Lineer Cebir	Yapay Zeka ve Uzman Sistemler	Yöneylem Araştırması 1		
15:30 - 16:00	Mühendislik Ekonomisi ve Yatırım Analizi	Simülasyonla Vaka Analizi		Yapay Zeka ve Uzman Sistemler	Yöneylem Araştırması 1		
16:00 - 16:30	Mühendislik Ekonomisi ve Yatırım Analizi	Gönüllülük Çalışmaları	Olasılık Teorisi	Yapay Zeka ve Uzman Sistemler	İşletmelerde İletişim		
16:30 - 17:00	Mühendislik Ekonomisi ve Yatırım Analizi	Gönüllülük Çalışmaları	Olasılık Teorisi	Mühendisliğe Giriş	İşletmelerde İletişim		
17:00 - 17:30	Atatürk İlkeleri ve İnkılap Tarihi 1	Fizik 1	Olasılık Teorisi	Mühendisliğe Giriş			
17:30 - 18:00	Atatürk İlkeleri ve İnkılap Tarihi 1	Fizik 1	Üretim Planlaması 1	Oyun Teorisi	Mühendislikte Deney Tasarımı		
18:00 - 18:30	Bilgisayar Programlama 1	İş Etüdü	Üretim Planlaması 1	Oyun Teorisi	Mühendislikte Deney Tasarımı		
18:30 - 19:00	Bilgisayar Programlama 1	İş Etüdü	Üretim Planlaması 1	Oyun Teorisi	Mühendislikte Deney Tasarımı		
19:00 - 19:30							
19:30 - 20:00							
20:00 - 20:30							
20:30 - 21:00							
21:00 - 21:30							
21:30 - 22:00							

Ek-D. İlk Senaryo Sonrası İkinci Öğretim İçin Oluşan Ders Programı Çizelgesi

	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma	Cumartesi	Pazar
08:00 - 08:30		Simülasyonla Vaka Analizi		Mühendislikte Deney Tasarımı		Çizelgeleme	Simülasyonla Vaka Analizi
08:30 - 09:00							
09:00 - 09:30							
09:30 - 10:00							
10:00 - 10:30		Çizelgeleme					
10:30 - 11:00		Çizelgeleme					
11:00 - 11:30							
11:30 - 12:00							
12:00 - 12:30							
12:30 - 13:00	Mühendislikte Deney Tasarımı						
13:00 - 13:30	Mühendislikte Deney Tasarımı	Mühendislik Ekonomisi ve Yatırım Analizi	Malzeme Bilgisi(3. sınıf)	İş Sağlığı ve Güvenliği 1	Mühendisliğe Giriş		
13:30 - 14:00	Üretim Sistemleri	Mühendislik Ekonomisi ve Yatırım Analizi	Malzeme Bilgisi(3. sınıf)	Lineer Cebir	Mühendisliğe Giriş		
14:00 - 14:30	Üretim Sistemleri	Matematik 1	Olasılık Teorisi	Lineer Cebir	Türk Dili 1		
14:30 - 15:00	Üretim Sistemleri	Matematik 1	Olasılık Teorisi	Lineer Cebir	Türk Dili 1		
15:00 - 15:30	Yalın Altı Sigma	Yönetim Bilgi Sistemleri	Benzetim	Atatürk İlkeleri ve İnkılap Tarihi 1	Malzeme Bilgisi(2. sınıf)		
15:30 - 16:00	Yalın Altı Sigma	Yönetim Bilgi Sistemleri	Benzetim	Atatürk İlkeleri ve İnkılap Tarihi 1	Malzeme Bilgisi(2. sınıf)		
16:00 - 16:30	Yalın Altı Sigma	Yönetim Bilgi Sistemleri	Benzetim	Fizik 1	Malzeme Bilgisi(2. sınıf)		
16:30 - 17:00	Üretim Planlaması 1	Teknik Resim	Endüstri Mühendisliğinde Ofis Yazılımları	Fizik 1	Yapay Zeka ve Uzman Sistemleri		
17:00 - 17:30	Üretim Planlaması 1	Teknik Resim	Endüstri Mühendisliğinde Ofis Yazılımları	Teknik Resim	Yapay Zeka ve Uzman Sistemleri		
17:30 - 18:00	Üretim Planlaması 1	İşletmelerde İletişim	Endüstri Mühendisliğinde Ofis Yazılımları	Teknik Resim	Yapay Zeka ve Uzman Sistemleri		
18:00 - 18:30	Davranış Bilimlerine Giriş	İşletmelerde İletişim	Bilgisayar Programlama 1	Enerji Sistemleri Planlaması	Oyun Teorisi		
18:30 - 19:00	Davranış Bilimlerine Giriş	İngilizce 1	Bilgisayar Programlama 1	Enerji Sistemleri Planlaması	Oyun Teorisi		
19:00 - 19:30	Montaj Hattı Dengeleme	İngilizce 1	Fizik 1		Oyun Teorisi		
19:30 - 20:00	Montaj Hattı Dengeleme	İş Etüdü	Fizik 1	Maliyet Muhasebesi 1	İş Etüdü		
20:00 - 20:30	Montaj Hattı Dengeleme	İş Etüdü	Yöneylem Araştırması 1	Maliyet Muhasebesi 1	İş Etüdü		
20:30 - 21:00	Bilgisayar Programlama 1	Genel Ekonomi	Yöneylem Araştırması 1	Maliyet Muhasebesi 1	Gönüllülük Çalışmaları		
21:00 - 21:30	Bilgisayar Programlama 1	Genel Ekonomi	Yöneylem Araştırması 1	Matematik 1	Gönüllülük Çalışmaları		
21:30 - 22:00	Malzeme Bilgisi(3. sınıf)	Olasılık Teorisi	Gönüllülük Çalışmaları	Matematik 1	Mühendislik Ekonomisi ve Yatırım Analizi	Simülasyonla Vaka Analizi	

Ek-E. İkinci Senaryo Sonrası Birinci Öğretim İçin Oluşan Ders Programı Çizelgesi

	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma	Cumartesi	Pazar
08:00 - 08:30	Enerji Sistemleri Planlaması	Çizelgeleme	Maliyet Muhasebesi 1	Montaj Hattı Dengeleme	Yöneylem Araştırması 1		
08:30 - 09:00	İş Etüdü		Yapay Zeka ve Uzman Sistemler	Teknik Resim	Lineer Cebir		
09:00 - 09:30	İş Etüdü	İş Etüdü	Yapay Zeka ve Uzman Sistemler	Teknik Resim	Lineer Cebir		
09:30 - 10:00	Matematik 1	İş Etüdü	Yapay Zeka ve Uzman Sistemler	Gönüllülük Çalışmaları	Lineer Cebir		
10:00 - 10:30	Matematik 1	Benzetim		Gönüllülük Çalışmaları	Genel Ekonomi		
10:30 - 11:00	Mühendislik Ekonomisi ve Yatırım Analizi	Benzetim	Çizelgeleme	Gönüllülük Çalışmaları	Genel Ekonomi		
11:00 - 11:30	Mühendislik Ekonomisi ve Yatırım Analizi	Benzetim	Çizelgeleme	Montaj Hattı Dengeleme	Fizik 1		
11:30 - 12:00	Mühendislik Ekonomisi ve Yatırım Analizi	Malzeme Bilgisi(3.sınıf)	Yönetim Bilgi Sistemleri	Montaj Hattı Dengeleme	Fizik 1		
12:00 - 12:30	Maliyet Muhasebesi 1	Malzeme Bilgisi(3.sınıf)	Yönetim Bilgi Sistemleri	Davranış Bilimlerine Giriş	Atatürk İlkeleri ve İnkılap Tarihi 1		
12:30 - 13:00	Maliyet Muhasebesi 1	Malzeme Bilgisi(3.sınıf)	Yönetim Bilgi Sistemleri	Davranış Bilimlerine Giriş	Atatürk İlkeleri ve İnkılap Tarihi 1		
13:00 - 13:30	Bilgisayar Programlama 1		İngilizce 1	Endüstri Mühendisliğinde Ofis Yazılımları	Yalın Altı Sigma		
13:30 - 14:00	Bilgisayar Programlama 1	Simülasyonla Vaka Analizi	İngilizce 1	Endüstri Mühendisliğinde Ofis Yazılımları	Yalın Altı Sigma		
14:00 - 14:30		Simülasyonla Vaka Analizi	İşletmelerde İletişim	Endüstri Mühendisliğinde Ofis Yazılımları	Yalın Altı Sigma		
14:30 - 15:00		Simülasyonla Vaka Analizi	İşletmelerde İletişim	Mühendislikte Deney Tasarımı	Enerji Sistemleri Planlaması		
15:00 - 15:30	İş Sağlığı ve Güvenliği 1	Oyun Teorisi		Mühendislikte Deney Tasarımı	Enerji Sistemleri Planlaması		
15:30 - 16:00	Matematik 1	Oyun Teorisi	Türk Dili 1	Mühendislikte Deney Tasarımı	Bilgisayar Programlama 1		
16:00 - 16:30	Matematik 1	Oyun Teorisi	Türk Dili 1		Bilgisayar Programlama 1		
16:30 - 17:00	Olasılık Teorisi	Mühendisliğe Giriş		Teknik Resim			
17:00 - 17:30	Olasılık Teorisi	Mühendisliğe Giriş		Teknik Resim			
17:30 - 18:00	Olasılık Teorisi	Üretim Planlaması 1	Malzeme Bilgisi(2.sınıf)		Üretim Sistemleri		
18:00 - 18:30	Yöneylem Araştırması 1	Üretim Planlaması 1	Malzeme Bilgisi(2.sınıf)	Fizik 1	Üretim Sistemleri		
18:30 - 19:00	Yöneylem Araştırması 1	Üretim Planlaması 1	Malzeme Bilgisi(2.sınıf)	Fizik 1	Üretim Sistemleri		
19:00 - 19:30							
19:30 - 20:00							
20:00 - 20:30							
20:30 - 21:00							
21:00 - 21:30							
21:30 - 22:00							

Ek-F. İkinci Senaryo Sonrası İkinci Öğretim İçin Oluşan Ders Programı Çizelgesi

	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma	Cumartesi	Pazar
08:00 - 08:30			Simülasyonla Vaka Analizi	Çizelgeleme	Mühendislikte Deneysel Tasarım		
08:30 - 09:00							
09:00 - 09:30							
09:30 - 10:00							
10:00 - 10:30							
10:30 - 11:00							
11:00 - 11:30							
11:30 - 12:00			Çizelgeleme				
12:00 - 12:30			Çizelgeleme	Mühendislikte Deneysel Tasarım			
12:30 - 13:00			Simülasyonla Vaka Analizi	Mühendislikte Deneysel Tasarım			
13:00 - 13:30	Fizik 1	Bilgisayar Programlama 1	Simülasyonla Vaka Analizi	İşletmelerde İletişim	Yapay Zeka ve Uzman Sistemler		
13:30 - 14:00	Fizik 1	Bilgisayar Programlama 1	İş Sağlığı ve Güvenliği 1	İşletmelerde İletişim	Yapay Zeka ve Uzman Sistemler		
14:00 - 14:30	Matematik 1	Üretim Sistemleri	Türk Dili 1	Yönetim Bilgi Sistemleri	Olasılık Teorisi		
14:30 - 15:00	Matematik 1	Üretim Sistemleri	Türk Dili 1	Yönetim Bilgi Sistemleri	Olasılık Teorisi		
15:00 - 15:30	Teknik Resim	Üretim Sistemleri	Genel Ekonomi	Atatürk İlkeleri ve İnkılap Tarihi 1	Olasılık Teorisi		
15:30 - 16:00	Teknik Resim	Benzetim	Genel Ekonomi	Atatürk İlkeleri ve İnkılap Tarihi 1	Oyun Teorisi		
16:00 - 16:30	Malzeme Bilgisi(2.sınıf)	Benzetim	Bilgisayar Programlama 1	Enerji Sistemleri Planlaması	Oyun Teorisi		
16:30 - 17:00	Malzeme Bilgisi(2.sınıf)	Malzeme Bilgisi(3.sınıf)	Bilgisayar Programlama 1	Enerji Sistemleri Planlaması	Oyun Teorisi		
17:00 - 17:30	Malzeme Bilgisi(2.sınıf)	Malzeme Bilgisi(3.sınıf)	Mühendislik Ekonomisi ve Yatırım Analizi	Enerji Sistemleri Planlaması	İngilizce 1		
17:30 - 18:00	Gönüllülük Çalışmaları	Malzeme Bilgisi(3.sınıf)	Mühendislik Ekonomisi ve Yatırım Analizi	Üretim Planlaması 1	İngilizce 1		
18:00 - 18:30	Gönüllülük Çalışmaları	İş Etüdü	Mühendislik Ekonomisi ve Yatırım Analizi	Üretim Planlaması 1	Mühendisliğe Giriş		
18:30 - 19:00	Gönüllülük Çalışmaları	İş Etüdü	Fizik 1	Endüstri Mühendisliğinde Ofis Yazılımları	Mühendisliğe Giriş		
19:00 - 19:30	Yalın Altı Sigma	Davranış Bilimlerine Giriş	Fizik 1	Endüstri Mühendisliğinde Ofis Yazılımları	İş Etüdü		
19:30 - 20:00	Yalın Altı Sigma	Davranış Bilimlerine Giriş	Matematik 1	Endüstri Mühendisliğinde Ofis Yazılımları	İş Etüdü		
20:00 - 20:30	Yalın Altı Sigma	Yönetim Bilgi Sistemleri	Matematik 1	Maliyet Muhasebesi 1	Montaj Hattı Dengeleme		
20:30 - 21:00	Teknik Resim	Yönetim Bilgi Sistemleri	Lineer Cebir	Maliyet Muhasebesi 1	Montaj Hattı Dengeleme		
21:00 - 21:30	Teknik Resim	Yönetim Bilgi Sistemleri	Lineer Cebir	Maliyet Muhasebesi 1	Montaj Hattı Dengeleme		
21:30 - 22:00	Üretim Planlaması 1	Yöneylem Araştırması 1	Yapay Zeka ve Uzman Sistemler	Lineer Cebir	Benzetim		



Perovskit Güneş Hücreleri için c-TiO₂ Optimizasyonu

Optimization of c-TiO₂ for Perovskite Solar Cells

Elif Damgacı¹ , Ayşe Seyhan^{2*} 

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi / Makine Mühendisliği Bölümü, 51200 / Niğde, Türkiye

²Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi / Fizik Bölümü, 51200 / Niğde, Türkiye

Başvuru/Received: 30/05/2022

Kabul / Accepted: 02/08/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Yüksek verimli perovskit güneş hücresi elde etmek için iğne deliği içermeyen, ince, yüksek şeffaflıkta, mükemmel taşıyıcı ayırma kabiliyetine sahip, üretimi kolay elektron transfer tabakasına (ETL) sahip olması gereklidir. ETL malzemesi olarak hem kompakt (c-TiO₂) hem de mezo (mp-TiO₂) yapılı olarak kullanılabilen TiO₂'dir. Bu çalışmada üretilen ETL, c-TiO₂'in sol-jel yöntemiyle hazırlanmıştır ve farklı dönme hızlarında dönele kaplama yöntemi kullanılarak kaplanmıştır. Kaplanan ince filmlerden perovskit güneş hücreleri için en ideal kalınlıkta, iğne deliği içermeyen aktif kristalli elektron transfer tabakası belirlenerek SEM, XRD ve profilometre yardımıyla karakterize edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Elektron Transfer Tabakası, Kompakt TiO₂, Perovskit, Güneş Hücresi ”

Abstract

In order to fabricate a high-efficiency perovskite solar cell, it is necessary to include the electron transfer layer (ETL) which is thin, high transparent, easy-to-manufacture and does not contain iğne deliği. TiO₂ is a good candidate to be used as an ETL material in both compact (c-TiO₂) and meso (mp-TiO₂) structures. In this study, the produced ETL was prepared by the sol-gel method of c-TiO₂ and coated using the spin coating method at different rotational speeds. From the characterization of coated thin films, the optimum thickness of ETL for perovskite solar cells and active crystalline electron transfer layer without iğne deliği was confirmed by SEM, XRD, and profilometer analysis.

Key Words

“Electron Transport Layer, Compact TiO₂, Perovskite, Solar cell ”

1. Giriş

Perovskitin olağanüstü optik ve elektriksel özellikleri ile perovskit güneş hücrelerinin pratik üretim süreci bu hücrelerin kısa süre içerisinde verim değerinde %3.8 den %25.7'e rekor artışını sağlamıştır (NREL, 2022). Bu yüzden Perovskit güneş hücreleri birçok bilim adamının ve ticari şirketlerin ilgi odağı haline gelmiş ve bu durum hücreler üzerine çalışmaları arttırmıştır. Perovskitin bu eşsiz özelliklerinin yanı sıra hala optimize edilmesi gereken bir çok parametre vardır. Bu parametrelerden biri hücre verimliliği için kritik bir rol oynayan elektron transfer tabakasıdır (ETL). Perovskit güneş hücrelerinde ETL'nin temel amacı ışığı soğuran perovskit katmanından elektronların ekstraksiyon verimliliğini arttırmak ve boşluğu bloke etmek için perovskit katmanı ile elektron seçici bir temas oluşturmaktır. Perovskit güneş hücrelerindeki elektron transfer tabakasının optimizasyonu üzerine yapılan çalışmaların çoğu ETL'lerin yeni üretim yöntemleriyle verimliliğin iyileştirilmesi için yüzey modifikasyonu üzerine yapılan çalışmalardır. Perovskit güneş hücre verimliliği için ETL malzemesinin seçimi önemlidir. Perovskit güneş hücrelerinde TiO_2 , SnO_2 , PCBM, PEDOT: PSS gibi farklı organik ve inorganik (Jung vd., 2015, Chiang vd., 2016, Kim vd., 2020) elektron taşıma malzemeleri kullanılmıştır. TiO_2 , perovskit güneş hücreleri için metal oksit malzeme (Yang vd., 2017, Saliba vd., 2016) olarak en çok kullanılan yüksek verimlilik sağlayan inorganik elektron transfer tabakasıdır. TiO_2 , çok kullanışlı yarı iletken geçiş metal oksit olmasının yanı sıra fotokimyasal ve kimyasal erozyona karşı dirençli, kolay kullanımlı, ucuz ve toksik olmama gibi özelliklere sahiptir. Bu özellikler TiO_2 'i güneş hücrelerinde, kimyasal sensörlerde, kendi kendini temizleyen yüzeyler ve çevresel arıtma uygulamaları için avantajlı bir malzeme haline getirmiştir (Hoffmann vd., 1995). TiO_2 'nin fotokatalitik aktivitesi en belirgin özelliklerinden biridir ve büyük ölçüde kristal faz, kristal boyut ve spesifik yüzey alanı gibi özellikler tarafından belirlenir. Bu özelliklerin TiO_2 'nin fotokatalitik aktivitesi üzerindeki etkisi bir çok araştırma grubu tarafından incelenmiştir. (Li vd., 2005, Yazid vd.,). TiO_2 , hem kristal hem de amorf formda ve temel olarak anataz, rutil ve brokit olmak üzere üç kristal polimorfda bulunur. Anataz ve rutil tetragonal bir yapıya sahipken, brokit ortorombik bir yapıya sahiptir (Fujishima vd., 1999). TiO_2 'in perovskit güneş hücreleri için bir ETL olarak minimum iletim bandının (CBM), MAPbI_3 'den biraz daha yüksek olması (Oregon ve Gratzel, 1991) ve TiO_2 'in ultraviyole (UV) ışınlarına hassas olması (Park vd., 2014) perovskit güneş hücrelerinin ticarileştirilmesi için uygun olmayan bazı sınırlamalar göstermektedir. Bu kusurlarına rağmen TiO_2 bant hizalaması uyumu ve yüksek geçirgenlik özellikleri sayesinde genellikle yüksek verimli perovskit güneş hücreleri üretiminde kullanılır. Perovskit güneş hücrelerinde iki tür elektron taşıma tabakası vardır. Bunlardan biri yoğun yapısı ile kompakt yapısı diğeri ise gözenekli yapısı ile mezo yapı ETL'dir. TiO_2 , hem kompakt hemde mezo gözenekli yapı ile kullanılan en yaygın ETL tabakası olma özelliğini taşımaktadır. Yüksek verimli güneş hücresi üretilmesi için iğne boşluk (iğne deliği) yapısı içermeyen ve perovskit katmanının pürüzsüz şekilde kaplanması gerekmektedir. Perovskit ve boşluk taşıma katmanında (HTL) oluşan iğne deliği yapılarını kısa devreye sebep olmaktadır (Peng vd., 2004). Bunu engellemek için bloke edici katman olarak bilinen kompakt TiO_2 (c- TiO_2), titanyum öncü çözeltisi kullanılarak döndürmeli kaplama veya sprey piroliz gibi yöntemlerle kaplanmaktadır. c- TiO_2 , yüksek şeffaflığı, mükemmel taşıyıcı ayırma kabiliyeti ve kolay üretim süreci nedeniyle yüksek verimli perovskit güneş hücrelerinde yaygın olarak kullanılır (Yang vd., 2017). İlk olarak 2009 yılında Kojima ve arkadaşları, TiO_2 üzerine $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ (metil amonyum kurşun bromür) kaplamış ve organometal halit perovskite hücrelerde bromla %3.81 verimlilik elde etmişlerdir (Kojima vd., 2009). Daha sonra Im ve arkadaşları TiO_2 üzerine α -bturolakton çözücüsü ile hazırladıkları $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ ve $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_2$ kuantum nokta güneş hücrelerini incelerken perovskite malzemeye farklı tavlama sıcaklıkları uygulayarak optimum tavlama sıcaklığını 100°C 'de $J_{sc}=13,76 \text{ mA/cm}^2$ $V_{oc}=0.617 \text{ V}$, $\text{FF}=0.557$ ve $\text{PCE}=\%4.73$ olarak ölçülmüştür. Optimum sıcaklık belirlendikten sonra kalınlık değerleri üzerine çalışma yapıp 3.6, 5.5, 8.6 μm kalınlıklı TiO_2 'in en iyi verimi 3.6 μm kalınlıkta % 6.20 verimlilikle sağladığını tespit etmişlerdir (Park vd., 2011). Lee ve arkadaşları adı "süper yapı güneş hücreleri" olarak geçen kızıl ötesi soğurma bölgesine yakın, geniş soğurma aralığına sahip soğurucu olarak $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, elektron taşıyıcı tabaka olarak TiO_2 ve boşluk taşıyıcı olarak spiro-MeOTAD kullanarak %8'lik bir verim elde etmişler (Michael vd., 2012). 2014 yılında Snaith ve ekibi titanyum diizopropoksit bis(asetilasetonat) (TiAcAc) ilavesiyle alkollü bir çözücü içinde dağılmış yüksek kristalli küçük nanoparçacık anataz TiO_2 'den oluşan kompakt bir tabakanın düşük sıcaklıkta üretimini yapmıştır. Optimize edilmiş formülasyonlarıyla tamamen düşük sıcaklıkta işlenmiş güneş hücrelerinden %15,9 verimlilik elde etmişlerdir (Wojciechowski vd., 2014). 2015 yılında ise Yang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada formamidinyum kurşun iyodür (FAPbI_3) kullanarak verimi %20 değerlerine taşımışlardır. Aynı çalışma grubu 2017 yılında ise organik katyon çözeltisi içerisine ilave iyot iyonları eklenerek verimi yüzde 2 arttırarak %22.1 değerine çıkarmışlardır. Farklı kompakt TiO_2 bloke edici katmanlara dayalı perovskite güneş hücrelerinin fotovoltaiik performansını gösteren çalışmalar Tablo 1'de verilmiştir (Woon vd., 2015 ve Woon vd., 2017). Li ve arkadaşları (2017) c- TiO_2 'in kalınlık değerinin perovskit güneş hücrelerinde verim üzerine etkisini araştırma yapmıştır (Li vd., 2017). Yapılan çalışmada sırasıyla 35, 45, 60, 65 ve 80 nm 'de sırasıyla % 4.6, %5, %6.3 ve % 5.8 verim değerlerini elde etmişlerdir.

Tablo 1. Sol-Jel Yöntemiyle Üretilen Kompakt TiO₂ Literatür Tablosu

Kaplama Hızı ve süresi	Kalınlık	Verim%	Referans
2500 rpm, 45s	65 nm	%8.40	Wu vd., 2015
3000 rpm, 30s	50 nm	%17.32	Quin vd, 2017
2000 rpm, 30s	75 nm	%15.7	Guo vd, 2016
4000 rpm, 15s	60-90 nm	%26-31	Slawek vd, 2021

Bu çalışmanın amacı iğne deliği'den bağımsız kaliteli ETL katmanlarının elde edilmesidir. Bu amaç doğrultusunda FTO üzerine c-TiO₂ elektron transfer tabakası solüsyon bazlı hazırlanmış olup dönel kaplama cihaz yardımıyla kaplanmıştır. Kaplanan ETL tabakalarının kalınlık, mikro yapı ve faz analizleri SEM ve XRD ile incelenerek hücre verimliliğini etkileyen değerlerine göre optimizasyonu yapılmıştır.

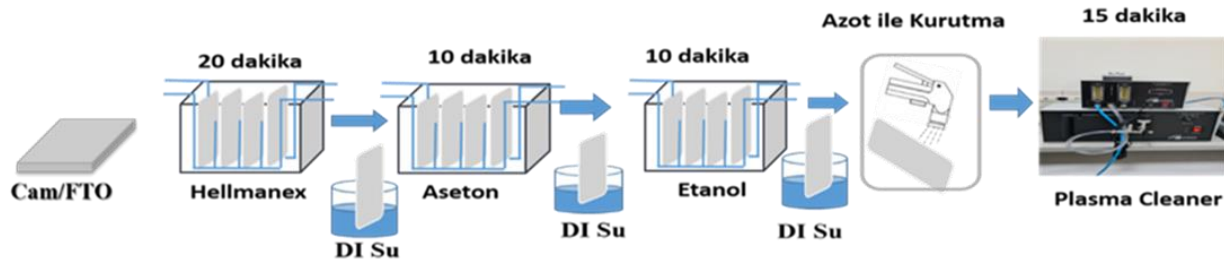
2. Malzeme ve yöntem

2.1. Malzeme

Elektron taşıma tabakası kompakt TiO₂ sol-gel üretim yöntemi ile üretilmiştir. Alttaş malzemesi olarak FTO Lumtec firmasından temin edilmiştir. Elektron transfer tabaka malzemesi olarak; kompakt TiO₂ için titanium isopropoxide (TTIP; 97%), ethanol (99.8%) ve HCl (%36.5) kullanılmıştır. Sentezlenen kompakt TiO₂, homojen şekilde kaplanabilmesi için SCS marka G3 model dönel kaplama cihazı yardımıyla kaplanmış ardından tavlama işlemine tabi tutulmuştur.

2.2. Alttaşların Temizlenmesi

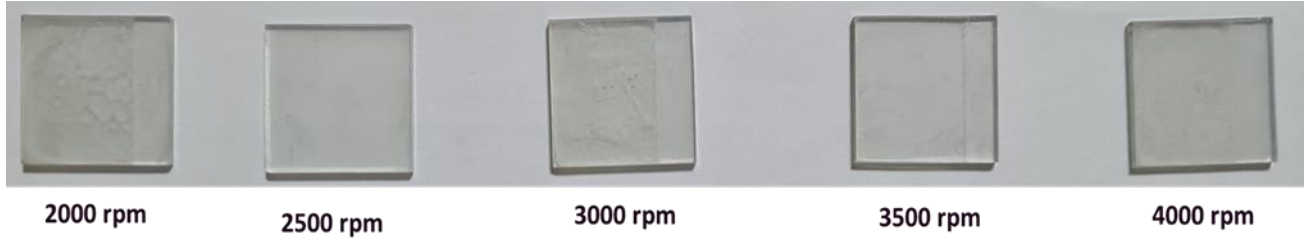
Hücre üretiminde alttaş temizliği önemli bir role sahiptir. Bu çalışmada, alttaş olarak 25mm*25mm boyutlarında ~8 ohm/sq dirence sahip FTO alttaşlar kullanılmadan önce temizleme işlemi yapılmıştır. Temizleme işleminde alttaşa zarar vermemek ve kalıntı bırakmamak için öncelikle %2 Hellmanex (deterjan) ile sonikasyon işlemi 20 dakika yapılmıştır. Ardından saf su ile durulama işlemi yapılmıştır (Saliba, 2016). Daha sonra sırasıyla etanol ve aseton içerisinde 10'ar dakika ultrasonikasyonda işlem yapılmıştır. Yıkama işlemi sonrası saf su ile durularak azot ile kurutma işlemi yapılmıştır. Kalıntıların tamamen temizlenmesi için 15 dakika boyunca plazma temizleyici cihazı kullanılmıştır (Damgacı & Seyhan, 2021). Tüm temizlik aşamaları Şekil 1'de gösterilmiştir. Temizlenen alttaşlar elektron taşıma katmanı için hazır halde inert ortamda bekletilmiştir.



Şekil 1. Kaplama işleminde kullanılan alttaşların temizleme aşamaları.

2.3. Kompakt TiO₂

Bu çalışmada, c-TiO₂ sol-jel yöntemiyle üretilerek FTO üzerine dönel kaplama yardımıyla kaplanmıştır. 0,30 M tetraizopropoksit (TTIP) çözeltisi hazırlanmıştır. Bu çözelti için sırasıyla 1ml ethanol'e 300 µl TTIP ve 5µl HCl (1ml ethanol içerisinde çözünen) 1ml ethanol ile tamamlanarak etanol içerisinde çözülmüştür. Bu solüsyonlara 2 M HCl içeren çözelti damlatılarak gece boyunca karıştırılmıştır. Hazırlanan solüsyondan 100 µl alınarak 2 adımda c-TiO₂ dönel kaplama yöntemiyle kaplanmıştır. Bu kaplama işleminde 1.adımda 10s boyunca 1000 rpm'de, 2. adımda sırasıyla 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 rpm'de 15 saniye boyunca döndürülerek kaplama işlemi yapılmıştır. Kaplama işleminden sonra 10 dakika 100°C'de ön tavlama işlemi yapılmış ardından 500°C'de 30 dakika boyunca kapaklı ısı tabaka sisteminde tavlama işlemi yapılmıştır. Tavlama işlemi sonrası FTO alttaşların üzerine kaplanan şeffaf c-TiO₂ tabakası Şekil 2'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2. Farklı dönel kaplama hızlarında FTO/cam alttaş üzerine kaplanan c-TiO₂ ince filmler.

2.4. Karakterizasyon

Üretilen kompakt TiO₂ incefilmlerin karakterizasyonu için kalınlık ölçümü Bruker Dektak XT profilometre, kristal yapılarının incelenmesi için PANalytical XRD ve son olarak sentezlenen malzemelerin yüzey görüntüsü için ZEISS marka EVO40 model SEM cihazları kullanılmıştır.

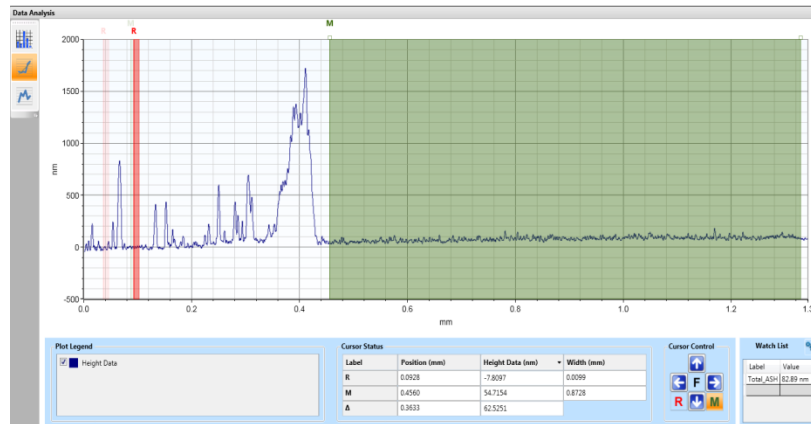
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Kalınlık optimizasyonu

Üçüncü nesil boya duyarlı ve perovskit güneş hücrelerinde saydam iletken tabaka (TCO) üzerine kaplanan c-TiO₂, 50-150 nm kalınlık aralıklarında çok ince katman olarak kaplanmaktadır (Husain vd., 2018). Kaplanan elektron tabakasında kalınlık önemli bir parametredir. İnce filmin kalınlığı önemli ölçüde devir hızı, süre, çözelti miktarı ve kaplama ortamı dahil olmak üzere farklı parametrelere bağlıdır (Tahir vd., 2017). TiO₂, solüsyonundan bir pipet yardımıyla alınıp dönel kaplama cihazı ile tabloda verilen dönme hızı ve süresince döndürülerek kaplanmıştır. Şekil 3’de kaplanan c-TiO₂’in profilometre sonucu verilmiştir. Yeşil bölge, kaplanan c-TiO₂’in homojen bir şekilde kaplandığını ve kalınlık değerini göstermektedir. Sol tarafta görülen pikler FTO kenarına yapıştırılan bant kenarında biriken solüsyondan kaynaklanmaktadır. Tablo 2’de 2 adımda üretilen c-TiO₂’in farklı döndürme hızı ve sürelerine karşılık gelen kalınlık değerleri verilmiştir. c-TiO₂, 1000 rpm 10s, 4000 rpm 15 s dönel kaplama parametrelerinde literatürle uyumlu ve homojen olarak başarılı bir şekilde üretilmiştir.

Tablo 2. 2 adımda üretilen c-TiO₂’in kalınlık değerleri.

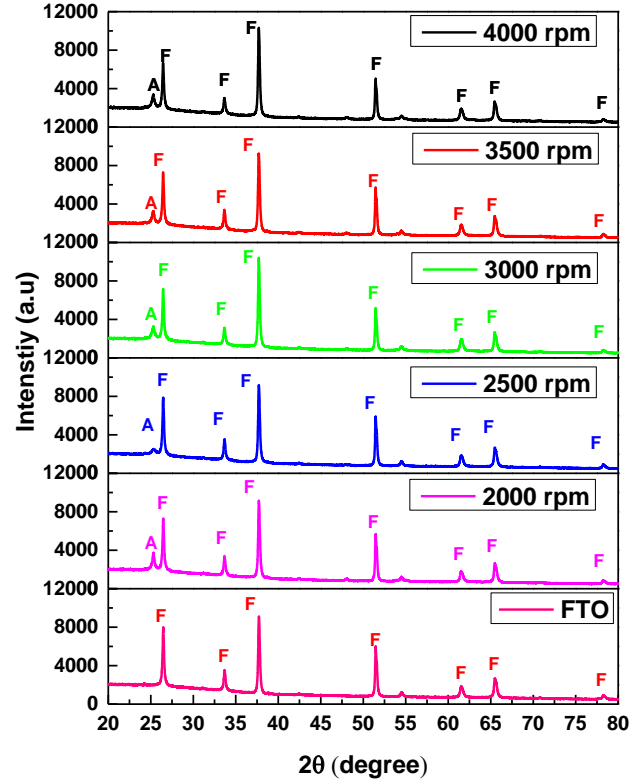
Döndürme hızı ve Süresi	Kalınlık Değeri
1000 rpm 10s, 2000 rpm 15 s	160 nm
1000 rpm 10s, 2500 rpm 15 s	154 nm
1000 rpm 10s, 3000 rpm 15 s	81 nm
1000 rpm 10s, 3500 rpm 15 s	78 nm
1000 rpm 10s, 4000 rpm 15 s	62 nm



Şekil 3. c-TiO₂ 62 nm kalınlıktaki profilometre sonucu.

3.2. c-TiO₂ Kristal Fazlarının Analiz Sonuçları

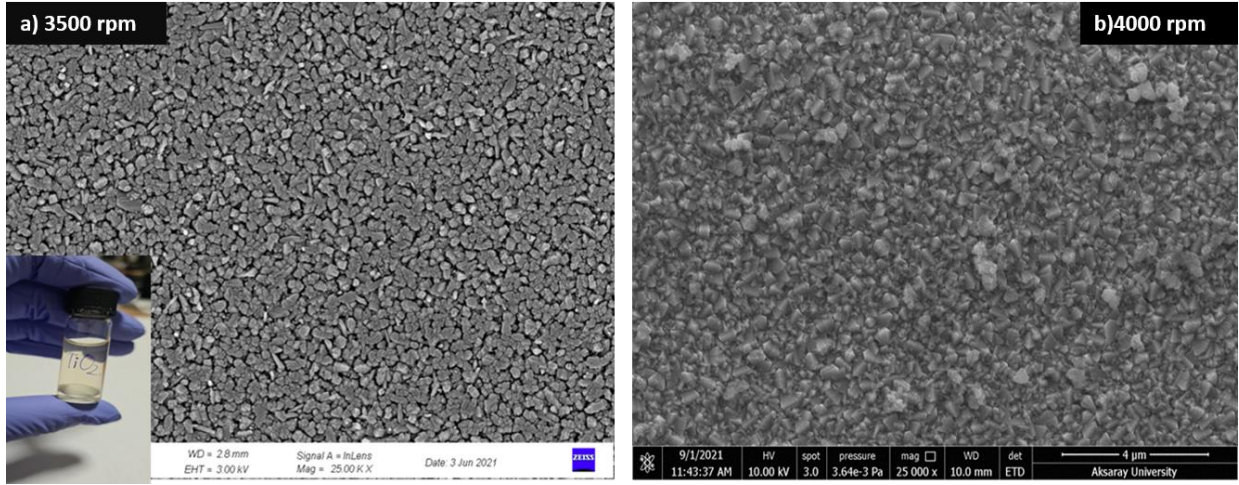
TiO₂ hem kristal hem de amorf formlarda, anataz, rutil ve brokit olmak üzere üç kristal polimorfta bulunur. Bu çalışmada, c-TiO₂ 'ler dönel kaplama işleminden sonra 500°C'de tavlannmıştır. Üretilen c-TiO₂'lerin XRD sonuçlarına göre TiO₂'in anataz fazı 350°C sıcaklık ve üstünde ortaya çıkan 25,3°'de açık bir şekilde görülmektedir. TiO₂'in anataz fazı, fotokatalitik aktive için en aktif kristaldır (Hashimoto vd., 2005, Fujishima vd., 2008, Nakata, K., & Fujishima, A. 2012). Anataz fazında kristallenmeye sahip c-TiO₂ yüksek verimli perovskit güneş hücrelerinin elde edilmesinde büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada anataz fazında c-TiO₂ tüm farklı üretim parametrelerinde Şekil 4'de görüldüğü gibi elde edilmiştir.



Şekil 4. FTO, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 rpm de kaplanan c-TiO₂ ince filmlerin XRD spektrumu (F:FTO, A:Anataz).

3.3. c-TiO₂ Yüzey Görüntüsü Sonuçları

TiO₂ kaplamasının yüzey görüntüleri incelendiğinde iğne deliği yapısının neredeyse hiç olmadığı, FTO yüzeyinin üzerine iyi bir şekilde kaplandığı görülmüştür. İğne deliği yapısının olmaması yada az olması perovskit hücre verimliliğinin yüksek olacağını bir göstergesidir. Şekil 5'de 3500 rpm ve 4000 rpm'de döndürülerek kaplanan c-TiO₂'in SEM görüntüsü verilmiştir. Bu SEM görüntüleri Meher ve arkadaşlarının'nın yaptığı yüksek verimli perovskit güneş hücresi elde edilen çalışma ile karşılaştırıldığında oldukça benzer olduğu görülmüştür (Meher vd., 2014) .



Şekil 5. (a) Laboratuvarıda üretilen 3500 rpm’de üretilen c-TiO₂ SEM görüntüsü; (b) 4000 rpm’de üretilen c-TiO₂ SEM görüntüsü .

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, perovskit güneş hücrelerinin önemli katmanlarında biri olan TiO₂ sol-jel yöntemiyle sentezlenmiştir. Sentezlenen TiO₂, FTO alttaşlarının üzerine dönel kaplama cihazının üzerinde 2000, 2500, 3000, 3500 ve 4000 rpm hızlarında 15s boyunca döndürülerek kaplanmıştır. Ardından 500°C’de 30 dakika boyunca tavlama işlemiyle n tipi elektron taşıma tabakası elde edilmiştir.

Bu tabakanın perovskit güneş hücreleri için önemi göz önüne olarak karakterizasyonu yapılmıştır. Bunun sonucunda en ideal kalınlık değeri 4000-rpm hızında 62 nm ile elde edilmiştir. XRD sonuçlarında faz pikleri incelendiğinde 3500-4000 rpm aralığında kristallenmenin en iyi olduğu görülmüştür. SEM görüntüleri incelendiğinde 3500 ve 4000 rpm hızında döndürülerek kaplanan c-TiO₂’lerde neredeyse hiç iğne deliği yapısının oluşmadığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar perovskit güneş hücrelerinde elektron transfer tabakasının ince, fotokatalitik aktive için aktif kristalli, iğne deliği yapısı az bir katman başarılı şekilde üretilmiştir. Daha sonraki çalışmalarda katman kalınlığının daha ince bir yapıda oluşturmak için solüsyon miktarında azaltmaya gidilecek tavlama süresi ve sıcaklığı yeniden optimize edilecektir.

Referanslar

- Chiang, C. H., & Wu, C. G. (2016). Bulk heterojunction perovskite-PCBM solar cells with high fill factor. *Nature Photonics*, 10(3), 196-200.
- Fujishima, A., Hashimoto, K. ve Watanabe, T., (1999). *TiO₂ Photocatalysis, Fundamentals and Applications*, BKC, Inc Publishers, Japan
- Fujishima, A., Zhang, X., & Tryk, D. A. (2008). TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. *Surface science reports*, 63(12), 515-582.
- Guo, L., Fei, C., Zhang, R., Li, B., Shen, T., Tian, J., & Cao, G. (2016). Impact of sol aging on TiO₂ compact layer and photovoltaic performance of perovskite solar cell. *Science China Materials*, 59(9), 710-718.
- Hashimoto, K., Irie, H., & Fujishima, A. (2005). TiO₂ photocatalysis: a historical overview and future prospects. *Japanese journal of applied physics*, 44(12R), 8269.
- Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W., & Bahnemann, D. W. (1995). Environmental applications of semiconductor photocatalysis. *Chemical reviews*, 95(1), 69-96.
- Im J.H., Lee C.R., Lee J.W., Park S.W. ve Park N.G., (2011). "6.5% Efficient Perovskite quantum-dot sensitized solar cell", 3: 4088–4093.
- Jung, J. W., Chueh, C. C., & Jen, A. K. Y. (2015). A low-temperature, solution-processable, Cu-doped nickel oxide hole-transporting layer via the combustion method for high-performance thin-film perovskite solar cells. *Advanced materials*, 27(47), 7874-7880.
- Kim, H. S., Im, S. H., & Park, N. G. (2014). Organolead halide perovskite: new horizons in solar cell research. *The Journal of Physical Chemistry C*, 118(11), 5615-5625.

- Kim, J., Kim, K. S., & Myung, C. W. (2020). Efficient electron extraction of SnO₂ electron transport layer for lead halide perovskite solar cell. *NPJ Computational Materials*, 6(1), 1-8.
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (2009). Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the american chemical society*, 131(17), 6050-6051.
- Li, J., Yao, J. X., Liao, X. Y., Yu, R. L., Xia, H. R., Sun, W. T., & Peng, L. M. (2017). A contact study in hole conductor free perovskite solar cells with low temperature processed carbon electrodes. *RSC advances*, 7(34), 20732-20737.
- Li, Z., Hou, B., Xu, Y., Wu, D., & Sun, Y. (2005). Hydrothermal synthesis, characterization, and photocatalytic performance of silica-modified titanium dioxide nanoparticles. *Journal of colloid and interface science*, 288(1), 149-154.
- Michael M. L., Joël T., Tsutomu M., Takuro N. M. Ve Henry J. S., (2012). "Efficient Hybrid Solar Cells Based on Meso-Superstructured Organometal Halide Perovskites", 338(6107):643-647.
- Nakata, K., & Fujishima, A. (2012). TiO₂ photocatalysis: Design and applications. *Journal of photochemistry and photobiology C: Photochemistry Reviews*, 13(3), 169-189.
- NREL, 2022. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- O'Regan, B., & Gratzel, M. (1991). A low cost, high efficiency solar cell based on dye sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature*, 353, 737-740.
- Peng, B., Jungmann, G., Jäger, C., Haarer, D., Schmidt, H. W., & Thelakkat, M. (2004). Systematic investigation of the role of compact TiO₂ layer in solid state dye-sensitized TiO₂ solar cells. *Coordination Chemistry Reviews*, 248(13-14), 1479-1489.
- Qin, J., Zhang, Z., Shi, W., Liu, Y., Gao, H., & Mao, Y. (2017). The optimum titanium precursor of fabricating TiO₂ compact layer for perovskite solar cells. *Nanoscale research letters*, 12(1), 1-9.
- Saliba, M., Matsui, T., Domanski, K., Seo, J. Y., Ummadisingu, A., Zakeeruddin, S. M., & Grätzel, M. (2016). Incorporation of rubidium cations into perovskite solar cells improves photovoltaic performance. *Science*, 354(6309), 206-209.
- Sławek, A., Starowicz, Z., & Lipiński, M. (2021). The Influence of the Thickness of Compact TiO₂ Electron Transport Layer on the Performance of Planar CH₃NH₃PbI₃ Perovskite Solar Cells. *Materials*, 14(12), 3295.
- Tahir, M. B., Riaz, K. N., Hafeez, M., & Fidous, S. (2017). Review of morphological, optical and structural characteristics of TiO₂ thin film prepared by sol gel spin-coating technique. *Indian Journal of Pure & Applied Physics (IJPAP)*, 55(10), 716-721.
- Wojciechowski, K., Saliba, M., Leijtens, T., Abate, A., & Snaith, H. J. (2014). Sub-150 C processed meso-superstructured perovskite solar cells with enhanced efficiency. *Energy & environmental science*, 7(3), 1142-1147.
- Woon S. Y., Byung-Wook P., Eui Hyuk J., Nam J. J., Young Chan K., Dong Uk L., Seong S. S., Jangwon S., Eun Kyu K., Jun Hong N., Sang Il S., (2017). "Iodide management in formamidinium-lead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells", 356:1376-1379.
- Woon Seok Y., Jun Hong N., Nam Joong J., Young Chan K., Seungchan R., Jangwon S. ve Sang Il S.,(2015). "High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange", *Science*, 348(6240):1234- 1237.
- Wu, R., Yang, B., Xiong, J., Cao, C., Huang, Y., Wu, F., ... & Yang, J. (2015). Dependence of device performance on the thickness of compact TiO₂ layer in perovskite/TiO₂ planar heterojunction solar cells. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 7(4), 043105.
- Yang, W. S., Park, B. W., Jung, E. H., Jeon, N. J., Kim, Y. C., Lee, D. U., & Seok, S. I. (2017). Iodide management in formamidinium-lead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells. *Science*, 356(6345), 1376-1379.
- Yang, W. S., Park, B. W., Jung, E. H., Jeon, N. J., Kim, Y. C., Lee, D. U., ... & Seok, S. I. (2017). Iodide management in formamidinium-lead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells. *Science*, 356(6345), 1376-1379.



Nitroselüloz Bazlı Yakıtların Depolama Ömürlerine Ortam Koşullarının Etkisinin İncelenmesi

Investigation Of The Effect Of Ambient Conditions On The Storage Life Of Nitrocellulose Based Fuels

Mehmet Çağlayan^{1*}, Muharrem Pul², Ayşegül Ülkü Metin³

¹Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Savunma Teknolojileri ABD 71450, Yahşihan, Kırıkkale, TÜRKİYE

²Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale Meslek Yüksekokulu, 71450, Yahşihan, Kırıkkale, TÜRKİYE

³Kırıkkale Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, 71450, Yahşihan, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 23/06/2022

Kabul / Accepted: 15/11/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Bu çalışmanın konusu olan mühimmatlara ait yakıtlar her türlü iklim koşullarına (titreşim, alçak ve yüksek rakım, hava araçlarında yüksek irtifa, aşırı sıcaklık, nem vb.) maruz kalmaktadır. Bu sebeple üretim sonrası verilen depolama ömrünü daha kısa sürede tamamlamakta ve kendiliğinden infilak edebilmektedir. Bu maksatla çift bazlı yakıtın maruz kaldığı çevresel etkileri simüle edilebilmesi için üç farklı sıcaklıkta (60°C-70°C-80°C) ve %60 nem koşulları sağlanarak hızlı yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Yaşlandırma işlemi tamamlanan yakıtın fiziksel ve kimyasal değişimleri gözlemlenerek çeşitli testler uygulanmıştır. Stabilizör miktarı tayini testi sonucunda stabilizör miktarının minimum % 0,2 w/w değerinin altına düştüğü, hızlı yaşlanma etkisi ile stabilizör miktarının azaldığı gözlenmiştir. Nem tayini testinde nem miktarının maksimum %0,6 değerini aşmadığı, kalori değeri ölçümü testinde kalori değerinin 836-864 cal/g değerleri arasında kaldığı, ısı akış kalorimetresi (HFC) ile yapılan kararlılık testinde ısı akış miktarının maksimum 114 µw/g değerini aşmadığı gözlemlenmiştir. SEM mikroskobu ile yakıtların yapısı görüntülenerek doğal yaşlanma ve hızlı yaşlandırma işlemleri sonrasında yakıtta meydana gelen değişimler gözlenmiştir. FTIR spektrumları alınarak doğal yaşlanmış ve hızlı yaşlandırılmış yakıt içinde meydana gelen kimyasal değişimler incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Nitroselüloz Bazlı Yakıt, Stabilizör, Hızlı Yaşlanma, Kararlılık”

Abstract

The fuels of the munitions, which are the subject of this study, are exposed to all kinds of climatic conditions (vibration, low and high altitude, high altitude in aircraft, extreme temperature, humidity, etc.). For this reason, it completes the storage life given after production in a shorter time and can explode on its own. For this purpose, rapid aging process was applied at three different temperatures (60°C-70°C-80°C) and 60% humidity conditions in order to simulate the environmental effects that the dual-base fuel is exposed to. Various tests were applied by observing the physical and chemical changes of the fuel whose aging process was completed. As a result of the stabilizer amount determination test, it was observed that the amount of stabilizer decreased below the minimum 0.2% w/w value, and the amount of stabilizer decreased with the effect of rapid aging. It was observed that the moisture content did not exceed the maximum value of 0.6% in the moisture determination test, the calorific value remained between 836-864 cal/g in the calorific value measurement test, and the heat flow amount did not exceed the maximum 114 µw/g in the stability test performed with the heat flow calorimeter (HFC). With the SEM microscope, the structure of the fuels was visualized and the changes in the fuel after natural aging and rapid aging processes were observed. By taking the FTIR spectra, the chemical changes occurring in naturally aged and fast aged fuels were investigated.

Key Words

“Nitrocellulose Based Fuel, Stabilizer, Rapid Aging, Stability”

1.Giriş

Özellikle son yüzyılda devletlerin silahlanma yarışıyla birlikte, silah sektörü milyarlarca dolar hacmiyle en önemli sanayi sektörlerinin başında yerini almıştır. Hal böyle olunca bu sektöre yapılan yatırımlar ve Ar-Ge faaliyetleri de aynı şekilde gelişmeye devam etmektedir. Dolayısıyla, silah sistemleri ve bu sistemlerde kullanılan mühimmatlar üzerine yapılan akademik çalışma ve araştırmalarda giderek artmaktadır (Gonçalves et al. 2008; Zalewski and Wolszakiewicz 2011; Li et al. 2020; Rychly et al. 2012; Vogelsanger 2004; Elghafour et al. 2018). Mühimmatlar genel olarak tapa, mermi (ana imla hakkı), kuyruk, sevk barutu-sevk fişegi ve kapsül gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Mühimmatın en önemli kısmı olan sevk yakıtları katı ve sıvı olmak üzere iki ana grupta üretilmektedirler. Sıvı yakıtlar genellikle roketlerde kullanılmaktadır. Yakıcı olarak Nitrik asit (HNO_3), Nitrojen terraperoksit (N_2O_4), Flor (F_2), Oksijen (O_2), Hidrojen (H_2) kullanılır. Yanıcı olarak da Sıvı Hidrojen, Kerosene (parafin oil) $\text{C}_{12}\text{H}_{24}$, Hidrozin (N_2H_4), Propan (C_3H_8) ve Metan (CH_4) kullanılır. Katı yakıtlar içeriğine göre heterojen katı yakıt ve homejen katı yakıt olarak ikiye ayrılırlar. Heterojen yakıtlar roketlerde çok sık kullanılan kompozit yakıtlardır. Bu yakıtların oksitleyicisi uzay roketlerinde veya diğer profesyonel roketlerde de kullanılan amonyum perklorat adlı kimyasal maddedir. Homojen yakıtlar; enerjetik bileşen (Nitroselülöz, Nitrogliserin, Nitroguanidin vb.), plastikleştirici (Dibutylphthalate, polyester adipate, Dinitrotoluen vb.), bağlayıcı (Etil asetat vb.), stabilizör (Etil centralit, difenilamin, 2-Nitrodifenilamin vb.), bakırlaşma önleyici ajan (Kurşun yaprak kılıf, kalay vb.), alev azaltıcı (potasyum nitrat, potasyum sülfat vb.), aşınma önleyici ajan (titaniumdioksit,wax vb.), lubricant (Grafit) ve ilave proses malzemeleri vb. gibi bileşenlerden oluşmaktadır (Kenneth and Acharya 2012). Homojen yakıtlar yapılarına göre; tek bazlı (Nitroselülöz NC), çift bazlı (Nitroselülöz NC, Nitrogliserin NGL) ve üç bazlı (Nitroselülöz NC, Nitrogliserin NGL ve Nitroguanidin NGu) olarak adlandırılırlar. Günümüzde mühimmatların yakıtlarında büyük çoğunlukla çift bazlı yakıt kullanılmaktadır. Çift Bazlı yakıtlar, içeriğinde bulunan NC ilave olarak yüksek enerjili bir başka bileşen olan nitrik asit esteri içerirler. Bilinen en önemli nitrik asit esterleri; NGL, Dietilen Glikol Dinitrat, Trietilen Glikol Dinitrat, Metriol Trinitratır. Çift Bazlı (DB) yakıtların homojen yapıda olmaları diğer yakıt türleri içerisinde önemli bir avantaj sağlamaktadır. Daha kararlı bir yakıt çekirdeği mekanik özelliklerin kontrol edilebilir halde sabit tutulması noktasında öne çıkmaktadır (Bahadır 2020). Bu gibi özellikleri sayesinde çift bazlı roket yakıtları kompozit yakıtlara göre daha uzun ömürlü ve kararlıdır. Nitroselülöz içeren çift bazlı yakıtların üretim aşamasından sonra mühimmatlarda kullanım esnasında zamana bağlı olarak yaşlanmaya sebep olarak yapısal kararlılığını yitirmeye başlamaktadır. Yakıtın kararlılığını yitirmesi ile mühimmatlar depolama güvenliği azalmakta ve kendiliğinden infilak etme riski taşımaktadır.

Bütün patlayıcı madde türleri kararlılık dereceleriyle birbirlerinden ayrılırlar. Patlayıcı maddeler söz konusu olduğunda depolama koşulları büyük önem arz etmektedir. Bazı patlayıcı maddeler sıcağa, soğuğa, basınca ve sarsıntıya dayanıklı değildir. Bir patlayıcı maddenin kararlılığı; normal depolama koşulları altında muhafaza edilme sürelerinin uzunluğu ve onun askeri kullanıma uygunluğunun belirlenmesi açısından önem arz etmektedir. Bu şartlar göz önünde bulundurularak yakıtların kararlı olması gerekmektedir. Yakıtlarda kararlılığı sağlamak ve depolama güvenliğini artırmak amacıyla yakıt üretim aşamasında stabilizör denilen malzemeler eklenmektedir. Stabilizör madde miktarı zamana bağlı olarak (yaşlanma ile doğru orantılı) ve dış etkenler vasıtasıyla (sıcaklık, nem, UV, titreşim vb.) azalmaktadır. Stabilizör azalması ile yakıtın yapısından NO , NO_2 gazları çıkışı başlar. Devamında ise azalma ile yakıt kararlılığını yitirmesiyle depolama güvenliğinin tehlikeye girmesine sebep olur. Çift Bazlı yakıtlarda kararlaştırıcı (stabilizör) olarak; DPA (Difenil Amin), 2-NDPA (2-Nitrodifenil Amin), EC (Etil Santralit), MC (Metil Santralit), Tersiyer Bütil Atekol ve N-Metil-p-nitro-anilin kullanılmaktadır (Venkatachalam et al. 2002). Yaşlanma etkisi ile NC (Nitroselülöz) bazlı yakıtlarda zamana bağlı olarak stabilizör madde miktarında azalma, yapısında gelen bozunmadan kaynaklı NO ve NO_2 gazlarının açığa çıkması ve molekül ağırlığının azalması gibi etkilere sebep olmaktadır. Yaşlanma; ısı, nem, UV, malzeme etkileşimleri, ozon vb. sebeplere bağlıdır. Yaşlanma doğal yaşlanma (üretim sonrası depolarda geçen süre) ve hızlı yaşlanma (sıcaklık, nem, titreşim vb. etkilere maruz bırakılma) olarak ikiye ayrılır. Doğal yaşlanma normal saklama ve depolama koşullarından oluşmaktadır. Ömür belirleme çalışmaları için çok uzun süre gerektirir. Hızlı yaşlanma ise, Yakıtın 3, 5, 10 yıl veya ne kadar süre ile güvenilir bir şekilde depolanabileceği ve kullanılabilirliğinin belirlenmesi maksadıyla sistemli olarak yapılan (sıcaklık, nem, UV, titreşim, ozon vb.) yaşlandırma işlemlerine denir. Hızlı yaşlandırma işlemi ağırlıklı olarak sıcaklık ortamında yapılmaktadır. Sıcaklığa ilave olarak nem, titreşim ortamı uygulanarak da hızlı yaşlandırma işlemi yapılmaktadır. Literatür araştırıldığında nitroselülözün farklı ortam koşullarındaki davranışın araştırıldığı sınırlı sayıda çalışmaya ulaşılmaktadır (Chaia et al. 2020; Kaur et al. 2021; Li et al. 2021; Courty et al. 2021; Mattar et al. 2020; Ergun 2017).

Bu çalışmada mühimmatlarda da kullanılan çift bazlı yakıt, yüksek sıcaklık ve nem ortamında hızlı yaşlandırma işlemine tabi tutularak çevresel etkileri simüle edilmiştir. Doğal yaşlanmış (DY) ve hızlı yaşlandırma (HY) işlemleri sonrasında DY ve HY yakıt numunelerine nem tayini testi, stabilizör miktarı tayini testi, ısıl kararlılık tayini testi, kalorifik değer ölçüm testi, kütle kaybı testi, SEM incelemesi ve FTIR spektrumları alınarak yakıtta oluşan fiziksel, kimyasal vb. değişimler gözlemlenerek değerlendirilmeye çalışılmıştır.

2.Malzeme ve Yöntem

Deneyisel çalışmada yapılan test ve incelemelerde kullanılan çift bazlı yakıtın kimyasal bileşiminde nitroselülöz, nitrogliserin, di etil ftalat, 2-Nitrodifenil amin kurşun hekzoat, kurşun salisilat ve waks bulunmaktadır. Yakıtta yaşlandırma işleminde yaklaşık 70 mm taban çapında, 40 mm yüksekliğinde ve 100 cm^3 hacminde rodajlı kapaklı vezin kapları kullanılmıştır. Vezin kaplarına alınan yakıt numuneleri *Angelantani* marka 600 L ve 1000 L modeli, sıcaklık aralığı: $-70^\circ\text{C} / +180^\circ\text{C}$, bağıl nem aralığı: % 4 - % 98 arasında olan, hızlı ısıtma/soğutma yapabilen iki adet şartlandırma kabininde yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Hızlı yaşlandırma işlemi; 40°C ile 80°C arasında 10°C 'ar derecelik sıcaklık farkları ile, stabilizör kaybının minimum % 20, maksimum % 80'ine denk gelecek şekilde seçilen sıcaklıklarda yapılarak, belirli bekleme süreleri sonunda stabilizör miktarındaki değişimler kaydedilmiştir. Bu deneyisel

çalışmada hızlı yaşlandırma işlemi 60°C’da (30-60-90-120 gün), 70°C’da (14-28-42-56-70 gün) ve 80°C’da (4-8-12-16-20 gün), %60 nem ortamında sıcaklık ve nem simüle edilerek uygulanmıştır. Yapılan yaşlandırma işleminin başlangıç ve bitiş tarihleri ile deneysel parametreler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çift Bazlı Yakıt Hızlı Yaşlandırma Değerleri

Süre	Sıcaklık			Bağıl Nem (%)
	60°C	70°C	80°C	
Gün	30	14	4	60
	60	28	8	
	90	42	12	
	120	56	16	
		70	20	

Doğal yaşlanmış ve Hızlı yaşlandırma işlemi tamamlanan yakıtlara sırasıyla Nem Tayini Testi, Stabilizör Miktarı Tayini, Isı Akış Miktarı Tayini Testi, Kalorifik Değer Ölçümü Testi, Ağırlık Kaybı Testi, FTIR spektrumu ve SEM Cihazında görüntüleri alınarak deneysel çalışmaları tamamlanmıştır.

Kalorifik Değer Ölçümü Testi, FTIR spektrumu ve SEM Cihazında görüntü alma işlemlerinde tek numune ile, diğer testlerde ise ikili numune ile testler yapılmıştır.

2.1.Nem Tayini

Nem tayini testi *BINDER* markalı *FD 115 E2* modeli fanlı etüvde yapılmıştır. Yaklaşık $10 \pm 0,2$ g yakıt numunesi, $100 \pm 2^\circ\text{C}$ ’da 2 saat bekletilmiştir. İki saat ısıtma işlemi sonrasında numuneler desikatör içinde soğumaya bırakıldıktan sonra, Eşitlik 1’e göre % nem miktarı hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Nem} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

Burada; W_1 kurutmadan önceki numune miktarı (g), W_2 kurutmadan sonraki numune miktarı (g)’dir.

2.2.Stabilizör Miktarı Tayini

Stabilizör miktarı tayini; *Agilent* marka *I200* serisi HPLC cihazında, 10 µL enjeksiyon hacminde, 1.0 mL/dak akış hızında, *Agilent Eclipse XDB-C8 (4.6 X 150 mm - 5 µm)* kolonda ve 40°C sıcaklıkta, 280 nm dalga boyunda, % 60 asetonitril - % 40 saf su taşıyıcı fazında ve *DAD* dedektör kullanılarak yapılmıştır. Yakıt içerisindeki stabilizör miktarı Yüksek Performanslı Sıvı Kromatografisi (HPLC) ile (AOP-48 EDITION-II:2007)’ye göre tayin edilmiştir. Tayin için yaklaşık $1,0 \pm 0,1$ g test numunesi tartılarak erlenmayere alındı. Üzerine 250 mL asetonitril ilavesi yapılarak manyetik karıştırıcıda 4 saat 200 rpm hızında karıştırılarak ekstraksiyon yapıldı. Üzerine 50 ml % 2’lik CaCl_2 ilavesi yapılarak 45 dakika kadar numune içinde bulunan nitroselülozün (NC) tamamen dibe çökmesi sağlandı. Bu işlem sonucunda NC tabaka halinde erlenmayer dibine çöktürüldü. Nitroselülozün çökmesi sonucunda karışım enjektöre alınarak PTFE filtre yardımı ile süzüldü ve süzüntüden 1-2 mL viallere (numune kabı) alındı. Viallere alınan süzüntü HPLC cihazında test edildi.

2.3.HFC ile Isı Akış Miktarı Tayini

HFC testi *TA Instrument* markalı *HFC TAMIII* model cihazda (STANAG 4582:2001)’ye göre 80°C’da 10 gün 14.4 saat sürede yapılmıştır. Yakıt 1-2 mm lik parçalar halinde kesildi, elde edilen parçalar iyice karıştırıldı ve karışımından test tüplerini dolduracak kadar en az 3 g numune spatül yardımıyla alındı. Numune tüpe alındıktan sonra test sıcaklığına ayarlanmış olan ısıtma bloğunda (80°C’da) yaklaşık 24 saat şartlandırıldı. Bunun amacı ise ısı akış kalorimetresinin çok hassas ölçüm aralıklarına sahip olması sebebiyle yüksek ısı farkı gibi etkenlerden dolayı hatalı sonuç elde edilmesinin önlenmesidir. Aksi durumda cihaz hatalı sonuç verebilir. Bekleme süresi sonunda numune HFC cihazına bağlandı ve (STANAG 4582:2001)’ye göre 80°C’da 10 gün 14.4 saat süre bekletildi. Şekil 1’de HFC test numunelerine ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 1. Bir Kısım HFC Test Numuneleri

2.4.Kalorifik Değer Ölçümü Testi

Kalorifik değer ölçümü testi *PARR* marka 1356 model bombalı kalorimetre cihazı ile yapılmıştır. Yaklaşık $1.0 \pm 0,2$ g test numunesi tartılarak numune kabına yerleştirildi. Yakma teli numuneye degecek şekilde numune kabına bağlandı. Cihazın bombasına bağlanan gazın (Argon gazı) basıncı numune üzerinden 40 atm basıncını geçmeyecek şekilde geçirilerek (yaklaşık 15 saniye) inert ortam sağlandı. Gaz geçirilen bomba cihaza bağlandı ve ateşleme yapıldıktan sonra bomba açıldı. Bomba içinde yanmanın ardından kalan tel uzunluğu ölçüldü. Başlangıçtaki tel miktarından çıkarılarak Eşitlik 2'ye göre yakıtın kalori değeri hesaplanmıştır.

$$\text{Kalori Değeri} = \frac{\text{Kalorimetre Kal.Değeri (cal)} - \text{Kullanılan(Yanan) telin kalori miktarı (cal)}}{\text{Numune Ağırlığı (g)}} \quad (2)$$

Burada; Kullanılan telin kalori miktarı (cal): Kullanılan (Yanan) tel uzunluğu (cm) x 2.3 cal/cm

2.5.Kütle Kaybı Testi

Kütle kaybı testi *OZM* markalı *UNB-HBA40* modeli *Uniblok* cihazında (ısıtma bloğunda) (AOP-7 Edition 2: 2003)'e göre 90°C 'de 5 gün aralıklarla ölçüm alınarak yapılmıştır. Doğal yaşlanmış $5,0 \pm 0,2$ g yakıt numunesi sabit tartıma getirilmiş olan cam tüp içine konuldu. Numune konulan cam tüplerin ağzı kapatılarak 90°C 'de metal ısıtma bloklarında ısıtıldı. (AOP-7 Edition 2: 2003)'e göre test sıcaklığı 90°C olduğundan her 5 günde bir tartım yapıldı. Zaman içerisinde tartım alınmasıyla gözlenen kütle kaybı hesabı Eşitlik 3 yardımıyla hesaplandı ve Kütle Kaybı-Zaman grafiği çizildi. (AOP-7 Edition 2: 2003)'e göre kütle kaybı miktarının %3'e ulaştığı noktada test sonlandırılmalıdır. Teorik olarak yakıtın kütle kaybı 20-25 gün arasına denk gelmektedir. Bu çalışmada yakıtın tamamen bozunmasını görebilmek amacıyla son noktaya kadar gidilmesi ve gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Bu maksatla teste devam edilmiş ve yakıtın 36.gün sonunda tamamen bozunduğu gözlemlenmiştir. Kütle Kaybı Numune-1 için % 33,2413 ve Numune-2 için % 37,5974 olarak hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Kütle Kaybı} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (3)$$

Burada; W_1 numunenin ilk ağırlığı (g), W_2 numunenin son ağırlığı (g)'dir.

2.7.FTIR Testi

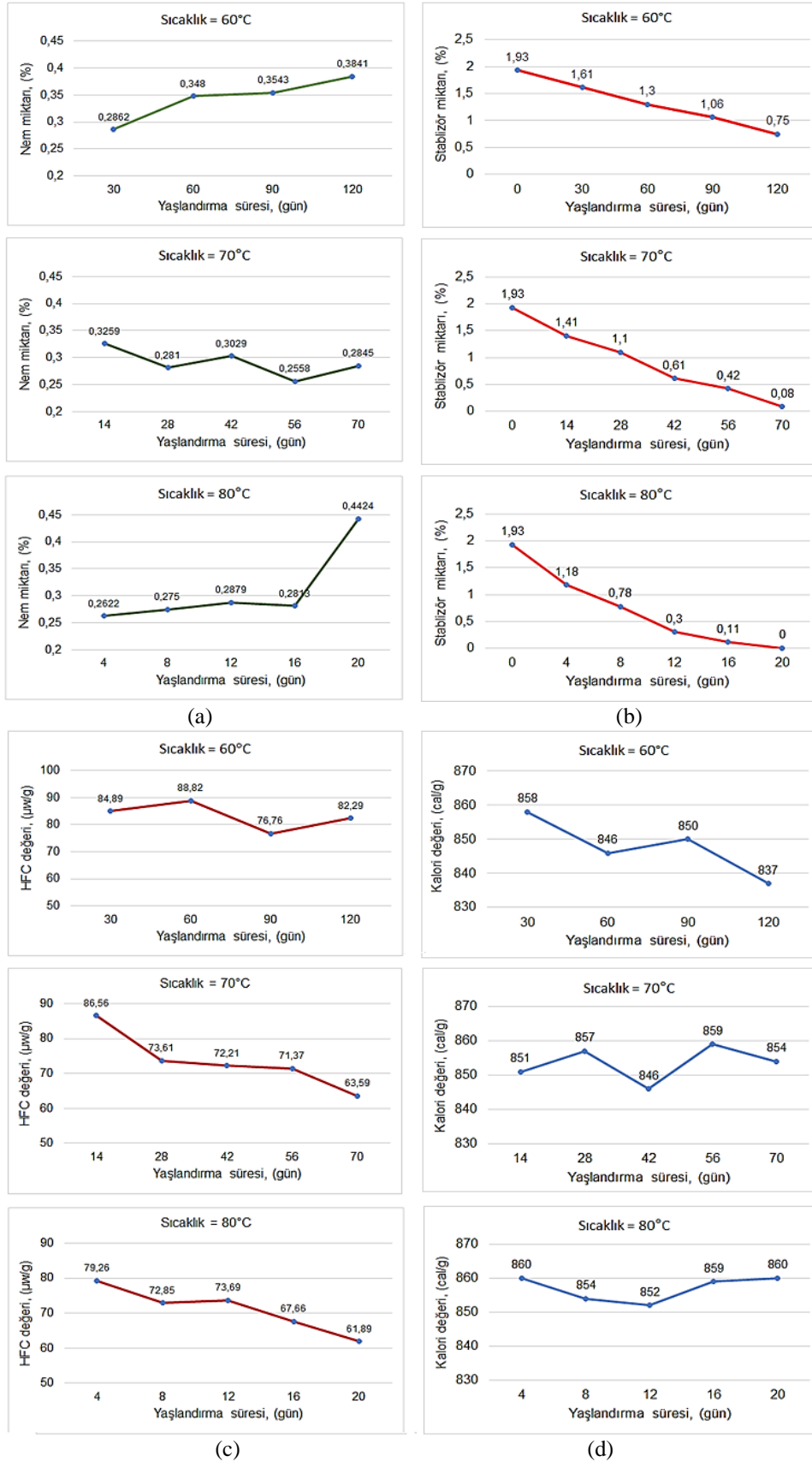
Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi (FTIR) testi *Perkin Elmer* markalı *Spectrum-100* modeli cihazda yapılmıştır. FTIR cihazı ile kızılötesi dalga boyunda ($0,75-1000 \mu\text{m}$ arası) ışınım yayılımı ile elde edilen spektrumlar ile maddelerin yapısında bulunan kimyasal bağların tespit edilmesi amaçlanmıştır. DY ve HY test numuneleri yaklaşık 0.5 ± 0.1 mm çaplarındadır. Bu sebeple numunelere küçültme işlemi uygulanmadan teste tabi tutulmuştur. Numune cihaza yerleştirilmeden önce Background spektrumu alındı. Daha sonra yakıt numunesi cihaza yerleştirildi ve dalga boyu taraması yapılarak spektrum alındı. Spektrum sonucuna göre elde edilen grafikten cihazın kütüphanesinden numuneler % uygunluk seviyesine göre (bu madde % 99 A olabilir gibi) sıralı liste vermektedir. DY yakıt numunemizin elde edilen FTIR spektrumuna göre yapılan test sonucunda cihaz malzeme cinsini 0,970134 olasılıkla "NX026.SP NX026, NGDP 0.15/1-12.0, GUNPOWDER SMOKELESS DB, EXPLOSA, COP" (Dumansız çift bazlı barut, patlama, COP) olduğu görülmüştür.

2.8.Mikroyapı (SEM) İncelemesi

Doğal yaşlanma ve hızlı yaşlandırma sonrası numunelerin yapısında meydana gelen değişimleri gözlemlenmek ve değerlendirme yapmak amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemesi yapılmıştır. SEM cihazı ile $\times 100$, $\times 500$ ve $\times 1500$ büyütmelemlerde yakıtın 3 farklı bölgesinden görüntüler alınmıştır. Görüntü alma işlemi Kırıkkale Üniversitesi'nde bulunan KÜBTUAM laboratuvarında *JEOL* markalı *JSM 5600* modeli elektron mikroskobu ile yapılmıştır.

3.Bulgular ve Tartışma

Bu deneysel çalışmadan elde edilen numuneler üzerinde yapılan nem tayini, stabilizör miktarı tayini, HFC testi ve Kalorifik Değer Ölçüm testi sonuçlarına göre çizilen grafikler toplu olarak Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. 60°C, 70°C, 80°C’de 4, 8, 12, 16 Ve 24 Gün Süreyle Yaşlandırılan Numunelerin (A) Nem Tayini, (B) Stabilizör Miktarı Tayini, (C) HFC, (D) Kalorifik Değer Ölçüm Testi Sonuçları

3.1. Nem Tayini Değerlendirmesi

Doğal yaşlanma ve Hızlı yaşlandırma sonrası yapılan Nem Tayininde elde edilen değerler kullanılarak çizilen grafikler Şekil 2a' da toplu olarak verilmiştir. Çift bazlı yakıtın % 60 nem ile yaşlanma sonrası nem miktarı sonucu üretim değeri maksimum % 0,6 olması istenmektedir. Test için numuneler gram cinsinden tartılarak alınmıştır. Elde edilen test sonuçlarına göre nem miktarının yapılan yaşlandırma sonrasında da maksimum % 0,6 değerini geçmediği görülmüştür. Buradan yakıtın uzun süre nem ortamına ve sıcaklığa maruz kalmasına rağmen nemden etkilenmediği gözlemlenmiştir. Yakıtın nem miktarına bağlı olarak performansında etki olmayacağı değerlendirilmektedir.

3.2. Stabilizör Miktarı Tayini Değerlendirmesi

HPLC Test Cihazı ile yapılan stabilizör miktarındaki azalma 60°C, 70°C ve 80°C sıcaklıklarda ve % 60 nem ortamındaki test sonuçlarına göre oluşturulan grafikler ise Şekil 2b'de verilmiştir. Test sonuçlarında 70°C'da 70 gün, 80°C'da 16 gün yaşlandırma yapılan numunelerin AOP-48 EDITION-II'ye göre minimum değer olan % 0.2 değerinin altına düştüğü, 80°C'de 20 gün yaşlandırma sonucunda stabilizör miktarının tamamen yok olduğu gözlemlenmiştir. Yaşlanmanın etkisi ise stabilizör miktarında gözle görülür azalma olduğu buna bağlı olarak yakıtın yapısında bozunma meydana geldiği ve meydana gelen bozunmanın depolama açısından tehlike yarattığı değerlendirilmektedir.

Stabilizör miktarının 60°C'de % 60 nem ile yaşlandırma sonuçlarına göre yakıtın en uzun süre olan 120 gün yaşlandırma süresi sonunda % 0,75 değerine kadar düştüğü görülmüştür. AOP-48 EDITION-II'ye göre minimum değer olan %0,2 değerinin üzerinde kalarak depolama emniyeti açısından tehlike arz etmediği değerlendirilmektedir. SEM görüntülerine göre 60°C'de 60 gün yaşlandırma süresi sonunda ucu sivri lifli bir yapı olduğu ve bu yapının yaşlandırma süreleri arttıkça daha da arttığı görüldü. Bu ucu sivri lifli yapının yakıt içindeki stabilizör azalmasına bağlı olarak nitroselülözün bozulmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Stabilizör miktarının 70°C'de % 60 nem ile yaşlandırma sonuçlarına göre yakıtın 56 gün yaşlandırma süresi sonuna kadar % 0,42 değerine kadar düşerek AOP-48 EDITION-II'ye göre minimum değer olan % 0,2 değerinin üzerinde kaldığı, depolama emniyeti açısından tehlike arz etmediği, 70°C'de en uzun süre olan 70 gün yaşlandırma süresi sonunda % 0,08 değerine kadar düştüğü gözlemlenerek AOP-48 EDITION-II'ye göre min:% 0,2 değerinin altında kaldığı, bu süre sonuna kadar yapılan yaşlandırma işleminin depolama emniyeti açısından tehlike arz ettiği değerlendirilmektedir. SEM görüntülerine göre 70 °C'da 28 gün yaşlandırma süresi sonunda ucu sivri lifli bir yapı olduğu ve bu yapının yaşlandırma arttıkça daha da arttığı gözlemlendi. Sıcaklığın bozunma hızını artırdığı gözlemlendi. Bu ucu sivri lifli yapının yakıt içindeki stabilizör azalmasına bağlı olarak nitroselülözün bozulmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Stabilizör miktarının 80°C'de % 60 nem ile yaşlandırma sonuçlarına göre yakıtın 12 gün yaşlandırma süresi sonuna kadar % 0,30 değerine kadar düştüğü AOP-48 EDITION-II'ye göre minimum değer olan % 0,2 değerinin üzerinde kaldığı, depolama emniyeti açısından tehlike arz etmediği, 80°C'de 16 gün sonunda % 0,11 değerine düştüğü AOP-48 EDITION-II'ye göre min:% 0,2 değerinin altında kaldığı, bu süre sonuna kadar yapılan yaşlandırma işleminin depolama emniyeti açısından tehlike arz ettiği ve 80°C'da 20 gün yaşlandırma sonucunda stabilizör miktarının % 0,00'a düşerek tamamen tükendiği AOP-48 EDITION-II'ye göre min:% 0,2 değerinin altında kaldığı, bu süre sonuna kadar yapılan yaşlandırma işleminin depolama emniyeti açısından tehlike arz ettiği değerlendirilmektedir. Bütün bu sonuçlara göre stabilizör miktarındaki azalmanın % 1,30'a ulaşmasıyla birlikte yapıdaki bozunmanın hızlandığı görülmektedir.

3.3.HFC Değerlendirmesi

% 60 nem ortamındaki HFC testi sonucunda cihazdan elde edilen grafik değerlerinin STANAG 4582'ye göre maksimum 114 µw/g geçip geçmediği tespit edilerek değerlendirildi. HFC testi sonucunda elde edilen test sonuçlarına göre çizilen grafikler Şekil 2c'de toplu olarak verilmektedir. Isı akış değerlerinin STANAG4582'ye göre maksimum 114µw/g'ı geçmediği gözlemlenmiştir (Meenakshi et al. 2011). Dolayısıyla yakıtın STANAG4582'ye göre ısı akış kalorimetresi değerlerinin uygun olduğu görülmüştür.

3.4.Kalorifik Değer Ölçüm Değerlendirmesi

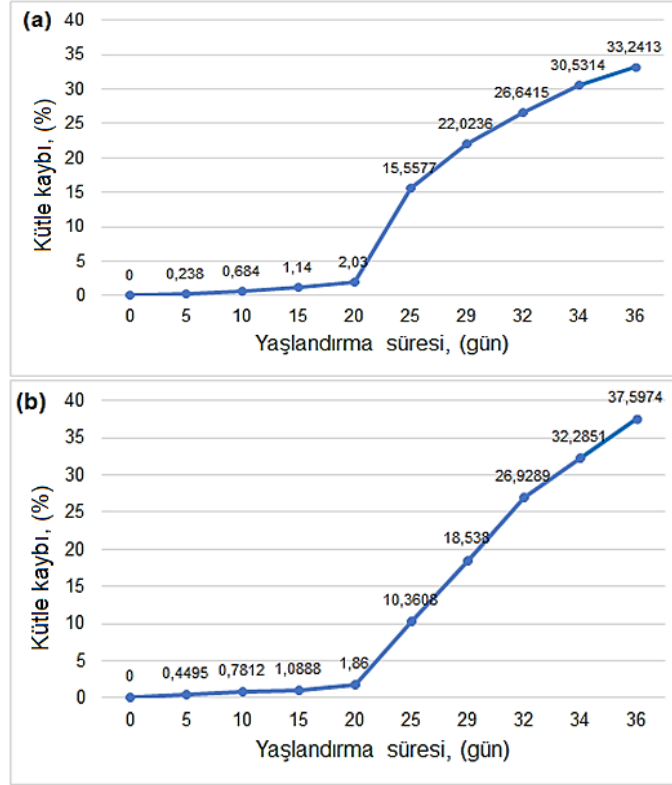
Kalorifik Değer Ölçüm Test sonuçları minimum 836 cal/g ve maksimum 864 cal/g değerini geçip geçmediği kontrol edilerek değerlendirilmiştir. Yapılan testler sonucunda yakıtın yaşlanma ile kalori değerinde gözle görünür değişiklik olmadığı verilen limit değerler arasında kaldığı görülmüştür. 60°C, 70°C ve 80°C'da Yaşlandırma Kalorifik Değer Ölçümü sonrası elde edilen değerlerden çizilen grafikler Şekil 2d'de toplu olarak verilmiştir.

60°C'da yapılan yaşlandırma işlemleri sonucunda yakıtın kalori değerinde gözle görünür şekilde değişim olmadığı, yakıt için alt ve üst sınır değerlerin dışında sonuç elde edilmediği, yaşlanmanın kalori değerini etkilemediği gözlemlendi. 70°C'da yapılan yaşlandırma işlemleri sonucunda yakıtın kalori değerinde gözle görünür şekilde değişim olmadığı, yakıt için alt ve üst sınır değerlerin dışında sonuç alınmadığı, yaşlanmanın kalori değerini etkilemediği gözlemlendi. 80°C'da yapılan yaşlandırma işlemleri sonucunda yakıtın kalori değerinde gözle görünür şekilde değişim olmadığı, yakıt için alt ve üst sınır değerlerin dışında sonuç elde edilmediği, yaşlanmanın kalori değerini etkilemediği gözlemlendi. Doğal Yaşlanma ve Hızlı Yaşlandırma sonrası yapılan Kalorifik Değer Ölçüm Test sonuçlarına göre

yakıtın kalori değerinde hızlı yaşlanma etkisi ile değişim olmadığı gözlemlendi. Bu durum bize yakıttaki hızlı yaşlanmanın kalori değeri üzerinde gözle görülür bir etkisi olmadığını göstermiştir.

3.5. Kütle Kaybı Değerlendirmesi

Kütle kaybı testinde AOP-7 Edition 2'ye göre numunenin %3'e kadar bozunması takip edilmiştir. Kütle Kaybı Test Verilerine göre oluşturulan grafikler Şekil 3'te verilmiştir.

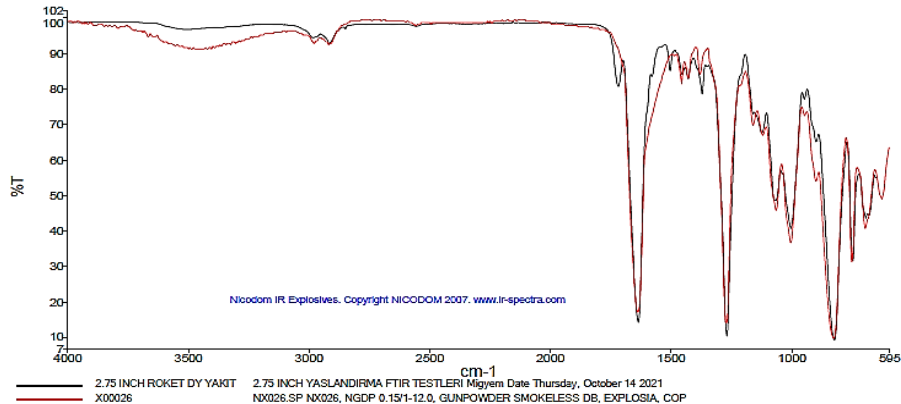


Şekil 3. Kütle Kaybı 1. Numune (a), Kütle Kaybı 2. Numune (b)

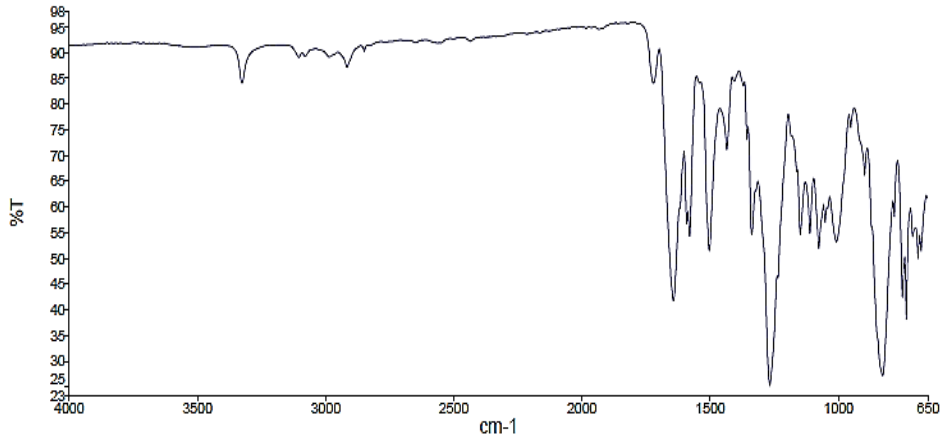
Yapılan testin teorik olarak 20-25 gün arasında sonlandırılması gerekmekte iken bozumanın tamamını görmek amacıyla maksimum süreye kadar gidilmiştir. Bu süre 36.gün olarak tespit edildi. 36. Gün sonunda bozunma tamamen gerçekleşmiş olup kütle kaybı 1.Numune için % 33,2413 ve 2. Numune için % 37,5974 olarak gerçekleşmiştir.

3.6. FTIR Değerlendirmesi

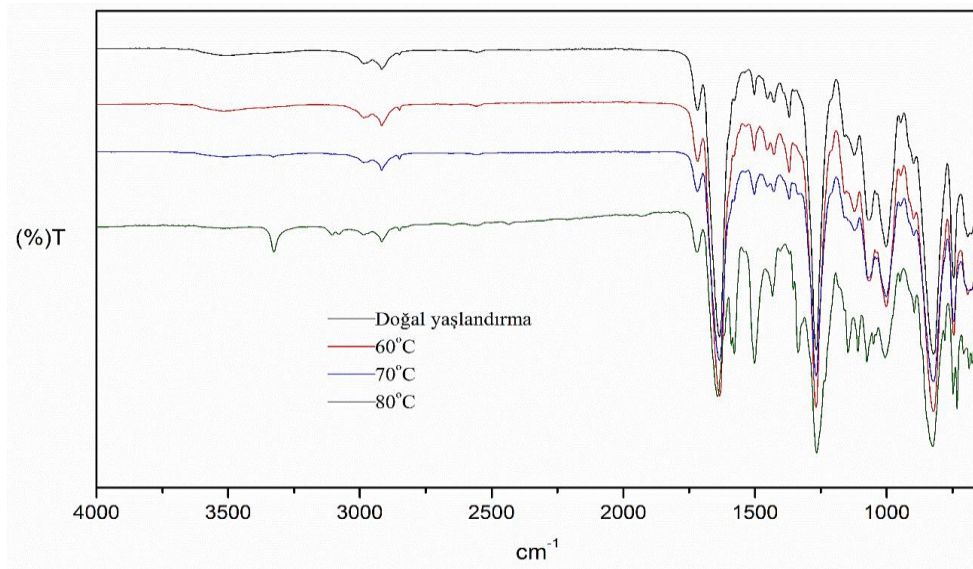
DY yakıtın FTIR spektrumu Şekil 4'te, 80°C'de 20 Gün Yaşlanmış yakıt FTIR spektrumu Şekil 5'te verilmiştir. Tüm yaşlandırma deneylerini aynı şartlarda değerlendirebilmek için, doğal ve 60°C, 70°C ve 80°C'da yapılan yaşlandırma testleri birlikte gösteren FTIR spektrumu ise Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 4. DY Yakıt FTIR Spektrumu



Şekil 5. 80 Derece 20 Gün Yaşlanmış Yakıt FTIR Spektrumu



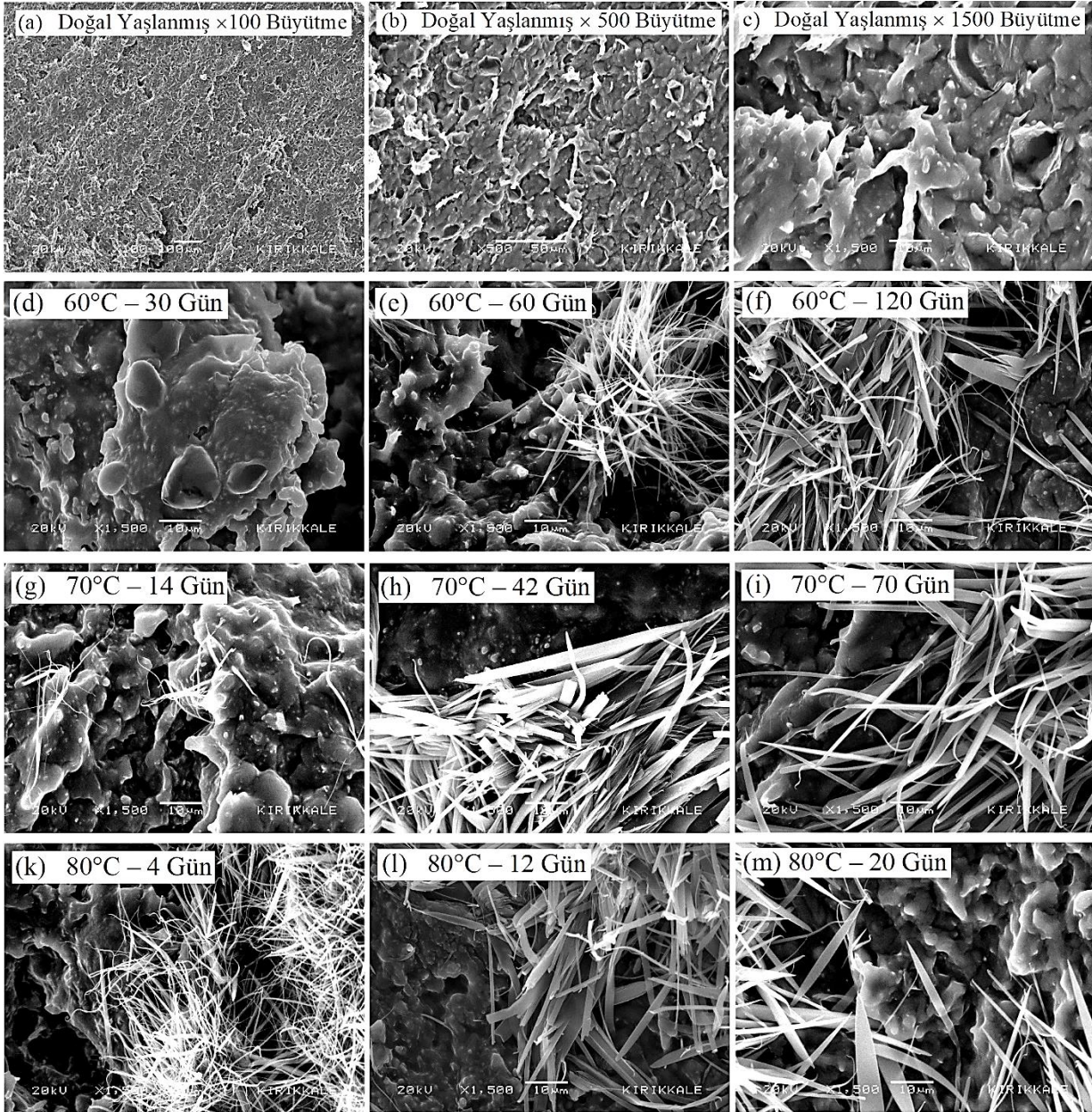
Şekil 6. Doğal Yaşlanmış, 600C, 700C Ve 800c'de Sıcaklıklarda Süreyle Yaşlandırılmış Çift Bazlı Yakıt Numunelerinin FTIR Spektrumu

Şekil 6'daki spektruma bakıldığında, 1650 cm^{-1} , 1250 cm^{-1} ve 800 cm^{-1} civarında nitroselüloz ve nitrogliserin yapısındaki $-\text{NO}_2$ gruplarına ait karakteristik keskin bantlar görülmektedir. Bununla birlikte, 3500 cm^{-1} de bulunan geniş pik $-\text{OH}$ gruplarına, 3100 cm^{-1} civarındaki pik ise alifatik $-\text{CH}$ bağlarını gösteren bantlar nitroselüloz ve nitrogliserine ait karakteristik piklerdir (Jegade et al. 2019; Ossa et al. 2012). Ayrıca numune içeriğinde bulunan dietilfitalat molekülünde bulunan $-\text{C}=\text{O}$ (karbonil) grupları ise 1700 cm^{-1} civarında gözlemlenmektedir.

Yaşlandırma işleminde sıcaklığın artması ile birlikte, $-\text{OH}$ gruplarına ait 3500 cm^{-1} civarında görülen geniş bandı kaybolurken bunun yerine $-\text{NH}_2$ gruplarına ait 3300 cm^{-1} civarında keskin bandının oluştuğu görülmektedir. Bu durum, ham numunedeki bulunan bağıl nemin ısı etkisiyle ortamdaki uzaklaşması ve numunedeki stabilizörün açığa çıkması ile amin gruplarının oluşması ile açıklanabilir. Yaşlandırma testlerinde süre artışı ile 3080 cm^{-1} -3100 cm^{-1} civarında görülen alifatik $-\text{CH}$ gruplarını gösteren bandın şiddetinde artış gözlenmiştir. Bununla birlikte, yaşlandırma işleminin etkisi sonucunda, 1700 cm^{-1} görülen $-\text{C}=\text{O}$ gruplarına ait banttaki küçülme dietilfitalatın bozunduğunu düşündürmektedir.

3.7. Mikroyapı Değerlendirmesi

Yaşlandırma deneyleri sonrası elde edilen yakıt numunelerinin farklı bölgelerinden farklı büyütme ($\times 500$ ve $\times 1500$) değerlerinde çekilen SEM görüntüleri Şekil 7'de verilmiştir. Yaşlandırma işleminin mikroyapıya etkilerini daha net olarak değerlendirebilmek amacıyla her sıcaklık derecesi için en az, orta ve en çok sürelerde yaşlandırılmış numunelerin SEM görüntüleri seçilmiştir.



Şekil 7. %60 Nem Ortamında DY, 60°C, 70°C Ve 80°C’de Farklı Sürelerde Yaşlandırılmış Çift Bazlı Yakıtlara Ait Mikroyapılar

Şekil 7’deki SEM görüntüleri incelendiğinde yaşlandırma işleminin yakıtın kimyasal yapısında meydana getirdiği değişimler açıkça görülmektedir. Yaşlandırma sıcaklığının ve süresinin artmasıyla bozunmanın arttığı ve yakıt içerisinde farklı yapıların oluştuğu anlaşılmaktadır. SEM mikrograflarında da görüldüğü üzere ucu sivri lifli bir yapının meydana geldiği ve buna yakıt içerisindeki stabilizörün bozunmaya başlaması ile içeriğinde bulunan nitroselülozün de bozunmasının sebep olduğu anlaşılmaktadır. Bu yapının yaşlanma süresi arttıkça daha da arttığı görülmektedir. Sıcaklığın artışı bozunma hızını artırdığı da anlaşılmıştır. SEM görüntüleri toplu olarak değerlendirildiğinde; yaşlandırmayla oluşan yapısal bozunmaya esas iki parametre olan sıcaklık ve süre artışının etkili olduğu söylenebilir. Zira 60°C’de 30 Gün yaşlandırma sonrası yakıtın (Şekil 7-d) kimyasal yapısında lifli yapı görünmezken, 80°C’de 4 Gün yaşlandırılmış yakıtta (Şekil 7-k) bozunmaya bağlı olarak ortaya çıkan yoğun miktarda lifli yapı görülmektedir. Bunlarla birlikte sıcaklık artışı ile bozunmanın da arttığı, sıcaklığın 60°C’den 80°C’ye çıkması ile birlikte stabilizörün bozunmasına bağlı olarak (amin türevleri) yüzeyde kristal yapıda olduğu düşünülen lif geometrisinde yeni yapıların oluştuğu görülmektedir. Bu sonuçlar FTIR analizlerinden elde edilen sonuçlarla uyum içerisindedir (Jegade et al. 2019).

4.Sonuçlar

Bu çalışmada Çift bazlı yakıtta 60°C, 70°C ve 80°C’da % 60 nem ortamında hızlı yaşlandırma işleminden sonra yapılan birtakım testler neticesinde, doğal yaşlanmış ve hızlı yaşlanmış yakıtlardaki değişimler incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Nem tayini testi için elde edilen verilere göre nem miktarının yapılan yaşlandırma sonrasında da maksimum % 0,6 değerini geçmediği görülmüştür. Buradan yakıtın uzun süreli nem ortamına ve sıcaklığa maruz kalmasına rağmen nemden etkilenmediği gözlemlenmiştir. Yakıtın nem miktarına bağlı olarak performansında etki olmayacağı değerlendirilmiştir.
- Stabilizör miktarı tayini testi için elde edilen veriler incelendiğinde yaşlanma etkisi ile gözle görünür şekilde stabilizör miktarında azalma meydana geldiği ve buna bağlı olarak yakıtın kararlılığını yitirmeye başladığı, sıcaklık arttıkça bozunmanın arttığı ve stabilizör miktarının tamamen tükendiği, bozunma ile yakıtın yapısında lifli görünüm meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca sıcaklığın artmasıyla yaşlanma süresinin de kısaldığı tespit edilmiştir.
- Kalorifik değer ölçüm testi için elde edilen veriler incelendiğinde yaşlanma etkisi ile yakıtın kalori değerinin üretim değerleri sınırı içerisinde kaldığı ve kalori değeri olarak performansını etkilemeyeceği değerlendirilmiştir.
- Kütle kaybı testi için elde edilen veriler incelendiğinde oto katalitik bozunmanın (%3 düşüş) 90°C için teorik olarak 20-25 gün arasında meydana geldiği gözlemlenmiştir.
- SEM görüntüleri incelendiğinde yaşlanma etkisi ile yakıtın yapısında lifli yapı meydana geldiği, oluşan lifli yapının stabilizör miktarında azalma ile açığa çıkan NO ve NO₂ gazları çıkışından kaynaklı olarak nitroselüloz uç kısımlarından bağ kopması ile lifli yapının arttığı, lifli yapının sıcaklık ile doğru orantılı olarak arttığı değerlendirilmektedir.
- FTIR spektrumları incelendiğinde yakıtın yaşlanması ile yapıda bozunma meydana geldiği, bozunma ile -OH grubunun kaybolduğu, -NH₂ ve -CH gruplarının arttığı, -C=O gruplarına bağlı olarak dietil ftalatın bozunduğu değerlendirilmektedir.

Referanslar

AOP-7 Edition 2:2003 - Manual Of Data Requirements and Tests For The Qualification Of Explosive Materials For Military Use is a Nato/Pfp Unclassified publication

AOP-48 EDITION-II:2007 - Explosives, Nitroselüloz Based Propellants, Stability Test Procedures and Requirements Using Stabilizer Depletion is a NATO/P/P Unclassified publication

Bababurun, C.B. (2020). Kompozit Esaslı Katı Roket Yakıtlarının Yaşlanmaya Bağlı Mekanik Özelliklerinin Deneysel Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı, Kırıkkale.

Chaia, H., Duanb, Q., Caob, H., Lib, M., Qib, K., Sunb, J. & Yang, X. (2020). Experimental study on the effect of storage conditions on thermal stability of nitrocellulose, Applied Thermal Engineering, 180, 115871. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115871

Courty, L., Gillard, P., Ehrhardt, J. & Baschung, B. (2021). Experimental determination of ignition and combustion characteristics of insensitive gun propellants based on RDX and nitrocellulose, Combustion and Flame, 229, 111402. Doi:10.1016/j.combustflame.2021.111402

Elghafour, A.M.A., Radwan, M., Fahd, A., Mostafa, H.E. & Elbasuney, S. (2018). Novel approach to quantify the chemical stability and shelf life of modified double-base propellants. Defence Technology, 14(6), 720-724. doi:10.1016/j.dt.2018.07.003

Ergun, T. (2017). Katı Sevk Yakıtlarının Yaşlanmaya Bağlı Balistik Performanslarının Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı, Kırıkkale.

Fernandez de la Ossa M.A., Torre, M. & Garcia-Ruiz, C. (2012). Nitrocellulose In Propellants: Characteristics and Thermal Properties, Advances in Materials Science Research. 7, 201- 220.

Gonçalves, R.F.B., Rocco, J.A.F.F. & Iha, K. (2008). Thermal Decomposition Kinetics of Aged Solid Propellant Based on Ammonium Perchlorate-AP/HTPB Binder. Applications of Calorimetry in a Wide Context-Differential Scanning Calorimetry, Isothermal Titration Calorimetry and Microcalorimetry, Chapter 14, 325-342. doi:10.5772/52109

Jegade, D.O., Adewuyi, G.O., Gbadamosi, M.R., Oladoye, P.O., Ogunneye, A.L. & Oyewola, O.J. (2019) Degradation of Diethyl Phthalate and Di (2-Ethylhexyl) Phthalate Using Chemical and Microbial Methods, Nigerian Journal of Chemical Research. 24(2), 77-89.

Kaur, N., Kaimal, M. & Toley, B. (2021). Effect of storage conditions on the performance of nitrocellulose test strips used in lateral flow assays, Analytical chemistry, ChemRxiv. Version 1, doi:10.33774/chemrxiv-2021-4xjh5

Kenneth K.K and Acharya R. (2012). Solid Propellants And Their Combustion Characteristics. (1st ed.) John Wiley & Sons, Inc.

Li, G., Jin, B., Chai, Z., Ding, L., Chu, S. & Peng, R. (2020). Synthesis and crystal characterization of novel fulleropyrrolidines and their potential application as nitrocellulose-based propellants stabilizer, Polymer Degradation and Stability. 172, 109061. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2019.109061

Li, Z.P., Jiang, J.C., Huang, A.C., Tang, Y., Miao, C.F., Zhai, J., Huang, C.F., Xing, Z.X., & Shu, C.M. (2021). Thermal hazard evaluation on spontaneous combustion characteristics of nitrocellulose solution under different atmospheric conditions, *Scientific Reports*, 11, 24053. doi:10.1038/s41598-021-03579-z

Mattar, H., Baz, Z., Saleh, A., A.S.A, Azzazy, A.E., Salah, H. & Ismail I. (2020). Nitrocellulose: Structure, Synthesis, Characterization, and Applications, *Wat.Ener.Food.Env.J*, 1(3)1-15. <http://dx.doi.org/10.18576/wefej/010301>

Meenakshi, R., Jaganathan, L., Gunasekaran, S. & Srinivasan, S. (2012) Molecular structure and vibrational spectroscopic investigation of nitroglycerin using DFT calculations, *Molecular Simulation*, 38(3), 204-210. doi:10.1080/08927022.2011.614240

Rychly, J., Lattuati-Dericieux A., Matisova'-Rychla', L., Csomorova', K., Janigova', I. & Lave'drine, B. (2012). Degradation of aged nitrocellulose investigated by thermal analysis and chemiluminescence. *J Therm Anal Calorim*. 107, 1267–1276. doi:10.1007/s10973-011-1746-8

STANAG 4582:2001- Explosives.Nitroselluloz Based Propellants, Stability Test Procedure and Requirements Heat Flow Calorimete.

Venkatachalam, S., Santhosh, G. & Ninan, K.N. (2002). High Energy Oxidisers for Advanced Solid Propellants and Explosives. *Advances in Solid Propellant Technology*, P1 International HEMS Workshop, 87-106.

Vogelsanger, B. (2004). Chemical Stability, Compatibility and Shelf Life of Explosives, *Explosives. CHIMIA International Journal for Chemistry*. 58(6), 401-408. doi:10.2533/000942904777677740

Zalewski, R. & Wolszakiewicz, T. (2011). Analysis of Uniaxial Tensile Tests for Homogeneous Solid Propellants under Various Loading Conditions, *Central European Journal of Energetic Materials*, 8(4), 223-231.



Bor Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Termal Özelliklerine Nano Bor İlavesinin Etkileri

The Effects of Nano Boron Addition on the Thermal Properties of Boron Fiber Reinforced Polymer Composite Materials

Ayhan Şahin^{1*}, Hanifi Çinici², Erdem Mermer³

¹Üniversiteler mah. ODTÜ yerleşkesi. Tübitak Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü Çankaya/ANKARA

²Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Yenimahalle/ANKARA

³Fethiye Mahallesi, Havacılık Bulvarı No:17 Tusaş Merkez Yerleşke Kahramankazan/Ankara

Başvuru/Received: 22/06/2022

Kabul / Accepted: 30/09/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Bu çalışmada, elyaf bor fiber takviyeli prepreglerin (Specialty Materials 5505 Boron Epoxy Prepreg Tape) epoksi reçine (Hexcel RTM6) kullanılarak serim yöntemi metodu ile tabakalı kompozit malzeme üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemeler dokuz kat tabakalı nano bor ilaveli ve nano bor ilavesiz olarak iki farklı türde hazırlanmıştır. Bir grup numunede sadece epoksi reçine kullanılırken diğer grup numunede epoksi içerisine deneme yöntemi ile (akışkanlığa bakılarak) % 0.074 oranında nano bor katılmış ve otoklavda 24 saat kürlenerek tabakalı kompozit haline getirilmiştir. Oluşturulan tabakalı kompozit malzemeler, su jeti ile kesilerek Q800 test cihazında sıcaklık rampası (Temperature Ramp) metodu kullanılarak Dinamik Mekanik analizleri ve Q20 test cihazında EN 6064 standardına göre Diferansiyel Tarama Kalorimetre analizlerine tabi tutulmuştur. Testler sonucunda epoksi reçineye katılan nano bor katkı tabakalı kompozit malzemenin termal mekanik değerlerinin aynı kaldığı ve epoksi reçine içerisine ilave edilen nano bor malzemesinin, bor fiber takviyeli kompozitlerin termal özelliklerini olumsuz etkilemediği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bor fiber kompozitlere nano bor ilave edilmesinin kompozitlerin, mekanik ve radar etkenleri altında performanslarında olumsuz etkilerinin olmayacağı değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Bor prepreg, Nano bor, Dinamik mekanik analiz, Diferansiyel tarama kalorimetre”

Abstract

In this study, layered composite material was produced by the method of laying method using epoxy resin (Hexcel RTM6) of fiber boron fiber reinforced prepregs (Specialty Materials 5505 Boron Epoxy Prepreg Tape). The composite materials produced were prepared in two different types with the addition of nano boron with nine layers and without the addition of nano boron. While only epoxy resin was used in one group of samples, 0.074% nano boron was added to epoxy in the other group of samples by experimental method (based on fluidity) and it was cured for 24 hours in an autoclave and turned into a layered composite. The layered composite materials created were cut by water jet and subjected to Dynamic Mechanical analysis using the Temperature Ramp method in the Q800 tester and Differential Scanning Calorimeter analysis in accordance with the EN 6064 standard in the Q20 tester. As a result of participating in the tests epoxy resin nano boron-doped composite material of epoxy resin is added into the values remain the same thermo and mechanical Nano-boron, boron does not adversely affect the thermal properties of fiber reinforced composites. Therefore, it has been evaluated that adding nano boron to boron fiber composites will not have negative effects on the performance of composites under mechanical and radar factors.

Key Words

“Boron Prepreg, Nano Boron, Dynamic Mechanical Analysis, Differential Scanning Calorimeter”

1. Giriş

Bir kompozit malzeme, önemli ölçüde farklı makroskopik davranışa sahip iki veya daha fazla farklı bileşen ve her bir bileşen arasında (mikroskopik düzeyde) ayrı bir arayüz içeren bir malzeme olarak kabul edilir (George H. Staab.,1999; M. Balasubramanian., 2014). Teknolojik olarak en önemli kompozitlerden olan fiber takviyeli kompozitlerde, son derece yüksek özgül dayanım ve modül değerleri sağlanmaktadır. Lif oryantasyonu, içeriği ve dağılımı, mukavemet ve diğer özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sürekli lifler normal olarak hizalanırken, süreksiz lifler kısmen hizalanabilir veya rastgele hizalanabilir. Fiberlerin mekanik olarak elastikiyet modülüne etkisi fazla olup, rijitliği (sertlik) önemli derecede etkiler. Matrisin görevi fiberleri bir arada tutup, gelen yükleri fiberlere iletmektir. Fiberlerin ana matrise yerleştirilmesinde ve seçim aşamasında arayüz bağlanma, oryantasyon, hacimsel yoğunluk, fiber çap önemli etkenlerdir. Fiberlerin birçok çeşidi vardır. Bunlar; cam,elyaf,seramik,karbon,bor fiberlerdir. Bor fiberler kompozitler de kullanılan ilk yüksek performanslı fiberlerdendir. Buhar biriktirme (CVD) yöntemi ile ısıtılmış çekirdek (Tel, altlık) üzerine bor kaplanarak üretilir. Fiberler arasında en yüksek fiber çapına sahiptir (0.1 ile 0.2 mm ve 125 ile 140 µm). Elastikiyet modülü yaklaşık 410 Gpa, çekme direnci yaklaşık 3450 Mpa' dır. Büyük çap değerinden dolayı yüksek sertliğe neden olur. Diğer yandan bor fiber takviyeli kompozitlerde fiber çapının büyük olması yüksek elastikiyet modülüne katkıda bulunur ve mükemmel basma gerilmesi sağlar (Mark E.Tuttle, 2013; Krishan K.Chawla, 2011; E Eryıldız et al., 2015;B Kalaycıoğlu et al., 2009). Polimerler genel olarak termoplastik ve termosetler olmak üzere iki tipe ayrılır. Termoset polimerlerde kimyasal bağlar çapraz bağlandığı için tekrar sıvı formuna dönüş olmaz. Termoset polimerler için en bilinen örnekler doymamış polyester ve vinly esterlerdir. Diğer yaygın termosetler epoksi ve fenolik reçinelerdir (S.T.Peters,1998). Epoksiler,esas olarak havacılık ve hava araçlarında kullanılırlar. Polyester ve vinly esterler ise yaygın olarak otomobil, denizcilik, kimyasal ve elektrik uygulamalarında kullanılırlar. Fenolikler, döküm kalıplama bileşiklerinde, poliamid, polibenzimidazol (PBI), polyphenylquinoxaline (PPQ), yüksek sıcaklık uzay uygulamalarında (250 °C – 400 °C), ,Naylon (Naylon 6, Naylon 6,6), termoplastik polyester (PET, PPT), polycarbon (PC) gibi termoplastik polimerler, enjeksiyon kalıplarında kullanılırlar. Poliamid-imid (PAI), Polieter eter keton (PEEK), Polisülfon (PSU), Polifenilen sülfüt (PPS) , Polietilenimin (PEI), sürekli fiberlerin ortalama yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılır (P.K. Mallick,2007).

Kauçuk oluşumu (Jelleşmiş) ve camsı durumları epoksi gibi amorf polimerlerin karakteristiğidir. Bazı polimerler nispeten düşük sıcaklıklarda bazıları ise yüksek sıcaklıklarda camsı hale gelir ve sonradan genelde yeniden kauçuklaşır. Normal polimerizasyon sistemi camsı durumda kalır ve tasarlanması oldukça zordur. Camsı geçiş sıcaklığı oldukça önemlidir (Alan Baker et al., 1987). Havacılık ve uzay sanayinde yaygın kullanılan epoksiler en temel termoset matris malzemelerinden biridir. İstenilen özelliklere (vizkozite kontrolü, esneklik, ultraviyole koruma, kürlenme için vb.) göre farklı tipte epoksi reçineleri farklı katkı maddeleriyle katkılanılarak üretilirler. Epoksi reçineler polyesterler göre daha pahalıdır ancak daha iyi nem direncine, kürlenme sırasında daha düşük çekmelere (~ % 3) daha yüksek kullanım sıcaklıklarına dayanım özelliklerine sahiptir. Kompozitlerin geliştirilmesinde ve çeşitli durumlar için matris malzeme olarak oldukça yoğun kullanılır (Suong V. Hoa, 2009). Havacılık-Uzay sektöründe Termoset, termoplastik, seramik matrisli kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır (Michael Chun et al., 1992). Fiber takviyeli kompozitlerde mekanik özellikleri etkileyen önemli faktörlerden bir tanesi de fiber yönleridir (P.K. Mallick,2007). Basma, çekme, kesme, dinamik mekanik analiz (DMA), diferansiyel tarama kalorimetre (DSC) testleri fiber takviyeli kompozitlerin karakterizasyonu için genel olarak uygulanan testlerdir. Bunlar arasında termal analiz yapılarak mekanik özellikleri ile ilgili değerlendirme yapılabilecek analiz yöntemleri DMA ve DSC analizleridir. Dinamik mekanik analiz, zamanın bir fonksiyonu olarak numuneye uygulanan gerilme veya gerinimdeki değişiklik nedeniyle oluşan gerilme veya gerinme açısından numunelerin kinetik özelliklerini ölçmek için kullanılan bir karakterizasyon tekniğidir. Dinamik mekanik analiz, numuneye sabit gerilme veya gerinme uygulanarak zamanın bir fonksiyonu olarak gerilme veya gerinimdeki değişim açısından viskoelastik özelliklerin değerlendirilmesiyle tanımlanır. Mekanik özellikleri zamanın bir fonksiyonu olarak ölçmek için de kullanılabilir (Mukesh Kumar Singh et al., 2022). Dinamik mekanik analiz (DMA) esasen bir gerilme veya gerinme modülasyonlu termo mekanik analiz (TMA) dir. Polimerlerin ve liflerin mekanik özelliklerini belirlemek ve cam geçiş sıcaklığını ve diğer ikinci dereceden geçişleri (α , β , vb.) ölçmek için yaygın olarak kullanılır (Michael et al., 2020). DSC ise kalorimetri, kalori ve ölçüm kombinasyonundan elde edilir. Termal analiz, malzemeye giden ve gelen ısı akışını ölçerek bir malzemedeki enerji değişikliklerini incelemek için kullanılır. Kalorimetri, tipik bir ilgi süreciyle bağlantılı entalpinin doğrudan tahminini yapmak için kullanılan temel bir tekniktir. Başka bir deyişle, cihaz, zaman ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak numune malzeme geçişlerine bağlı sıcaklık ve ısı akışını düzenleyen bir termal analiz cihazıdır. Bir sıcaklık değişimi sırasında DSC, numune ile referans arasındaki sıcaklık farkına dayanarak numune tarafından yayılan veya emilen bir ısı miktarını ölçer (Mukesh et al., 2022). Bu çalışmada, Havacılık-Uzay sektöründe oldukça yaygın kullanılan fiber takviyeli polimer prepreglerden üretilen tabakalı kompozit yapılarda ana matris olan polimer malzemeye tek yönlü bor fiber ile birlikte nano partikül bor katılarak hibrid takviyeli kompozit malzeme üretilmiş ve üretilen hibrit takviyeli kompozitlerin termal analiz yöntemi ile karakterizasyon yapılarak kompozit sektöründe yeni bir bakış açısı kazandırılmak istenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada 2 farklı kompozit malzeme üretilmiştir. Üretim sonrasında bu kompozitlerin bazı özellikleri analiz edilmiş ve kıyaslanmıştır. Üretim sırasında kullanılan malzemeler ile ilgili veriler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Üretimde Kullanılan Malzemelerin Bazı Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Basma Mukavemeti (Mpa)	Kesme Dayanımı(Mpa)
Bor Fiber Prepreg (Specialty Materials 5505 Boron Epoxy Prepreg Tape)	2	1590	2930	110
Nano Bor	2.84	261	2583	180
Kürlenmiş Reçine(RTM6)	1.14	90	320	115

Çalışmada kullanılan bor fiber prepreg malzemesi (Specialty Materials 5505 Boron Epoxy Prepreg Tape) kullanılmış, Reçine olarak HexFlow RTM6 epoxy kullanılmış, gerekli yerde reçineye nano bor eklenerek serim yöntemi ve otoklav kürlenme yaparak üretilmiştir.

Kompozit malzemenin elde edilmesi için ilk olarak ihtiyaç duyulan, soğutucudan çıkartılan reçinenin miktarı hesaplanmış (Resim 1) oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra aynı reçineler oda sıcaklığında kuru bir ortamda katkı- katkısız olarak Resim 2’de görüldüğü gibi 2 farklı türde üretilmiştir. Katkılı denemede 4 g epoksi reçineye 0.030 g nano bor eklenmiş, topaklanmayı engelleyecek şekilde homojen olarak karıştırılmıştır.

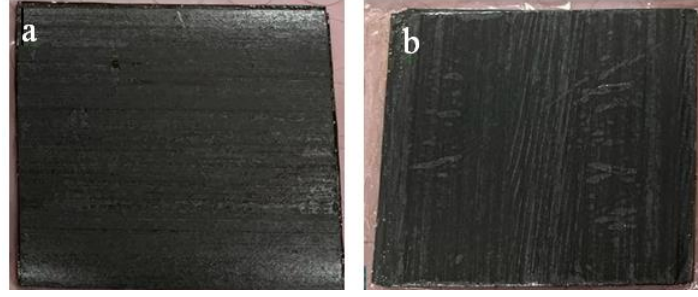


Resim 1. HexFlow® RTM6 Epoxy reçine



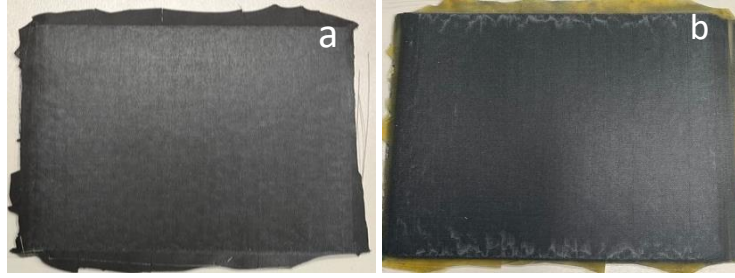
Resim 2. Üretimde kullanılan reçineler; a) Nano bor katkıli epoksi reçine b) Katkısız epoksi reçine

Kompozit malzemenin elde edilmesi için reçine hazırlandıktan sonra tek yönlü bor fiber prepreg aynı odada 9 kat olacak şekilde ve test numuneleri dikkate alınarak hacim miktarı hesaplanmış ve serim yöntemi ile otoklava hazır hale getirilmiştir. (Resim 3.)



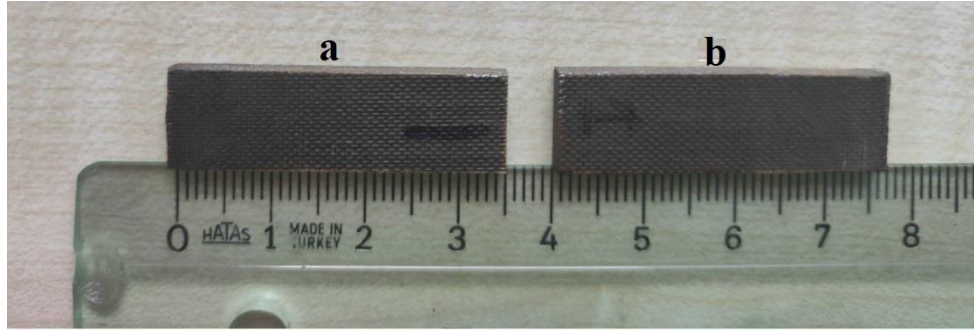
Resim 3. Otoklava hazır tabakalı kompozit malzemeler. a) Nano bor katkılı b) Nano bor katkısız

Resim 3'te verilen ve otoklava hazır halde üretilen kompozit malzemeler, 80 °C ön sıcaklıkta 1 saat bekletildikten sonra 180 °C sıcaklıkta 15 mbar vakum altında 3 saat kürlenmesi için bekletilmiştir.(Resim 4.)



Resim 4. Son ürün tabakalı kompozit malzemeler; a) Nano bor katkılı tabakalı kompozit malzeme b) Katkısız tabakalı kompozit malzeme.

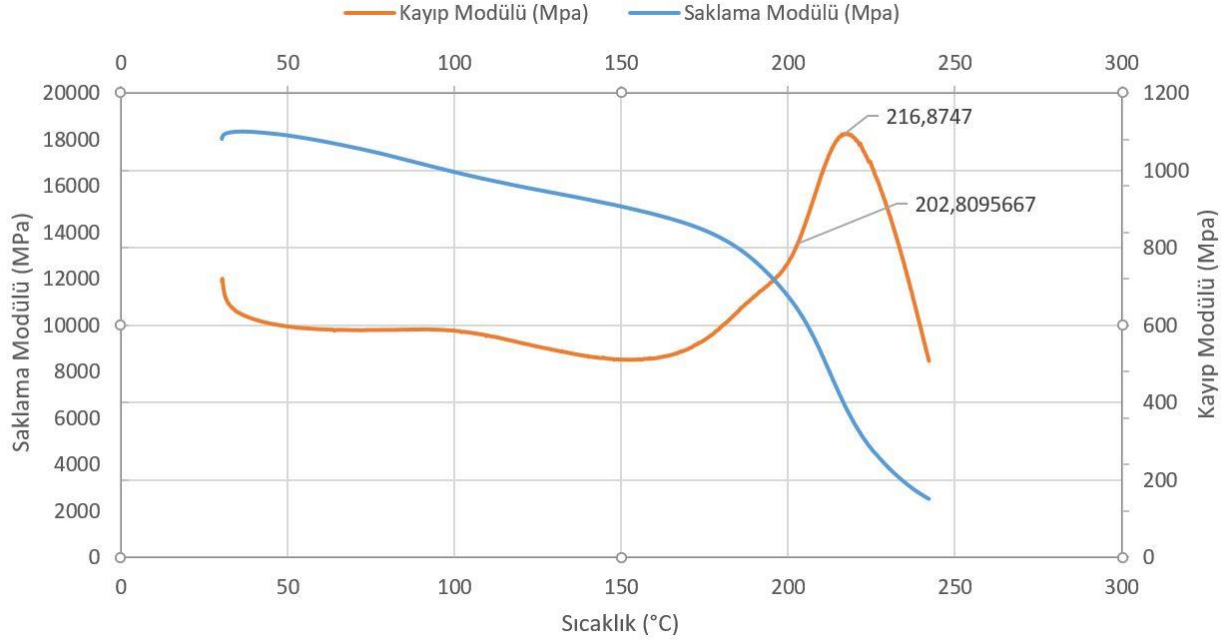
Üretimi gerçekleştirilen kompozit malzemeler fırından çıktıktan sonra çeşitli analizler için üç adet olmak üzere DMA için; 35x10.55x3.35 mm ölçülerinde, DSC içinse 5x5x3.35 mm ölçülerinde kesme tezgâhında elmas uçlu testere ile kesilmiştir. (Resim 5.)



Resim 5. Tabakalı kompozit malzeme ölçülü test numuneleri; a) Nano bor katkısız tabakalı kompozit malzeme test numunesi b). Nano bor katkılı tabakalı kompozit malzeme test numunesi

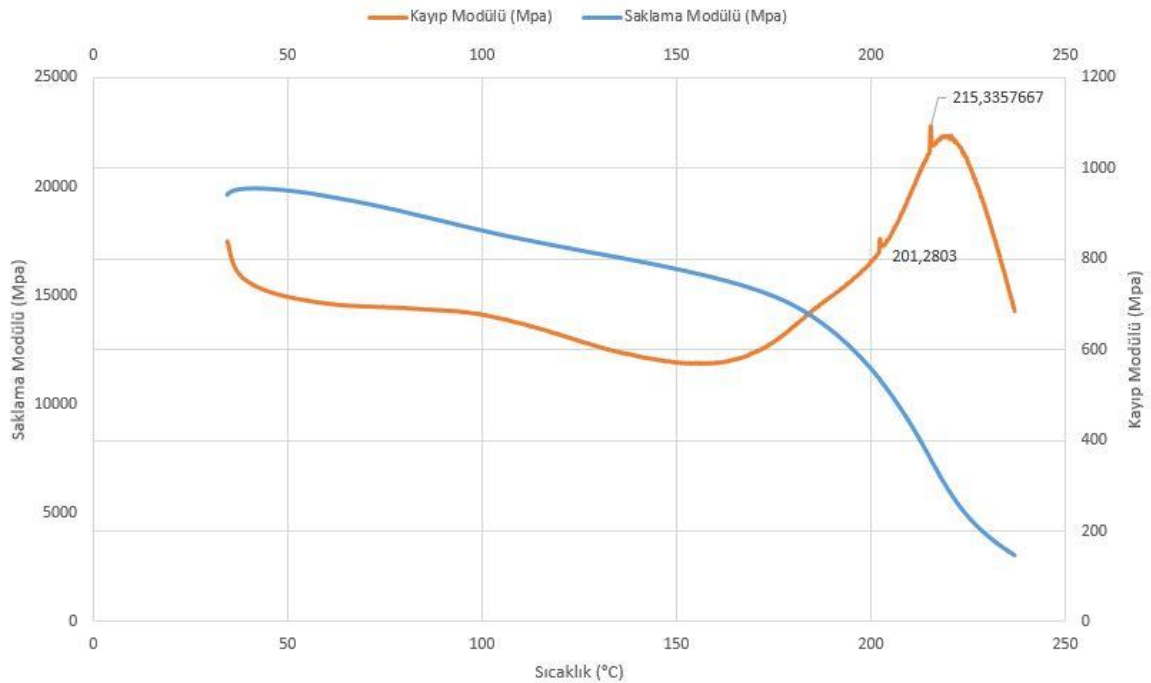
3. Bulgular ve Tartışma

Bor fiber takviyeli polimer prepreglerden reçine, nano bor katkılı ve katkısız olarak iki farklı türde üretilen tabakalı kompozit malzemelere yapılan DMA ve DSC testi sonuçları birbiriyle mukayese edilerek incelenmiştir. DMA test sonuçları; Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3'te, DSC test sonuçları ise sırasıyla Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6 'da gösterilmiştir.



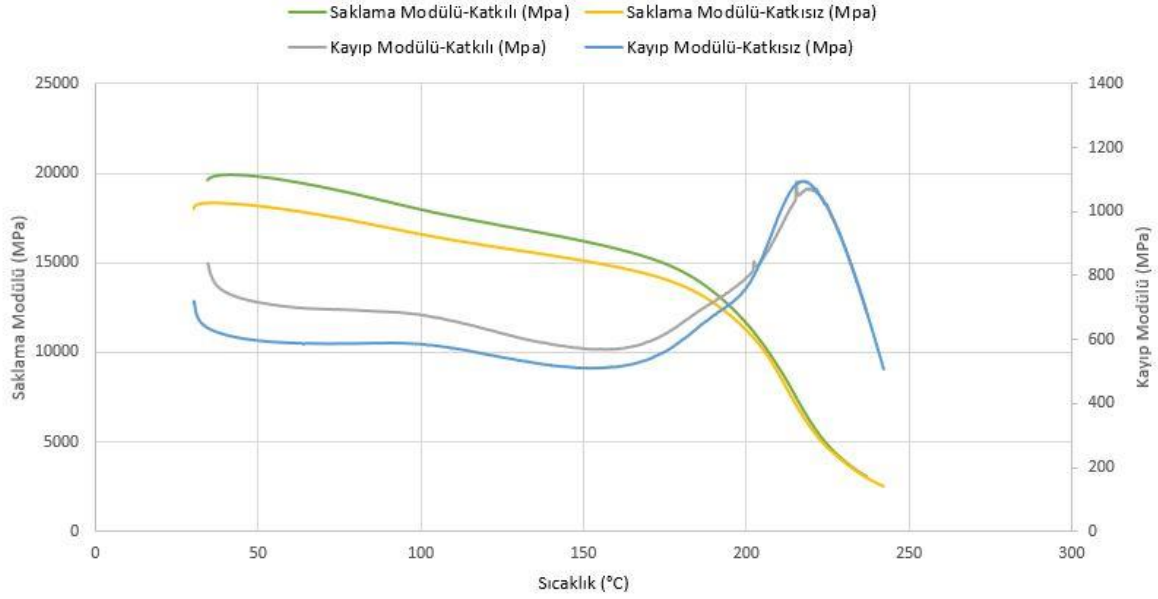
Şekil 1. Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme DMA sonuçları.

Tabakalı bor fiber takviyeli (katkısız) üç farklı numunenin ortak grafiğine bakıldığında camı geçiş sıcaklığı (Tg) başlangıç yaklaşık 202 °C, Tg kayıp başlangıç yaklaşık 216 °C olduğu gözlemlenmiştir. (Şekil 1)



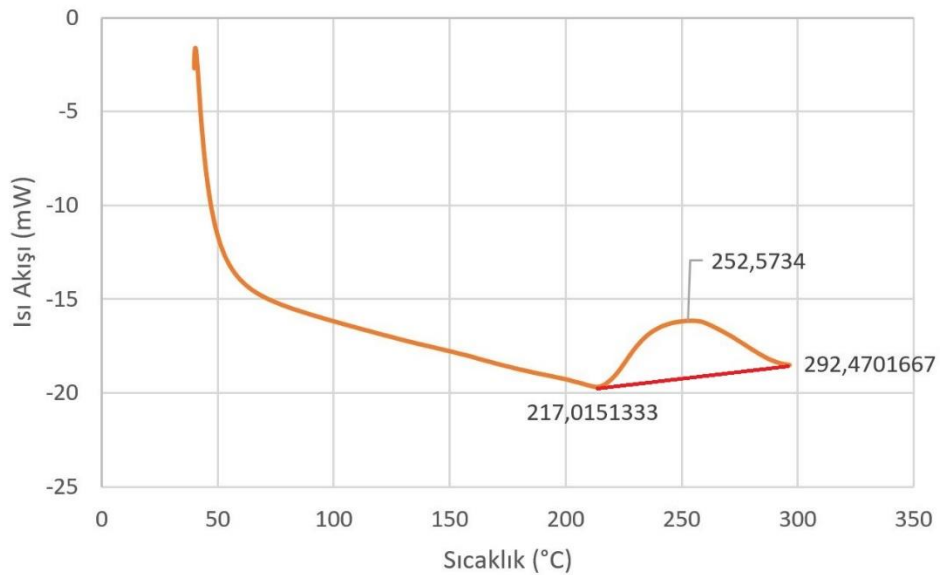
Şekil 2. Nano bor takviyeli Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme DMA sonuçları.

Nano bor katkılı üç farklı numunenin ortalama grafiğine bakıldığında Tg başlangıç yaklaşık 201 °C, Tg kayıp başlangıç yaklaşık 215 °C olduğu gözlemlenmiştir. (Şekil 2)



Şekil 3. Nano bor takviyeli ve katkısız Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme DMA sonuçları.

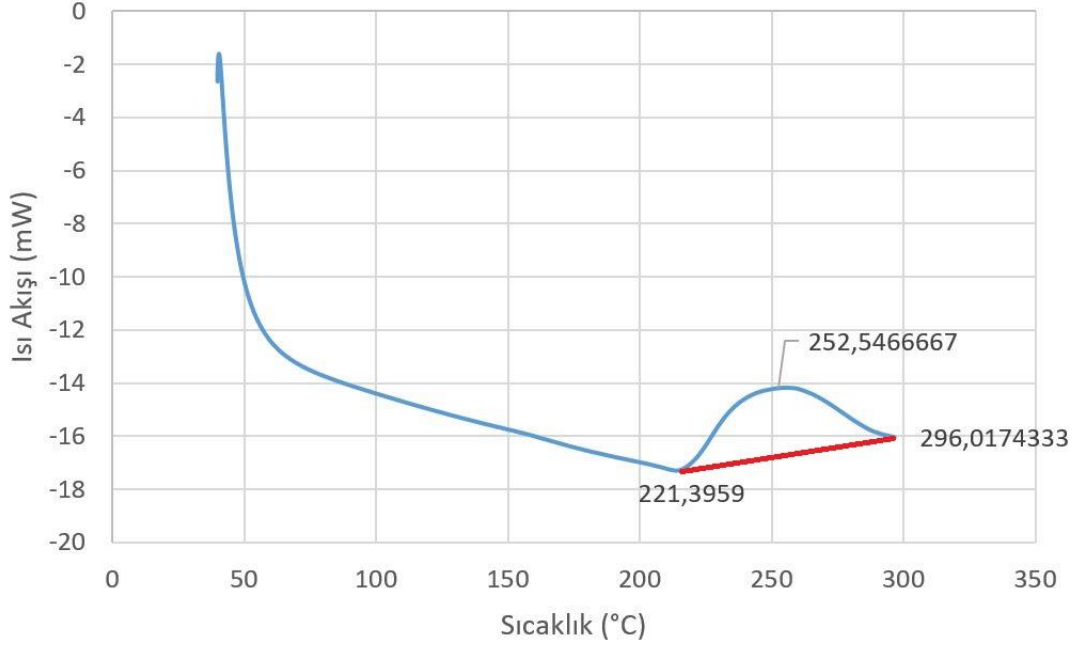
Polimer dışı bir malzemede elastik deformasyon, uygulanan yük ile doğru orantılı ve gecikmesizin olur fakat polimer malzemelerde deformasyon doğrusal değildir ve bu malzemeler viskoelastik davranış gösterirler (Y. El Archi et al. , 2022). Polimer malzemeler camısı geçiş sıcaklığının üstünde plastik davranış gösterirler. Sonuçlarda katkılı ve katkısız tabakalı bor fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerde camısı geçiş sıcaklıkları görülmektedir. Karşılaştırma grafiklerine bakıldığında nano bor katkılı ve katkısız kompozit malzemelerde camısı geçiş sıcaklığı (Tg) başlangıç ve camısı geçiş sıcaklığı (Tg) kayıp başlangıç değerleri arasında 1-2 °C arasında fark olduğu gözlemlenmiştir. (Şekil 3)



Şekil 4. Tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme DSC sonuçları.

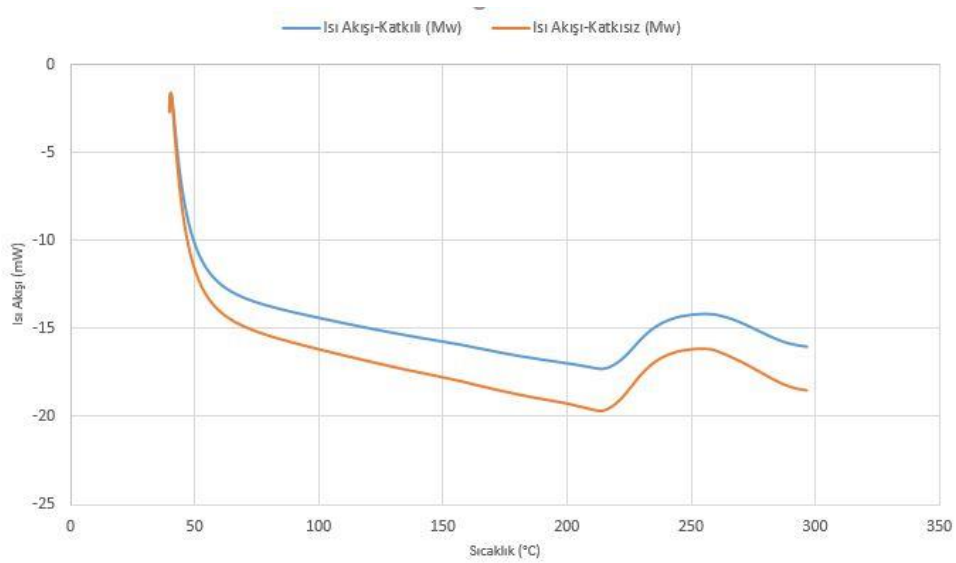
Grafikte camsı geçişi sıcaklığı sonu sıcaklığı (217,015133°C), kompleks zirve sıcaklığı (256,4781333 °C) ve kompleks sonu sıcaklığı (292,4701667 °C) arasındaki bölgenin alanı, öz ısı değerini vermektedir. Camsı geçiş sonu sıcaklığı ile kompleks sonu sıcaklığı çizgisi dikeyde yapmış olduğu açı miktarı ise, kürlenme oranını vermektedir (Joseph D.Menczel et al., 2020).

Tabakalı bor fiber takviyeli (katkısız) üç farklı numunenin ortalama grafiğine bakıldığında, öz ısı değeri alan miktarı olan 9.667 J/g kürlenme oranı, kürlenme eğim derecesi olan %88.82 olarak gözlemlenmiştir. (Şekil 4)



Şekil 5. Nano bor katkılı tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme DSC sonuçları.

Nano bor katkılı tabakalı bor fiber takviyeli üç farklı numunenin ortak grafiğine bakıldığında, öz ısı değeri 9.241 J/g kürlenme değeri ise %89.13 olarak gözlemlenmiştir. (Şekil 5)



Şekil 6. Nano bor katkılı ve katkısız tabakalı bor fiber takviyeli polimer malzeme DSC sonuçları.

Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi veya DSC, bir malzemenin ısı kapasitesinin (Cp) sıcaklığa göre nasıl değiştiğini gösteren termal bir analiz tekniğidir. Bu teknikte bilinen kütlelerin bir örneği ısıtılarak veya soğutulurken ısı kapasitesindeki değişiklikler ısı akışındaki değişiklikler olarak izlenir. Böylece; eriyikler, cam geçişleri, faz değişimleri ve kürlenme gibi geçişlerin algılanmasını sağlar (Joanna Drzezdzon et sl., 2018). Sonuçlarda nano bor katkılı ve katkısız tabakalı bor fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerde Isı akışı-Sıcaklık grafiği bakıldığında öz ısı ve kürlenme oranlarının yakın olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 6).

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, tek yönlü bor fiber takviyeli polimer prepreglerden el yatırma yöntemi ile üretilen prepregler arası reçine olarak RTM6 epoksi ve RTM6 epoksiye partikül nano bor katılarak iki farklı tür tabakalı kompozit malzeme üretilmiş bu farklı malzemeler DMA ve DSC testleri karşılaştırılmıştır. Çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- Tek yönlü bor fiber takviyeli prepreglerden üretilen reçine olarak RTM6 epoksi kullanılan tabakalı kompozit malzemede üç farklı test numunesinde yapılan, DMA ve DSC testleri sonucunda üç test numunesinin matris malzemenin polimer olmasından dolayı viskoelastik davranış sergilediği ve üçü arasında DMA testlerinde camsı geçiş sıcaklığı başlangıç değerlerinin 201.34°C, 203.11°C ve 199.58°C olduğu, DSC testlerinde kompleks zirve değeri 251.33°C, 251.04 °C, ve 250.66°C gözlemlenmiştir. Burada camsı geçiş sıcaklık başlangıç değerleri ve kompleks zirve sıcaklıklarının yakın olması üretimin stabil olduğu ve numunelerin uygun olduğunu ortaya çıkarmıştır.
- Nano bor katkılı kompozit malzemede üç farklı test numunesinde yapılan DMA testleri sonucunda camsı geçiş sıcaklığı başlangıç değeri 200.06°C, 199.31°C ve 202.76°C olduğu DSC Testlerinde kompleks zirve değeri 250.38°C, 254.54 °C, ve 250.07°C gözlemlenmiştir. Burada değerlerin yakın olması numune üretimini doğrulamaktadır.
- Tek yönlü bor fiber takviyeli prepreglerden üretilen reçine olarak RTM6 epoksi kullanılan tabakalı kompozit malzemede ile tek yönlü bor fiber takviyeli prepreglerden üretilen reçine olarak RTM6 epoksiye partikül nano bor katılan tabakalı kompozit malzemeye yapılan DMA ve DSC testleri sonucu karşılaştırıldığında camsı geçiş sıcaklığı başlangıç-kayıp modül, öz ısı, kürlenme sıcaklığı ve kürlenme değerlerinin grafiklere bakıldığında yakın olduğu gözlemlenmiştir.
- Ana matris malzemeye katılan nano bor partiküllerinin epoksi ile arayüz bağlantılarının grafik değerlerinde fark olmamasından dolayı uygun olduğu anlaşılmıştır.
- Sonuç olarak, bu çalışmada epoksi içerisine nano bor ilave edilmesinin malzemelerin termal durumunun ve mekanik değerlerinin olumsuz yönde etkilemediği ve diğer performansların ortaya konulması konusunda yapılacak çalışmalarda kullanıma potansiyelinin olduğu ortaya çıkmıştır.

Referanslar

- Alan Baker, Stuart Dutton, Donald Kelly. Composite Materials for Aircraft Structures (Second Edition), USA, AIAA Education Series,(1987), 55-67.
- Barış Kalaycıoğlu ve M. Hüsni Dirikolu (2009), Diksiz Metal Astarlı ve Kompozit Sargılı Yüksek Basınç Tankı Tasarımı
- Erdem Eryıldız, Ayşegül Akdoğan Eker (2015), Savunma Sanayinde Kullanılan İleri Kompozit Malzemeler ve Uygulama Alanları
- George H. Staab. Laminar Composites ,USA, Butterworth-Heinemann (1999), 1-20.
- Joanna Drzezdzon,Dagmara Jacewicz,Alicja Sielicka&Lech Chmurzynski (2018). Characterization of polymers based on differential scanning calorimetry based techniques.
- Joseph D.Menczel, William S.Kohl. (2020). Differential scanning calorimetry (DSC) in fiber research. Thermal Analysis of Textiles and Fibers,17-69. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100572-9.00003-3>
- Krishan K. Chawla., Composite Materials (Third Edition) ,USA ,Springer, (2011) 7-51.
- Mark E. Tuttle. Structural Analysis of Polymeric Composite Materials (Second Edition), USA, CRC Press, (2013),16-21.
- M. Balasubramanian. Composite Materials and Processing ,USA, CRC Press (2014), 12-30.
- Michael Chun-Yung Niu . Composite Airframe Structures,Hong Kong, Conmilit Press (1992), 41-82.
- Michael Jaffe, Joseph D. Menczel. Thermal Analysis of Textiles and Fibers ,USA, WoodHead Pupliching(WP), (2020), 1-95.
- Mukesh Kumar Singh, Annika Singh. Characterization of Polymers and Fibers, USA, WoodHead Pupliching(WP), (2022),623.

P.K. Mallick. Fiber Reinforced Composites Materials, Manufacturing, and Design (Third Edition), USA, CRC Press,(2007), 51-76.

S. T. Peters, Handbook of Composites (Second Edition), USA ,Chapman@Hall, (1998).

Suong V. Hoa. Principles of the Manufacturing of Composite Materials, Canada, DEStech Publications, (2009),45-97.

Y. El Archi ,N. Lahellec, S. Lejeunes, A. Jouan & B. Tranquart. (2022). Multiscale simulation and experimental analysis of damping in CFRP structures containing rubber.



İş Değerlendirme Sürecinde Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri Üzerine Bir Uygulama

An Application On Multi-Criteria Decision-Making Techniques In The Job Evaluation Process

Ataberk Olcay¹, Muharrem Düğenci², Mümtaz İpek³, Medine Nur Türkoğlu Elitaş^{4*}

¹Karabük Demir Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş., 78170, Karabük, TÜRKİYE

²Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karabük Üniversitesi, 78050, Karabük, TÜRKİYE

³Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, 54187, Sakarya, TÜRKİYE

⁴Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Meslek Yüksekokulu, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, 11230, Bilecik, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 29/06/2022

Kabul / Accepted: 08/10/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

İş değerlendirme; işletmelerdeki performans değerlendirme ve ücret yönetimine girdi oluşturmak amacıyla işlerin maharet, sorumluluk, iş koşulları vb. gibi faktörler çerçevesinde değerlendirilerek biçimsel ve sistematik olarak karşılaştırılmasıdır. Bu çalışmada Demir Çelik Sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin çelik üretim müdürlüğü biriminde bulunan 48 adet mavi yaka işçilik pozisyonları değerlendirilmiştir. Öncelikle AHP yöntemi ile ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmuştur. Bunun sonucunda 48 adet mavi yaka işçilik pozisyonuna ait yakınlık katsayıları hesaplanarak sıralama elde edilmiştir. TOPSIS ve Bulanık TOPSIS sonucu ortaya çıkan işçilik pozisyonlarına ait puanlar, Ünite Amiri, Şef ve ilgili kısımdaki Formenin kararlarına göre puanlanan işçilik pozisyonlarının sıralaması ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın hedefi, o işe uygun çalışanların belirlenmesi ve çalışanların performanslarının değerlendirilerek proseste yapılabilecek olan iyileştirme çalışmalarının belirlenmesidir.

Anahtar Kelimeler

“İş değerlendirme, Bulanık analitik hiyerarşi prosesi, Bulanık TOPSIS yöntemi”

Abstract

Job evaluation is a formal and systematic comparison of works within the framework of factors such as skills, responsibilities, work conditions, etc. in order to provide input to performance evaluation and wage management in enterprises. In this study, 48 blue-collar worker positions in the steel production management unit of an enterprise operating in the Iron and Steel Industry were evaluated. Firstly, binary comparison matrices were created with AHP method. As a result, a ranking was obtained by calculating the proximity coefficients of 48 blue-collar worker positions. The scores of the labor positions resulting from TOPSIS and Fuzzy TOPSIS were compared with the ranking of the labor positions scored according to the decisions of the Unit Supervisor, the Chief and the Foreman in the relevant section. The aim of the study is to determine the employees who are suitable for that job and to determine the improvement works that can be done in the process by evaluating the performance of the employees.

Key Words

“Job evaluation, Fuzzy analytic hierarchy process, Fuzzy TOPSIS method”

1. Giriş

Günümüzde küreselleşme ile birlikte artan rekabet, işletmelerin süreçlerini iyi yönetmesini, yaptığı işleri detaylı bir şekilde analiz ederek verimli çalışmayı sağlamasını zorunlu kılmaktadır. Bu sebeple işletmedeki yöneticiler prosesi iyi tanımlaması, gerçekleştirilen işlerin önem düzeyini ve sırasını belirlemesi, her işe uygun olan personeli yerleştirerek o prosesteki iş gücünü etkin bir şekilde kullanımını gerekli kılmaktadır. Bu sayede verimlilik artarak, süreçlerin iyileşmesi sağlanmış olacaktır.

İş değerlendirme, bir kuruluştaki gerçekleştirilen işlerin birbiri arasındaki değer farklılıklarını tespit etme yöntemidir. Kurum içinde performans yönetim sistemi oluşturulması, iş süreçlerinin yeniden tasarımı, ücret sisteminin oluşturulması, organizasyonlarda yeniden yapılanma (reorganizasyon) vb. birçok insan kaynakları faaliyetlerinin gerçekleştirilmesine kaynak oluşturur. Prosesteki her bir işin, zorluğu ve kriterlerine bağlı olarak değeri de birbirinden farklıdır. İş değerlendirme ile işler arasındaki bu kriterler ele alınarak bir gruplama yapılması amaçlanır (Özdaban, 2012).

İş değerlendirme ile her bir işin değeri tespit edileceğinden, kuruluştaki çalışanlar arasında adil ücret dağılımı oluşturmak daha kolay olacaktır. İşe uygun nitelikteki personeli yerleştirme, kurum içerisinde personeli başka bir işe kaydırma, atama ve terfilerde girdi oluşturma vb. gibi olanaklar sağlayacaktır. Bu da çalışanların şirkete olan bağlılığını ve motivasyonunu yükselterek şirket içerisindeki verimliliği artıracaktır.

İş değerlendirme yapılırken sınıflandırma, puanlama, nokta faktör yöntemi vb. gibi birçok farklı metod kullanılabilir. Çalışma insan kaynağının çok yoğun olduğu bir işletmede gerçekleştirileceğinden bulanık yöntemlerin kullanılması amaçlanmıştır. Bu çalışmada işletmedeki çelik üretim prosesinde 48 adet mavi yaka işçilik pozisyonları için iş değerlendirme gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın konusu belirlenen prosesteki işçilik pozisyonlarının belirlenen yöntemlerle net bir şekilde değerlendirilmesidir. Çalışmanın amacı işletmedeki pozisyonların değerlendirilerek önceliklendirilmesi ve böylelikle işgücü veriminin artırılmasını sağlamaktır. Bu çalışma ile işgücünün optimize edilerek verim düzeyinin artırılması, pozisyonlar arası karmaşıklığın giderilerek üretim düzeyinin optimize edilmesinin sağlanması hedeflenmektedir. Çalışmanın yapılmasındaki ana motivasyon unsuru işçi ve iş pozisyonları çerçevesindeki belirtilen problemler çerçevesinde uygun yöntemler uygulanarak üretim kalitesinin artırılmasıdır.

Çalışmada iş değerlendirme yapılırken kullanılacak olan kriterler, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) tekniklerinden olan Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (BAHP) yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. Daha sonra elde edilen ağırlıklar kullanılarak ÇKKV tekniklerinden biri olan Bulanık TOPSIS yöntemi ile her bir işin katsayısı hesaplanmıştır. Bu çerçevede hesaplanan katsayılara göre prosesteki mevcut işler sıralanmış ve öncelikli işler tespit edilmiştir. Tespit edilen öncelikli işler prosesteki yöneticiler ile paylaşılarak iş süreçlerinde yapılabilecek iyileştirme çalışmalarına yönelik tavsiyeler verilmiştir. Çalışmanın amacı yapılan işlerin kendi aralarındaki göreceli değerlerini tanımlamak ve büyük organizasyonlar için sistematik ve tutarlı bir yaklaşım sağlamaktır.

2. Literatür Araştırması

İş değerlendirmesi ile ilgili yapılan çalışmalara literatürde sıkça rastlanmaktadır. Farklı metodlar kullanılarak gerçekleştirilen iş değerlendirme çalışmaları incelenmiştir.

Bu makalede, bulanık AHP' nin ikili karşılaştırma ölçeği için üçgen bulanık sayıların kullanımı ve ikili karşılaştırmanın sentetik kapsam değeri S_i için kapsam analizi yönteminin kullanımıyla bulanık AHP'yi ele almak için yeni bir yaklaşım tanıtılmaktadır. Bulanık sayıların karşılaştırılması ilkesini uygulayarak, yani $V(M1 \geq M2) = 1$ iff $m1 \geq m2$, $V(M2 \geq M1) = \text{hgt}(M1 \cap M2) = \mu_{M1}(d)$, ağırlık vektörleri belirli bir kriter altında her elemana göre $d(A_i) = \min V(S_i \geq S_k)$, $k = 1, 2, \dots, n$ ile temsil edilir; $k \neq i$. Bu karar süreci bir örnekle gösterilmiştir (D.-Y. Chang, 1996). Chang bir diğer çalışmasında ise kapsam analizi ve sentetik karar, optimizasyon teknikleri ve uygulamalarını ele almış ve analiz etmiştir (D. Y. Chang, 1992). Alkan çalışmasında, mobilya sektöründe yer alan bir şirkette 141 adet mavi yaka işin değerlendirmesini amaçlamıştır. Bu kapsamda Bulanık AHP ile bir iş değerlendirme sistemi tasarlanmıştır. Çalışmanın sonucunda 141 adet iş sıralanmıştır (Alkan, 2012). Küçük yaptığı çalışmada, altın zincir üreten Mioro A.Ş' de seçtiği bir proseste iş analizi gerçekleştirmiştir. Reorganizasyon süreci içerisindeki firmada bütün mavi yaka işler incelenmiştir. Çalışma sonucunda yeni organizasyon şeması ve yeni iş tanımları oluşturulmuştur (Küçük, 2007). Welbourne çalışmasında, ABD' deki bir devlet üniversitesinde Fakülte, araştırma görevlisi ve öğrenci işleri hariç kadro dışı personel pozisyonundaki işleri değerlendirmiştir. Çalışma sonucunda departmanların, şirketteki yeni pozisyonların sayısı ve pozisyon yükseltmeleri ile anlamlı ve pozitif bir şekilde ilişkili olduğu ortaya çıkmıştır (Welbourne & Trevor, 2000). Spyridakos vd. çalışmalarında, mevcut işlerin sıralanması ve önem düzeyine göre belirlenmesi için çok kriterli ayrıştırma-toplama yaklaşımı önermişlerdir. Çalışmalarının sonucunda kurumdaki ücretler, bordro stratejileri, iyileştirme çalışmaları vb. gibi faaliyetlerin gözden geçirilmesine karar vermişlerdir (Spyridakos vd., 2001). Sirbu vd. gerçekleştirmiş oldukları çalışmada iş değerlendirme ve analiz

yöntemlerinin örneklendirilmesi, bunun gerekliliğini ve uygulanabilirliğini yansıtmayı amaçlamışlardır. Çalışma ayrıca analiz yöntemlerinin uygulanması ve iş değerlendirmesinin bir örneğini sunmaktadır. İş istasyonlarının analizini yapmak için, belirli bir pozisyonun yöneticisi tarafından yürütülen bir ankete dayalı görüşme yöntemi kullanılmıştır. Ana sorumlulukları, atıfları ve analiz edilen iş istasyonuna ilişkin bazı açıklamaları tanımlayan "Gözlenen akış şeması etkinliği" adlı bir belge geliştirilmiştir (Sîrbu & Pîntea, 2014). Yu çalışmasında, değerlendirme sistemi tasarımının temel ilkesini tartışmıştır. Uygulamada Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi kullanılmıştır. Temel olarak yönetim ve değerlendirme, dikkatli bir şekilde düşünülmüş ve insanın içeriği, işlevi, öğeleri ve iç mantığı vb. kaynak değerlendirme; bu temelde insan kaynakları yönetimi ve araştırma nesnesi olarak değerlendirme, kuram birleştirmenin yöntemi benimsenmiştir (Yu, 2017). Kahya bildirisinde, personelin eğitim ve deneyimleri ile iş yerindeki gösterdiği performansının gelire ve iş değerlemeye etkisini tespit etmeyi amaçlamıştır. 4 faktör ve 14 alt faktör oluşturularak incelenmiştir. Çalışmada düz işçilik pozisyonları için kademe artışının a ise kalifiyeli işlerde 1,5 a, profesyonel işlerde ise 2,5 a olduğu öngörülmüştür. Performansı düşük bir çalışanın performans değeri % 10 iken, bu çalışan için iş değerlendirme puanının % 50 si kadar düşme, performansı çok iyi olan bir çalışanın performansı % 100 olup, bu çalışan için iş değerlendirme puanının %50 si kadar artma sağlanmalıdır sonucuna varılmıştır (Kahya & Türkoğlu, 2018). Das ve Diaz çalışmalarında nokta faktör analizi gerçekleştirmiştir. AHP ve Bulanık Mantık kullanılarak iş analizi gerçekleştirilmiştir. Kullanılacak olan faktörleri belirlemek için bilgisayar destekli program kurulmuştur (Das & Garcia-Diaz, 2001). Kayhan tarafından yapılan bu çalışmada, BOYTAŞ A.Ş firmasında performans değerlendirme konusu işlenmiştir. Bulanık AHP ile kriterler ağırlıklandırılmış olup performansı değerlendirilecek olan personelin sıralanması ve derecelendirilmesi içinde Bulanık TOPSIS kullanılmıştır. Çalışmada diğer departmanlara örnek teşkil edip referans olması amacıyla ilk önce İnsan Kaynakları departmanı ele alınmıştır (Kayhan, 2010). Göleç ve Kahya çalışmalarında, yetkinlik bazlı çalışan değerlendirme ve seçimi için bulanık bir model kurmuşlardır. Kurulan bulanık modelde organizasyon hedefleri ve stratejileri birbirleri ile tutarlı çıkmıştır. Model Matlab programında çözülmüştür. Çalışma sonucunda gelecekteki çalışmalarda kullanılan bulanık model yerine Choquet integralleri kullanılabileceği tavsiye edilmiştir (Golec & Kahya, 2007). Krishnamoorthi ve Mathew çalışmalarında iş değerlendirmenin önemi anlamak amacıyla iş analitiği yeteneği ve çoklu vaka kullanmışlardır. İş analitiği firmaların iş değerine nasıl katkıda bulunur sorusunun cevabını aramışlardır. Hedefleri ön analizler ve iş analitiği kullanarak iş değerlendirme oluşturmaktır. Bu kapsamda 2 kuruluşu incelemişlerdir. Uygulama sonucunda analitik kaynak modeli oluşturmuşlardır. Bu model ile analitik teknoloji varlıkları ve iş analizi yetenekleri kullanılarak örnek olay incelemesi üzerinde bir iş analizi ortaya çıkarmışlardır (Krishnamoorthi & Mathew, 2018). Gupta ve Chakraborty gerçekleştirmiş oldukları çalışmada, iş değerlendirme için bulanık matematiksel model gerçekleştirmişlerdir. Değerlendirmeye alınan işlerin dereceleri ve faktörleri sayısal olarak hesaplanmıştır. Ana kriter ve alt kriter Doğrusal programlama kullanılarak oluşturulan model çözümlenmiştir. Sonuç olarak önerilen bulanık modelin iş değerlendirmesini geliştirdiği, süreç ve karar verme aşamasında destek sağladığını gözlemlemişlerdir (S. Gupta & Chakraborty, 1998). Kuşakçı çalışmasında, Bulanık-AHP ve TOPSIS metodlarını kullanarak endüstriyel tip fan seçimi problemi için hibrit bir karar destek sistemi önerilmektedir. Önerilen model ile müşterinin taleplerine ve önceliklerine göre kriter ağırlıklarının Bulanık-AHP ile tespiti yapılmaktadır. Elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak TOPSIS yöntemi ile en iyi alternatifler sıralanmakta ve müşteriye sunulmaktadır (Kusakci, 2019). Sevinç ve Eren çalışmalarında, KOBİ'lerin öncelikli sorunlarına göre hangi destek modellerine başvurması gerektiği problemi ele alınmıştır. Konya ilinde 31 adet KOBİ ölçekli otomotiv yan sanayi ile ilgili firmanın ortak sorunları dikkate alınarak, hangi destek modellerine başvurabileceği çok ölçütlü karar verme yöntemleriyle belirlenmiştir. Burada Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile kriterlerin ağırlıkları hesaplanmış, TOPSIS yöntemi ile KOSGEB desteklerinin sıralaması yapılmıştır (Sevinç & Tamer, 2019). Hayat vd. yumuşak setlere dayalı entegre bir Shannon entropisi ve TOPSIS geliştirmiştir. Tasarım konsept değerlendirmesinde müşterilerin kabul edilebilir ve tatmin edici seviye gereksinimleri dikkate alınmıştır (Hayat vd., 2020). Bu makale, entegre bir Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (FAHP) ve İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralaması için Bulanık Tekniği (FTOPSIS) kullanarak tedarikçileri değerlendirmeyi ve seçmeyi amaçlayan iki aşamalı bir model önermektedir. Kriter ağırlıklarını tahmin etmek için FAHP yöntemiyle değerlendirilen hem niceliksel hem de niteliksel olarak çeşitli değerlendirme kriterlerinden oluşan tam gelişmiş bir model, uzman değerlendirmesi yoluyla seçilen potansiyel tedarikçileri sıralamak için FTOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Önerilen model, satın alma sürecinin optimizasyonunda bir destek aracıdır ve optimum tedarikçi ile daha güçlü iş birliği geliştirerek ek tasarruflar gerçekleştirme imkânı sağlamaktadır (Chatterjee & Stević, 2019). Huseyinov ve Tabak çalışmalarında üç kriter ve 12 alt kriter olan kullanılabilirliğine göre üç bilgisayar cebir sistemini değerlendirmiştir. Ağırlıkları bulmak için geometrik ortalama formülü olan üçgen bulanık sayı kullanmışlardır. Çalışmanın temel amacı, kullanıcıların bilgisayar cebir sistemlerini (CAS) değerlendirmelerine yardımcı olmak için bulanık çok kriterli karar verme (FMCDM) modellerine dayalı sistematik bir metodoloji sunmaktır. Değerlendirme prosedürü için iki FMCDM modeli-Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (FAHP) ve İdeal Çözüme Benzerlik ile Sipariş Tercihi için Bulanık Teknik (FTOPSIS) önerilmektedir. FAHP, nitel değerlendirme kriterlerinin görece önem ağırlıklarını belirlemek için uygulanmıştır; FTOPSIS, CAS alternatiflerini sıralamak için uygulanmıştır. Resimli vaka çalışması, önerilen metodolojinin uygulanabilirliğini ve etkililiğini göstermektedir (Huseyinov & Tabak, 2020). Çetinyokuş ve Yertutan çalışmalarında, konusunda uzman kişilere yapılan anketlerden elde edilen verilere dayanarak Türkiye'de seçilen 5 alternatif il, Çok Kriterli Karar Verme Tekniklerinden (ÇKKV); düzeltilmiş AHP, TOPSIS, COPRAS ve ELECTRE uygulamaları ile kıyaslanmıştır (YERTUTAN & ÇETİNYOKUŞ, 2021).

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde ülkemizde sahadaki ve sektörlerdeki problemlerin çözümleri için kullanılan yöntemler sınırlı olarak ele alınmıştır. Bu sebeple çalışmamızın üretim alanında geniş bir alana sahip olan bir firmada belirlenen sorunlar çerçevesinde çok kriterli karar verme yöntemleri ile bunlara çözüm bulunması açısından literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Çalışmanın geçmiş çalışmalardan farkı daha önce bünyesinde benzer bir çalışma yapılmamış olan firmadaki problemlere çözüm aranarak Bulanık AHP ve Bulanık TOPSIS yöntemleri ile maximum düzeyde optimizasyonun sağlanmasıdır. Belirtilen yöntemler ile üretim alanındaki iş verimliliğinin artırılmasına yönelik katkı sağlayacağı hedeflenmiştir.

3. Materyal ve Yöntem

3.1. Çalışmanın Konusu

İş değerlendirme, işlerin resmi ve sistematik olarak karşılaştırılmasıdır. Her bir organizasyona özgü meslekler arasındaki ücret ve maaş hiyerarşisini belirlemektedir. Bu da kurum içerisindeki içsel eşitliği sağlayarak çalışanların bağlılıklarının ve motivasyonlarının artmasına olanak sağlamaktadır (Küçük, 2007). İş değerlendirme uygulamasının amacı yapılan işlerin kendi aralarındaki göreceli değerlerini tanımlamaya ve büyük organizasyonlar için sistematik ve tutarlı bir yaklaşım sağlamaktır (İskefiyeli, 2008).

İş değerlendirme yöntemlerini kalitatif ve kantitatif yöntemler olmak üzere 2 sınıfta incelemek mümkündür. Sayısal yöntemler (faktör karşılaştırma, faktör puan yöntemleri) daha uzun süreli çalışma planlı projelerde ve hacim olarak daha büyük işletmelerde kullanılmaktadır. İşletmeye olan maliyeti de sayısal olmayan yöntemlere göre (sıralama, sınıflandırma vs.) daha fazladır. Ayrıca sayısal yöntemler daha derin sonuçlar verebilirken sayısal olmayan yöntemler yüzeysel sonuçlar vermektedir. İşletmeler iş değerlendirme uygulama yöntemini seçerken bu kriterlere göre karar vermelidir.

3.2. Yöntem

Çalışmada çok kriterli karar verme metodları üzerine çalışılmıştır. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) birden çok disiplinden meydana gelen bir karar verme bilimidir. Karar verecek olan kişi birden çok alternatifin yer aldığı bir durumda en az iki kriter belirleyerek seçim yapar. Bu kriterler sayesinde alternatiflerin olumlu ve olumsuz yönlerini ele alıp yorumlayarak değerlendirme fırsatı bulunur (Erokutan, 2016). ÇKKV yöntemleri çoğunlukla sınıflama, seçim, sıralama konuları kapsamında uygulanmaktadır. Seçim problemlerinde ÇKKV yöntemlerini kullanmak alternatifler arasında karar vermekte zorlanılan durumlarda karar vericiye oldukça yardımcı olur ve en iyi alternatifi seçebilmesine olanak sağlar (Özcan vd., 2019). Çalışmada bu yöntemlerden AHP, TOPSIS, Bulanık AHP ve Bulanık TOPSIS yaklaşımlarından faydalanılmıştır.

3.2.1. AHP

AHP karar verme aşamasında sayısal kriterler haricinde nitel kriterleri de analiz edip kullanır. Bu sayede karmaşık yapıları problemlerde daha hassas ve tutarlı kararlar alınmasına olanak sağlar. AHP uygulama aşamasında alternatifleri değerlendirirken ikili karşılaştırma matrislerini kullanır. Karşılaştırma matrisleri ile alternatif ve kriterler arasında önem sırası oluşturulur ve birbirleri arasındaki ilişki detaylı olarak incelenir. AHP' de üç ana adım vardır: karar hiyerarşisinin oluşturulması, öncelik ağırlıklarının hesaplanması ve tutarlılık doğrulamasıdır (Emrouznejad & Ho, 2017).

AHP yönteminin ilk olarak uygulama çalışmasının hedefi belirlenir. İlk adımda, karar verme problemi, birinci / üst seviyede hedef, ikinci seviyede öznitelik / kriter, sonraki seviyelerde alt kriterler ve son seviyede alternatifler olmak üzere birden fazla hiyerarşik seviyeye bölünmüştür (Mathew vd., 2020). Problem tanımlanıp ana kriterler ve bu kriterlere ilişkin alt kriterler belirlendikten sonra ikili karşılaştırma matrisi oluşturulur (Denizhan vd., 2017). İkili karşılaştırma matrisi oluşturulduktan sonra normalizasyon işlemi yapılır (Özgel, 2016). Son adım olarak tutarlılık oranı hesaplanır ve gerçekleştirilen uygulamanın tutarlılığı tespit edilir (Alkan, 2012). Tüm bu aşamalar gerçekleştirildikten sonra karar vericinin değerlendirilen alternatifler arasından seçim yapması gerekmektedir. Alternatiflerin hesaplanan öncelik değerlerine göre karar verici alternatifler arasında sıralama yapar ve ona göre seçimi yapar (Değermenci, 2016).

3.2.2. TOPSIS

TOPSIS yöntemi en sık kullanılan ÇKKV yöntemlerindedir. Karar verici alternatifler arasından pozitif ideal noktaya en yakın olan alternatifi seçer. TOPSIS yöntemi "m" sayıda alternatif ve "n" sayıda kriteri olan ÇKKV problemlerinde m ile ifade edilen alternatiflerin n sayıdaki boyut üzerinde gösterilmesi şeklinde ifade edilmektedir (Arslan, 2010). TOPSIS yöntemi, alternatiflerin belirlenen kriterler açısından değerlendirilip analiz edilerek sıralanması sonucunda pozitif çözüme en yakın olan alternatifin seçilmesidir (Sümevra & Kazan, 2016). TOPSIS yöntemi uygulanırken kriterlerin ağırlıkları ve değerlerini nicel değişkenler oluşturmaktadır. Fayda kriterini maksimum, maliyet kriterinin ise minimum olmasının amaçlayan çözüm değerleri aynı zamanda TOPSIS yöntemindeki pozitif çözüm noktasına en yakın olan alternatifi ifade etmektedir.

Belirsizlik manipülasyonunda güçlü bir teknik olarak bulanık kümeler, belirsiz ortamlar altında bilgi gösterimi ve nicelemede yaygın olarak uygulanmıştır (Zhu vd., 2020). Temel olarak, bir bulanık küme, her bir elemanın kendi üyelik derecesi $\mu_S(x)$ olan bir grup elemandan oluşur. Geçmiş çalışmalarda, üçgen, yamuk ve Gauss dahil olmak üzere çeşitli üyelik işlevi türleri bulanık mantıkla birleştirilmiştir (Jais vd., 2019; Karimi vd., 2020). Basitleştirme ve kolay hesaplama nedeniyle, üçgen üyelik işlevi, gerçek uygulamalarda bulanık küme gösterimi için yaygın olarak kullanılmaktadır (Nguyen vd., 2019).

TOPSIS Yöntemi aşağıdaki adımları takip etmektedir;

Adım 1: Karar matrisinin oluşturulması; Bu adımda değerlendirmeye esas kriterler ve ağırlık katsayıları belirlenerek hesaplanır ve matris formatında ifade edilir.

Adım 2: Karar Matrisinin normalleştirilmesi; Bu adımda karşılaştırılabilir ölçek elde edilmek üzere, her kritere ait değerler o kriterlerin kareleri toplamının kareköküne bölünerek normalleştirilir.

Adım 3: Normalleştirilmiş Karar Matrisinin Ağırlıklandırılması; Bu adımda normalleştirilmiş karar matrisi belirlenen ağırlıklarla çarpılır.

Adım 4: Pozitif ve negatif ideal çözümlerin oluşturulması; Bu adımda pozitif ve negatif ideal değer setleri belirlenir.

Adım 5: Uzaklık değerlerinin hesaplanması; Pozitif ve negatif ideal seçenekler için ayrı ayrı Euclidean uzaklıkları hesaplanır.

Adım 6: Bu adımda ideal çözüme göre nispi yakınlık hesaplanır.

Adım 7: Hesaplanan yakınlık değerleri bu adımda büyükten küçüğe sıralanır. Yüksek yakınlık, sıralamada öncelik anlamına gelmektedir (Akyüz vd., 2011).

3.2.3. Bulanık mantık

Bulanık mantığın temeli karmaşık, belirsiz ve anlaşılması güç olan problemleri modelleyip çözümleyebilmektir (Sarucan & Baysal, 2018). Bulanık mantık klasik mantığa göre olaylara daha geniş perspektiften bakar. İnsanın fikirlerini de problemin içine dahil ederek nesnel görüşlerini dikkate alır. Bu sayede kesin olmayan durumlarda gerçekleştirilen problemlerde karar vermeyi kolaylaştırır (Kozarević & Puška, 2018).

3.2.3.1. Bulanık AHP

Kompleks problemlerin çözümünde sadece nicel değişkenlerin kullanılması yeterli olmamakla birlikte sorunun analiz edilmesi için gerekli hassasiyeti gösterememektedir. Bu sebeple bu çalışmada belirlenen faktör ve alt faktöre ait değerler üçgensel bulanık sayılara dönüştürülerek Bulanık AHP yöntemi kullanılmıştır. Karşılaştırma yapılırken kullanılacak olan üçgensel bulanık sayılar kullanılmıştır.

İkili karşılaştırma matrisinde i . kriterin j . kritere göre önem düzeyi $\{x_{ij}\}$ şeklinde ifade edilir. Kriterlerin birbirleri arasındaki önem düzeyleri birbirleri ile ilişkilidir. Örneğin; x_{ij} değeri 2 ise x_{ji} değeri 1/2 olarak ifade edilir. İkili karşılaştırma matrisi üzerinden köşegen matrisi olarak ifade edilen bileşenler ise her zaman 1 değerini alır (Sirisawat & Kiatcharoenpol, 2018).

Çalışmada Chang'ın mertebeye analizi yönteminden faydalanılmıştır. Bulanık AHP aşamasında en yaygın olarak kullanılan analiz yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde ilk olarak nesne kümesi ve amaç kümesi olarak adlandırılan iki küme belirlenir. Daha sonra amaç kümesinde yer alan her bir eleman için mertebeye analizi yapılır (Ertuğrul & Karakaşoğlu, 2009). Nesne kümesi $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ve amaç kümesi de $u = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ şeklinde tanımlanır. Bu durumda üçgensel bulanık sayılarla oluşturulmuş ikili karşılaştırma matrisinin ağırlıkları Chang Mertebeye Analizi metodu ile hesaplanır.

3.2.3.2. Bulanık TOPSIS

TOPSIS yönteminde karar verici tarafından alternatiflere öncelik dereceleri verilir. Bulanık sayıların kullanılması karar vericinin işini kolaylaştırma ve öncelik derecelerini belirleme aşamasında oldukça önemlidir (H. Gupta, 2018). Amaç, Bulanık TOPSIS yönteminde fayda kriterlerini maksimum düzeye çıkarıp maliyet kriterlerini minimum seviyede tutarak pozitif ideal çözüme en yakın alternatifin seçilmesidir (Han & Trimi, 2018). Analizlerde kullanılan ölçütlerin skala değerleri aşağıda verilmiştir (Tablo 1)

Tablo 1. Önem Skala Değerleri ve Tanımları

Değer	Tanım	Açıklama
1	Eşit önemli	İki kriterinde aynı önem düzeyinde olması
3	Orta derecede önemli	İlk kriterin ikinci kritere göre az da olsa önemli olması
5	Kuvvetli derecede önemli	İlk kriterin ikinci kritere göre önem düzeyinin çok olması
7	Çok kuvvetli derecede önemli	İlk kriterin ikinci kritere nazaran şiddetli önemli olması
9	Kesin önemli	İlk kriterin ikinci kriter karşısında her anlamda (bütünsel bir şekilde önemli) önem düzeyinin üstün olması
2,4,6,8	Ara değerler	Ara önem düzeyleri

4. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışma entegre bir demir çelik üretim tesisinde uygulanmıştır. Çalışmada Türkiye Metal Sanayicileri Sendikası (MESS) tarafından geliştirip literatüre kazandırılan faktörler ve bu faktörlere ait alt faktörler kullanılmıştır. Türkiye’de metal sanayinde mavi yakalı işlerin değerlendirilmesinde kullanılmak üzere, MESS tarafından 1981 yılında “Metal Sanayii İş Gruplandırma Sistemi” hazırlanmış, 1996 yılında güncelleştirilmiştir. Sistemde, işler, maharet, sorumluluk, çaba ve iş koşulları olmak üzere 4 ana faktör grubunda yer alan 12 faktör aracılığıyla değerlendirilmekte olup, yaklaşık 400 işin iş değerlemesi (tanımı ve derece gerekçeleri ile birlikte) yer almaktadır (Kahya, 2006). Kriterlerin değerlendirilmesinde literatürdeki öne çıkan faktörler ele alınarak aynı zamanda üretim tesisindeki personellerin (yönetim kurulu üyeleri, insan kaynakları ve idari işler sorumlusu, hukukçu, mali işler sorumlusu, teknik hizmet ve yatırım sorumlusu, satış ve pazarlama müdürü departman sorumluları) görüşleri alınmıştır. Aşağıda ana faktörler ve alt faktörler için oluşturulan tablo verilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Ana Faktörler ve Alt Faktörler

Ana Faktörler	Alt Faktörler
Temel yetkinlikler	Eğitim düzeyi ve görev niteliği
	Deneyim
	Beceri
Sorumluluk	İnisiyatif ve çözüm bulma
	Makina ve teçhizat sorumluluğu
	Malzeme, ürün ve hizmet sorumluluğu
Çaba	Üretim sorumluluğu
	İsg sorumluluğu
	Bedensel çaba
Çalışma koşulları	Zihinsel çaba
	İşin doğurabileceği riskler ve tehlikeler
	İş ortamı koşulları

Belirlenen kriterler:

Eğitim Düzeyi ve Görev Niteliği: İşin gerektiği gibi yapılabilmesi için, temel iş bilgisi kapsamında resmi olarak ya da denkliği resmi olarak belirlenmiş bir eğitim düzeyinden mezuniyeti ifade eder. *Deneyim;* İşin yeterli biçimde yapılabilmesi için belirlenmiş temel iş bilgisi için gerekli eğitim düzeyinden sonra işin istenilen kalitede ve verimlilikte gerçekleşmesini, sorumlulukların tam bir şekilde yürütülmesi için aynı işte, benzerinde veya ilgili işlerde toplam çalışma süresini ifade eder. *Beceri;* Eğitim düzeyi ve deneyimden bağımsız olarak işin yeterli düzeyde yapılabilmesi için, kullanılan makina ve teçhizat ile üzerinde çalışılan madde ve mamüllerin kendine has özellikleri ile diğer özelliklerine bağlı olarak işin yapılması sırasında gösterilmesi gerekli olan bedensel ve zihinsel yetenekleri ifade eder. *İnisiyatif ve çözüm bulma:* İşin gerektirdiği; yeni yöntem ve politikaların gereklilik derecesini, belirsizliği, araştırıcılığı, çözüm buluculuğu, etkin karar vermeyi, muhakeme etme, görüş zekası ve mantık kullanılarak bağımsız hareket (inisiyatif kullanma) edebilme yeteneği ile yaratıcılığı ölçer. *Makina ve Teçhizat Sorumluluğu:* Başta işletme, bakım, onarım ve kontrol işleri olmak üzere tüm işlerin yapılmasında üzerinde çalışılan, kullanılan veya kontrol altında bulundurulmuş makine ve teçhizatın hasara uğramaması için gerekli olan sorumluluğu ifade eder. *Malzeme Ürün ve Hizmet Sorumluluğu:* Üzerinde çalışılan hammaddenin israfını, yarı mamul ve üretilen ürünün kaybını veya hasara uğramasını önlemek sorumluluğu ile yapılan hataların sunucunda meydana gelebilecek malzeme, ürün, hizmet, zaman, iş kazası ile ilgili zarar ve kayıpları, işin istenilen kalitede yapılmasına olumsuz etkileri ve bunların önem derecesini ölçer. *Üretim Sorumluluğu:* Üretimle doğrudan ilgili üretim kapasitesinin, işlem veya makinaların standart hız ve tempolarının devam ettirilmesi sorumluluğunu ölçer. *İSG Sorumluluğu:* İşin gereği olarak, işin yapılacağı yerde veya civarında çalışanların veyahut yapılan işin sonucu itibarıyla diğer kimselerin zarar görmesine yol açmamak ve onları korumak için gösterilmesi gerekli dikkat ve özen ile muhtemel kazaların sonuçlarını ölçer. Faktörler belirlendikten sonra bu faktörlerin ağırlıklarını Bulanık AHP ile belirlemeden önce AHP yöntemi ile ikili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması gerekmektedir. İkili karşılaştırma matrisleri oluşturulurken uygulamanın yapıldığı prosesin amirinin görüşü ve fikirleri ele alınmıştır. Şirketin yapısı ve değerleri de göz önünde bulundurularak faktörler arasındaki önem düzeyleri belirlenmiştir. *Bedensel Çaba:* Normal

temodaki bir çalışma ile işin gerektirdiği bedeni gayret ve yetenekleri, fiziksel dayanıklılığı değerlendirir. *Zihinsel Çaba*: İş için gerekli olan dikkat ve işin yapımında gerekli olan zihinsel konsantrasyonu ifade eder. *İşin Doğurabileceği Riskler ve Tehlikeler*: İşe geliş ve gidiş sırasındaki olası tehlikeler ve kazalar dışındaki bütün iş sağlığı ve güvenliği kurallarına dikkatle uyulmasına rağmen işin yapısından kaynaklanan olağan riskleri, tehlikeleri, kazaları ve sağlık sonuçlarını ifade eder. *İş Ortamı Koşulları*: İşin tamamen yapıldığı veya bazı görevler için bulunulması gereken ortamın koşullarını ve bu ortamın çalışanı ne derece rahatsız ettiğini ölçer.

Temel yetkinlikler içerisinde yer alan Eğitim düzeyi ve görev niteliği, Deneyim, Beceri, İnisyatif ve çözüm bulma kriterleri işçilerin değerlendirmesine yönelik kriterlerdir. Bu kriterler işlerin değerlendirilmesinde bulanık sayılarla ikili karşılaştırma matrisleri oluşturularak kullanılmıştır. Bu unsurun ana faktörler içerisinde yer alma sebebi, işgücü verimliliği ve üretim kalitesinin artırılması gibi hedeflerin işçilerin belirlenen temel yetkinliklere de bağlı olmasıdır. Bu faktörlerin analize katılarak daha verimli sonuçlar elde edileceği öngörülmektedir.

4.1. AHP Yöntemi ile İkili Karşılaştırma Matrislerinin Oluşturulması ve Tutarlılıklarının Ölçülmesi

Faktörleri belirledikten sonra bu faktörlerin ağırlıklarını Bulanık AHP ile belirlemeden önce AHP yöntemi ile ikili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması gerekmektedir. İkili karşılaştırma matrisleri oluşturulurken uygulamanın yapıldığı prosenin amirinin görüşü ve fikirleri ele alınmıştır. Şirketin yapısı ve değerleri de göz önünde bulundurularak faktörler arasındaki önem düzeyleri belirlenmiştir.

Tablo 3. Ana Faktörlere Ait İkili Karşılaştırma Matrisi

Ana faktörler	Temel yetkinlikler	Sorumluluk	Çaba	Çalışma koşulları
Temel yetkinlikler	1	3	5	4
Sorumluluk	1/3	1	3	3
Çaba	1/5	1/3	1	1/2
Çalışma koşulları	1/4	1/3	2	1

Ana faktörlere ilişkin oluşturulan karşılaştırma matrisinin Tutarlılık Oranı gerekli formüllere göre hesaplanarak 0,04 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak tutarsızlık oranı 0,1 değerinden küçük olduğu için ana faktörlere ilişkin oluşturulan ikili karşılaştırma matrisinin tutarlı olduğu görülmektedir.

4.2. Bulanık AHP Yöntemiyle Faktörlerin Ağırlıklarının Belirlenmesi

AHP yöntemi ile ana faktörler ve bu ana faktörlere bağlı alt kriterler arasında oluşturulan tüm ikili karşılaştırma matrislerinin tutarlı olduğu görülmektedir. Şimdi bu ikili karşılaştırma matrisleri bulanık sayılarla yeniden oluşturularak ağırlıklandırılacak olup Bulanık TOPSIS aşamasına hazır hale getirilecektir.

4.2.1. İkili karşılaştırma matrisine karşılık gelen üçgensel bulanık sayıların tespiti

Oluşturulan ikili karşılaştırma matrisleri bulanık sayılar ile yeniden oluşturulduktan sonra ağırlıklandırma aşaması gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki tabloda ana faktörler için bulanık sayılarla oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi verilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Ana Faktörler İçin Bulanık Sayılarla Oluşturulan İkili Karşılaştırma Matrisi

Ana faktörler	Temel yetkinlikler	Sorumluluk	Çaba	Çalışma koşulları
Temel yetkinlikler	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)	(4, 5, 6)	(3, 4, 5)
Sorumluluk	(1/4, 1/3, 1/2)	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)	(2, 3, 4)
Çaba	(1/6, 1/5, 1/4)	(1/4, 1/3, 1/2)	(1, 1, 1)	(1/3, 1/2, 1/1)
Çalışma koşulları	(1/5, 1/4, 1/3)	(1/4, 1/3, 1/2)	(1, 2, 3)	(1, 1, 1)

Tablo 5. Temel Yetkinlikler Alt Kriterleri İçin Bulanık Sayılarla Oluşturulan İkili Karşılaştırma Matrisi

Temel yetkinlikler	Eğitim düzeyi ve görev niteliği	Deneyim	Beceri	İnisiyatif ve çözüm bulma
Eğitim düzeyi ve görev niteliği	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(4, 5, 6)
Deneyim	(1/4, 1/3, 1/2)	(1, 1, 1)	(1/3, 1/2, 1/1)	(3, 4, 5)
Beceri	(1/4, 1/3, 1/2)	(1, 2, 3)	(1, 1, 1)	(3, 4, 5)
İnisiyatif ve çözüm bulma	(1/6, 1/5, 1/4)	(1/5, 1/4, 1/3)	(1/5, 1/4, 1/3)	(1, 1, 1)

Tablo 6. Sorumluluk Alt Kriterleri İçin Bulanık Sayılarla Oluşturulan İkili Karşılaştırma Matrisi

Sorumluluk	Makina ve teçhizat	Malzeme, ürün ve hizmet	Üretim	İsg
Makina ve teçhizat	(1, 1, 1)	(3, 4, 5)	(2, 3, 4)	(1/3, 1/2, 1/1)
Malzeme, ürün ve hizmet	(1/5, 1/4, 1/3)	(1, 1, 1)	(1/4, 1/3, 1/2)	(1/5, 1/4, 1/3)
Üretim	(1/4, 1/3, 1/2)	(2, 3, 4)	(1, 1, 1)	(1/4, 1/3, 1/2)
İsg	(1, 2, 3)	(3, 4, 5)	(2, 3, 4)	(1, 1, 1)

Tablo 7. Çaba Alt Kriterleri İçin Bulanık Sayılarla Oluşturulan İkili Karşılaştırma Matrisi

Çaba	Bedensel çaba	Zihinsel çaba
Bedensel çaba	(1, 1, 1)	(4, 5, 6)
Zihinsel çaba	(1/6, 1/5, 1/4)	(1, 1, 1)

Tablo 8. Çalışma Koşulları Alt Kriterleri İçin Bulanık Sayılarla Oluşturulan İkili Karşılaştırma Matrisi

Çalışma koşulları	İşin doğurabileceği riskler ve tehlikeler	İş ortamı koşulları
İşin doğurabileceği riskler ve tehlikeler	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)
İş ortamı koşulları	(1/3, 1/2, 1/1)	(1, 1, 1)

4.2.2. Chang Yöntemi ile faktörlerin ağırlıklandırılması

AHP yöntemi ile ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulduktan sonra sayılar bulanık sayılara dönüştürülerek Chang'ın Mertebe Analizi yöntemi ile faktörler ve kriterler ağırlıklandırılmıştır. İlk olarak üçgensel bulanık sayılar ile ana faktörler için oluşturulmuş olan

karşılaştırma matrisi için Chang metodunun ilk aşamaları satır ve sütun toplama işlemleri yapılmıştır. Sonucunda oluşan tablo aşağıda Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Ana Faktör Matrisi İçin Satır Ve Sütun Toplama İşlemleri

ANA FAKTÖRLER	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Temel Yetkinlikler	10	13	16
Sorumluluk	5,25	7,33	9,5
Çaba	1,75	2,03	2,75
Çalışma Koşulları	2,45	3,58	4,83
Sütun Toplamı	19,45	25,94	33,08
1/Sütun Toplamı	0,05	0,04	0,03

Normalizasyon işlemi yapılarak ana faktörler için oluşturulan ikili karşılaştırma matrisinin ağırlıkları Tablo 10'da verilmiştir. Bölme işlemi $(l, m, u)^{-1} = (1/u, 1/m, 1/l)$ olacaktır.

Tablo 10. Normalizasyon İşlemi Sonrası Ana Faktörler İçin Ağırlıklar

ANA FAKTÖRLER	l	m	u
Temel Yetkinlikler	0,30229	0,50115	0,82262
Sorumluluk	0,1587	0,28257	0,48843
Çaba	0,0529	0,07825	0,14138
Çalışma Koşulları	0,07406	0,13801	0,24832

Ana faktörler için ağırlıklar hesaplandıktan sonra aynı işlemler her bir ana faktörün alt kriterleri içinde hesaplanmıştır. Son olarak ana faktör ağırlıklarının alt faktör ağırlıkları birbirleri ile çarpılarak entegre edilir.

4.2.3. TOPSIS yöntemi ile prosesteki işlerin değerlendirilmesi ve önem sırasının tespit edilmesi

Bulanık TOPSIS ile değerlendirme yapılmadan önce karşılaştırma yapabilmek adına ilk olarak TOPSIS yöntemi uygulanmıştır. İkili karşılaştırma matrisleri kullanılarak AHP yöntemi ile, ana faktörler ve alt kriterler için ağırlıklar tespit edilmiştir. Daha sonra TOPSIS yöntemi işlem adımları ile Karar Matrisi ve Ağırlıklı Karar Matrisi oluşturulmuştur. Bunun sonucunda da 48 adet işçilik pozisyonuna ait yakınlık katsayıları hesaplanarak bir sıralama elde edilmiştir. Bu sıralama aşağıda verilmiştir (Tablo 11).

Tablo 11. TOPSIS Sonucu İşçilik Pozisyonlarının Yakınlık Katsayıları

İş No.	Bağlı Bulunduğu Baş Mühendislik	İşçilik Pozisyonu	Sİ ⁺	Sİ ⁻	Yakınlık Katsayısı (C)
1	Konverter İşletme	Konverter Kumanda Operatörü Odası	0,00674	0,0597	0,89862
2	Konverter İşletme	Şarj Vinç Operatörü	0,00976	0,0595	0,85895
3	Mekanik Bakım	Mekanik Bakım İşçisi -I	0,01436	0,0531	0,78725
4	Elektrik ve Otomasyon Bakım	Elektrik Bakım İşçisi -I	0,01471	0,0525	0,78094
5	Elektrik ve Otomasyon Bakım	Otomasyon Bakım İşçisi -I	0,01471	0,0525	0,78094
6	Kireç Fabrikası	Kireç Kumanda Odası Operatörü -I	0,02041	0,0480	0,70174
7	Konverter İşletme	Konverter İşçisi -I	0,024	0,0490	0,67124
8	Konverter İşletme	Kompresör ve Pompa Operatörü	0,02424	0,0485	0,66658
9	Malzeme Temin ve Hurda Hazırlama	Hurda Hazırlama Vinç Operatörü	0,02552	0,0496	0,66016
10	Kükürt Giderme	Kükürt Giderme İşçisi -I	0,02572	0,0463	0,64283
11	Kireç Fabrikası	Kireç Kumanda Odası Operatörü -II	0,02723	0,0458	0,62689
12	Konverter İşletme	Lans İşçiliği -I	0,02688	0,0445	0,6235
13	Malzeme Temin ve Hurda Hazırlama	Hurda Eksperi	0,02532	0,0404	0,615
14	Konverter İşletme	Curuf Çekme Operatörü -I	0,02696	0,0406	0,60097
15	Kükürt Giderme	Torpedo Boşaltma İşçisi -I	0,02746	0,0397	0,59119
16	Elektrik ve Otomasyon Bakım	Otomasyon Bakım İşçisi -II	0,02998	0,0428	0,58804
17	Elektrik ve Otomasyon Bakım	Elektrik Bakım İşçisi -II	0,02998	0,0428	0,58804
18	Mekanik Bakım	Mekanik Bakım İşçisi -II	0,02998	0,0428	0,58804
19	Konverter İşletme	Malzeme Nakil Operatörü	0,02775	0,0393	0,58585
20	Kireç Fabrikası	Kömür Hazırlama İşçisi -I	0,03255	0,0417	0,56161
21	Elektrik ve Otomasyon Bakım	Elektrik Bakım İşçisi -III	0,03752	0,0390	0,50969
22	Mekanik Bakım	Mekanik Bakım İşçisi -III	0,03752	0,0390	0,50969
23	Elektrik ve Otomasyon Bakım	Otomasyon Bakım İşçisi -III	0,03752	0,0390	0,50969
24	Kireç Fabrikası	Kireç Fabrikası İşçisi -I	0,03308	0,0336	0,50407
25	Kireç Fabrikası	Mikronize Kireç İşçisi -I	0,03308	0,0336	0,50407
26	Konverter İşletme	Konverter İşçisi -II	0,03346	0,0330	0,49643
27	Malzeme Temin ve Hurda Hazırlama	Hurda Pres ve Balya Makinası Operatörü	0,03388	0,0331	0,49414
28	Kükürt Giderme	Torpedo Boşaltma İşçisi -II	0,03358	0,0327	0,49338
29	Konverter İşletme	Lans İşçiliği -II	0,03459	0,0319	0,47984

İş No.	Bağlı Bulunduğu Baş Mühendislik	İşçilik Pozisyonu	Sİ ⁺	Sİ ⁻	Yakınlık Katsayısı (C)
31	Konverter İşletme	Curuf Çekme Operatörü -II	0,03928	0,0261	0,39885
32	Kükürt Giderme	Kükürt Giderme İşçisi -II	0,04256	0,0211	0,33118
33	Kireç Fabrikası	Kireç Fabrikası İşçisi -II	0,04522	0,0203	0,30953
34	Kireç Fabrikası	Mikronize Kireç İşçisi -II	0,04522	0,0203	0,30953
35	Malzeme Temin ve Hurda Hazırlama	Hurda Kesicisi	0,04484	0,0178	0,28381
36	Malzeme Temin ve Hurda Hazırlama	Hurda Manipulasyon İşçisi	0,04455	0,0172	0,27899
37	Elektrik ve Otomasyon Bakım	Malzemeci (Bakım)	0,05291	0,0169	0,24208
38	Elektrik ve Otomasyon Bakım	Malzemeci (Bakım)	0,05291	0,0169	0,24208
39	Mekanik Bakım	Malzemeci (Bakım)	0,05291	0,0169	0,24208
40	Malzeme Temin ve Hurda Hazırlama	Malzemeci (İşletme)	0,05291	0,0169	0,24208
41	Konverter İşletme	Saha İşçisi -I	0,05298	0,0147	0,2168
42	Malzeme Temin ve Hurda Hazırlama	Saha İşçisi -I	0,05298	0,0147	0,2168
43	Kükürt Giderme	Kükürt Giderme İşçisi -III	0,0539	0,0139	0,20544
44	Kireç Fabrikası	Kömür Hazırlama İşçisi -II	0,05435	0,0138	0,20307
45	Kireç Fabrikası	Kömür Hazırlama İşçisi -III	0,05602	0,0127	0,18464
46	Konverter İşletme	Saha İşçisi -II	0,05602	0,0127	0,18464
47	Malzeme Temin ve Hurda Hazırlama	Saha İşçisi -II	0,05602	0,0127	0,18464
48	Konverter İşletme	Temizlik İşçisi	0,06239	0,0032	0,04888

TOPSIS yöntemi ile belirlenen işçilik pozisyonlarına ait sıralamalar yukarıdaki gibi elde edilmiştir. Yöneticiler bu sıralamayı işletmeleri için kullanabilirler. Böylelikle işletmelerindeki belirledikleri pozisyonlardaki sıra karmaşasının önüne geçilmiş olur. İşler doğru zamanda ve sırada ilerleyerek daha net pozisyonlar elde edilmiş olur. Bu da iş akışını doğrudan etkileyerek etkin zaman kullanımı sağlar ve üretimde istenen kalite maksimum seviyede sağlanmış olur.

4.2.4. Bulanık TOPSIS yöntemi ile prosesteki işlerin değerlendirilmesi ve önem sırasının tespit edilmesi

Bulanık AHP ve işçilik pozisyonlarının puanlamaları ile bulanık karar matrisi oluşturulduktan sonra çalışmanın devamında Bulanık TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Bulanık TOPSIS yöntemi ile her bir işçilik pozisyonunun önem derecesi bulunarak proseste gerçekleştirilen öncelikli işler tespit edilmiştir.

Bu sayede proseste gerçekleştirilen mavi yaka işlerin önem düzeyleri tespit edilmiş olup işletme için öncelik arz eden işler bulunmuştur. Bulunan tüm mavi yaka işçilik pozisyonlarının değerleri aşağıda verilmiştir (Tablo 12).

Tablo 12. Bulanık TOPSIS Sonucu İşçilik Pozisyonlarının Yakınlık Katsayıları

İş No.	Bağlı Başmühendislik	İşçilik Pozisyonu	D ⁺	D ⁻	Yakınlık Katsayısı (C)
1	Konverter İşletme	Konverter Kumanda Operatörü Odası	0,0562	1,2540	0,9571
2	Konverter İşletme	Şarj Vinç Operatörü	0,0656	1,2445	0,9499

3	Mekanik Bakım	Mekanik Bakım İşçisi -I	0,1535	1,1569	0,8828
4	Elektrik ve Otomasyon Bakım	Elektrik Bakım İşçisi -I	0,1698	1,1407	0,8705
5	Elektrik ve Otomasyon Bakım	Otomasyon Bakım İşçisi -I	0,1698	1,1407	0,8705
6	Konverter İşletme	Konverter İşçisi -I	0,2452	1,0650	0,8129
7	Kireç Fabrikası	Kireç Kumanda Odası Operatörü -I	0,3017	1,0091	0,7698
8	Konverter İşletme	Kompresör ve Pompa Operatörü	0,3031	1,0073	0,7687
9	Kükürt Giderme	Kükürt Giderme İşçisi -I	0,3243	0,9864	0,7526
10	Konverter İşletme	Curuf Çekme Operatörü -I	0,3348	0,9754	0,7445
11	Kireç Fabrikası	Kireç Kumanda Odası Operatörü -II	0,3755	0,9352	0,7135
12	Malzeme Temin ve Hurda Hazırlama	Hurda Eksperi	0,3862	0,9242	0,7053
13	Kükürt Giderme	Torpedo Boşaltma İşçisi -I	0,3932	0,9173	0,7000
14	Malzeme Temin ve Hurda Hazırlama	Hurda Hazırlama Vinç Operatörü	0,3937	0,9167	0,6996
15	Konverter İşletme	Malzeme Nakil Operatörü	0,4175	0,8929	0,6814
16	Konverter İşletme	Lans İşçiliği -I	0,4320	0,8784	0,6703
17	Kireç Fabrikası	Kireç Fabrikası İşçisi -I	0,5317	0,7789	0,5943
18	Kireç Fabrikası	Mikronize Kireç İşçisi -I	0,5317	0,7789	0,5943
19	Elektrik ve Otomasyon Bakım	Elektrik Bakım İşçisi -II	0,5389	0,7714	0,5887
20	Mekanik Bakım	Mekanik Bakım İşçisi -II	0,5389	0,7714	0,5887
21	Elektrik ve Otomasyon Bakım	Otomasyon Bakım İşçisi -II	0,5389	0,7714	0,5887
22	Konverter İşletme	Konverter İşçisi -II	0,5478	0,7628	0,5820
23	Kükürt Giderme	Torpedo Boşaltma İşçisi -II	0,5628	0,7478	0,5706
24	Malzeme Temin ve Hurda Hazırlama	Hurda Pres ve Balya Makinası Operatörü	0,5877	0,7228	0,5515
25	Konverter İşletme	Lans İşçiliği -II	0,6051	0,7053	0,5383
26	Konverter İşletme	Curuf Çekme Operatörü -II	0,6141	0,6966	0,5315
27	Kireç Fabrikası	Kömür Hazırlama İşçisi -I	0,6336	0,6767	0,5164
28	Elektrik ve Otomasyon Bakım	Elektrik Bakım İşçisi -III	0,7107	0,5995	0,4576
29	Mekanik Bakım	Mekanik Bakım İşçisi -III	0,7107	0,5995	0,4576
30	Elektrik ve Otomasyon Bakım	Otomasyon Bakım İşçisi -III	0,7107	0,5995	0,4576
31	Kükürt Giderme	Kükürt Giderme İşçisi -II	0,8035	0,5068	0,3868
32	Konverter İşletme	Konverter İşçisi -III	0,8235	0,4867	0,3715
33	Kireç Fabrikası	Kireç Fabrikası İşçisi -II	0,8408	0,4696	0,3584
34	Kireç Fabrikası	Mikronize Kireç İşçisi -II	0,8408	0,4696	0,3584

35	Malzeme Temin ve Hurda Hazırlama	Hurda Kesicisi	0,8871	0,4232	0,3230
36	Malzeme Temin ve Hurda Hazırlama	Hurda Maniplasyon İşçisi	0,8901	0,4202	0,3207
37	Konverter İşletme	Saha İşçisi -I	1,0842	0,2259	0,1724
38	Malzeme Temin ve Hurda Hazırlama	Saha İşçisi -I	1,0842	0,2259	0,1724
39	Kireç Fabrikası	Kömür Hazırlama İşçisi -II	1,1080	0,2021	0,1543
40	Elektrik ve Otomasyon Bakım	Malzemeci (Bakım)	1,1346	0,1754	0,1339
41	Elektrik ve Otomasyon Bakım	Malzemeci (Bakım)	1,1346	0,1754	0,1339
42	Mekanik Bakım	Malzemeci (Bakım)	1,1346	0,1754	0,1339
43	Malzeme Temin ve Hurda Hazırlama	Malzemeci (İşletme)	1,1346	0,1754	0,1339
44	Kükürt Giderme	Kükürt Giderme İşçisi -III	1,1633	0,1468	0,1120
45	Kireç Fabrikası	Kömür Hazırlama İşçisi -III	1,2005	0,1095	0,0836
46	Konverter İşletme	Saha İşçisi -II	1,2005	0,1095	0,0836
47	Malzeme Temin ve Hurda Hazırlama	Saha İşçisi -II	1,2005	0,1095	0,0836
48	Konverter İşletme	Temizlik İşçisi	1,2898	0,0202	0,0154

Çalışmada uygulanan analizler sonucunda oluşan Bulanık TOPSIS verilerine göre proste en yüksek puana sahip olan ilk 5 işçilik pozisyonu sırasıyla; Konverter Kumanda Odası Operatörü, Şarj Vinç Operatörü, Mekanik Bakım İşçisi-I, Elektrik Bakım İşçisi-I, Otomasyon Bakım İşçisi-I olarak bulunmuştur. Son sıralarda yer alan işçilik pozisyonları ise sırasıyla; Temizlik İşçisi, farklı Baş mühendisliklere bağlı olan Saha İşçisi-II pozisyonu, Kömür Hazırlama İşçisi-III ve Kükürt Giderme İşçisi-III olarak tespit edilmiştir. Belirlenen puanlamalara göre en üst sıralardaki işler ve en alt sıralarda yer alan işçilik pozisyonları incelendiğinde; yüksek puanlı işlerin, düşük puandaki işlere nazaran daha fazla deneyim, bilgi, eğitim, bedensel ve zihinsel çaba gerektiren işler olduğu ve daha zor çalışma şartlarına sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bu doğrultuda bu işlerin proses için önemi çok daha büyüktür.

Bulanık TOPSIS yöntemi ile bulunan ilk 15 sıradaki işçilik pozisyonları ile Ünite Amiri, Şef ve ilgili kısımdaki Formenin görüş ve kararı doğrultusunda puanlanan işçilik pozisyonları karşılaştırıldığı zaman, Bulanık TOPSIS yönteminde; Kireç Kumanda Odası Operatörü-II işçiliğinin 12. sıradan 11. sıraya yükseldiği gözlemlenmiştir. Hurda Hazırlama Vinç Operatörü işçiliğinin de iki basamak yükselerek puan olarak 14. sıraya yükseldiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte Malzeme Nakil Operatörü işçiliğinin iki basamak gerileyerek 15. sırada yer aldığı ve Hurda Eksperi İşçiliğinin ise bir basamak gerileyerek 12. sırada yer aldığı gözlemlenmektedir. Bulanık TOPSIS yöntemi ile bulunan işçilik pozisyonları ile; TOPSIS yöntemi sonucu oluşan işçilik pozisyonları karşılaştırıldığı zaman ise, Bulanık TOPSIS yönteminde; Konverter İşçisi-I, Kükürt Giderme İşçisi-I ve Hurda Eksperi İşçiliklerinin bir basamak yükselerek sırasıyla; 6., 9. ve 12. sırada yer aldıkları görülmüştür. Cüruf Çekme Operatörü-I işçiliğinin 14. sıradan 10. sıraya, Hurda Eksperi İşçiliğinin ise 13. sıradan 12. sıraya yükseldiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte Lans İşçiliği-I işinin 12. sıradan 16. sıraya, Hurda Hazırlama Vinç Operatörü işçiliğinin ise 9. sıradan 14. Sıraya düştüğü tespit edilmiştir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada ilk olarak, iş değerlendirmede kullanılacak olan ana faktörler ve alt kriterler için Analitik Hiyerarşi Prosesi ile ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmuştur. AHP yöntemi ile, ana faktörler ve alt kriterler için ağırlıklar tespit edilmiştir. Bu ağırlıklar kullanılarak, TOPSIS yöntemi ile Karar Matrisi ve Ağırlıklı Karar Matrisi oluşturulmuştur. Bunun sonucunda da 48 adet işçilik pozisyonuna ait yakınlık katsayıları hesaplanarak sıralama elde edilmiştir. Daha sonra bu karşılaştırma matrisleri üçgensel bulanık sayılar ile yeniden oluşturularak, Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesinde en çok kullanılan tekniklerden olan Chang mertebeli analizi ile ana faktörlerin ve tüm alt kriterlerin ağırlıkları tespit edilmiştir. Her bir kriter için bulunan ağırlıklar Bulanık TOPSIS matrisine yerleştirilerek, proste gerçekleştirilen 48 mavi yaka işçilik pozisyonlarının yakınlık katsayıları ve buna bağlı olarak da önem derecesi bulunmuştur. Çalışmanın çözümünde; pozitif ideal ve negatif ideal noktalara olan uzaklıkların tespit edilmesinde Vertex tekniği kullanılmıştır ve ilgili hesaplamalar Excel programı ile gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada hedef, sahada iş değerlendirme teknikleri uygulanarak değerlendirme sonucu ortaya çıkan işlerin önem düzeyleri ve sıralaması doğrultusunda, o işe uygun çalışanların belirlenmesidir. Ayrıca çalışanların performanslarının değerlendirilerek, proste yapılabilecek olan iyileştirme çalışmalarının şirkete tavsiye olarak verilmesi de çalışmayı özgün ve önemli kılan noktalardan bir

tanesidir. Böylelikle çalışma sonucunda üretim sahasındaki belirlenen aksaklıklar giderilerek daha verimli bir çalışma ortamı sağlanmıştır. Ayrıca çalışma, işçiler ve sorumlu oldukları iş arasındaki çalışma uyumu artırılarak üretimde verimliliğin sağlanması gibi önemli getiriler sağlamaktadır. Bu bakımdan yapılan çalışma özgün ve uygulama alanı açısından verimli bir çalışma niteliğindedir.

Çalışmada bulanık yöntemlerin kullanılması objektifliği artırarak daha hassas sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Bulanık AHP yönteminin Bulanık TOPSIS yöntemi ile entegre edilerek uygulanması iş değerlendirme sistematikliğini daha anlamlı kılmıştır.

Yapılan araştırmalar sonucu demir çelik sektöründe bu tür analiz çalışmalarının literatürde yeterli derecede yapılmadığı tespit edilmiştir. Demir çelik gibi çalışma koşullarının ağır olduğu bir üretim sahasında işçiler ve işlerin değerlendirilmesi noktasında yapılan çalışma ve uygulanan analizler önemli bir paya sahiptir. Bu bakımdan makale, literatüre önemli katkılar sağlayacak bir çalışma niteliğindedir.

Yapılan çalışmanın genel yararı belirtilen noktalarda literatüre katkı sağlaması ve işletmelerdeki hedeflenen üretim seviyesi ve kalitesinin sağlanmasına katkı sağlamasıdır. İşletmeye sağlayacağı faydalar ise işçi performansının artırılması, buna bağlı olarak ürün kalitesinin artırılması, üretim hızının iyileştirilmesi, optimal performans ölçümünün yapılarak işletme içi genel verimlilik düzeyinin artırılmasıdır.

Bundan sonraki çalışmalarda; önem derecesi tespit edilen işler çerçevesinde şirket bünyesinde yeni bir ücret sistematikliğini geliştirilebilir. Bulunan mavi yaka işçilik pozisyonlarının dereceleri; işe uygun personel verilmesi, iş süreçlerinin iyileştirilmesi şirket içerisinde personel rotasyonu, performans değerlendirme ve kariyer planlama vb. gibi şirket içerisinde yapılacak olan faaliyetlerde girdi olarak kullanılabilir.

Referanslar

Akyüz, Y., Bozdoğan, T., & Hantekin, E. (2011). TOPSİS Yöntemiyle Finansal Performansın Değerlendirilmesi ve Bir Uygulama. Afyon Kocatepe Üniversitesi, İ.İ.B.F. Dergisi, Cilt XIII, Sayı I, s. 74-92.

Alkan, A. (2012). İş Değerlendirme Sürecinde Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi ile Bütünleşik Bulanık Topsis Uygulaması. *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri*.

Arslan, M. (2010). *Bulanık TOPSİS metodu ile Türk Şeker Fabrikaları'nın performansının değerlendirilmesi* [PhD Thesis]. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Chang, D. Y. (1992). *Extent analysis and synthetic decision, optimization techniques and applications (Vol. 1, p. 352)*. Singapore: World Scientific.

Chang, D.-Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European journal of operational research*, 95(3), 649-655.

Chatterjee, P., & Stević, Ž. (2019). A two-phase fuzzy AHP-fuzzy TOPSIS model for supplier evaluation in manufacturing environment. *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*, 2(1), 72-90.

Das, B., & Garcia-Diaz, A. (2001). Factor selection guidelines for job evaluation: A computerized statistical procedure. *Computers & Industrial Engineering*, 40(3), 259-272.

Değermenci, A. (2016). *Bulanık ortamda çok kriterli karar verme teknikleri ile personel seçimi: Katılım bankacılığı sektöründe bir uygulama* [Master's Thesis]. İstanbul Ticaret Üniversitesi.

Denizhan, B., Yalçın, A. Y., & BERBER, Ş. (2017). Analitik hiyerarşi proses ve bulanık analitik hiyerarşi proses yöntemleri kullanılarak yeşil tedarikçi seçimi uygulaması. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(1), 63-78.

Emrouznejad, A., & Ho, W. (2017). Analytic hierarchy process and fuzzy set theory. *İçinde Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (ss. 23-32). Chapman and Hall/CRC.

Erokutan, B. (2016). *Mavi yakalı personel seçiminde çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanılması ve bir uygulama* [Master's Thesis]. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.

Ertuğrul, İ., & Karakaşoğlu, N. (2009). Performance evaluation of Turkish cement firms with fuzzy analytic hierarchy process and TOPSIS methods. *Expert Systems with Applications*, 36(1), 702-715.

- Golec, A., & Kahya, E. (2007). A fuzzy model for competency-based employee evaluation and selection. *Computers & Industrial Engineering*, 52(1), 143-161.
- Gupta, H. (2018). Assessing organizations performance on the basis of GHRM practices using BWM and Fuzzy TOPSIS. *Journal of environmental management*, 226, 201-216.
- Gupta, S., & Chakraborty, M. (1998). Job evaluation in fuzzy environment. *Fuzzy sets and systems*, 100(1-3), 71-76.
- Han, H., & Trimi, S. (2018). A fuzzy TOPSIS method for performance evaluation of reverse logistics in social commerce platforms. *Expert Systems with Applications*, 103, 133-145.
- Hayat, K., Ali, M. I., Karaaslan, F., Cao, B.-Y., & Shah, M. H. (2020). Design concept evaluation using soft sets based on acceptable and satisfactory levels: An integrated TOPSIS and Shannon entropy. *Soft Computing*, 24(3), 2229-2263.
- Huseyinov, I., & Tabak, F. S. (2020). The evaluation of computer algebra systems using fuzzy multi-criteria decision-making models: Fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS. *International Journal of Software Innovation (IJSI)*, 8(1), 1-16.
- İskefiyeli, Ö. (2008). *İş değerlendirme ve ücret sistemleri ilişkisi üzerine yeni bir model* [Master's Thesis]. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Jais, M. I., Sabapathy, T., Jusoh, M., Ahmad, R. B., Jamaluddin, M. H., Kamarudin, M. R., Ehkan, P., Loganathan, L. M., & Soh, P. J. (2019). A fuzzy-based Angle-of-Arrival estimation system (AES) using radiation pattern reconfigurable (RPR) antenna and modified Gaussian membership function. *IEEE Access*, 7, 145477-145488.
- Kahya, E. (2006). Metal iş kolunda bir işletme için iş değerlendirme sisteminin geliştirilmesi. *Endüstri Mühendisliği*, 17(4), 2-21.
- Kahya, E., & Türkoğlu, M. (2018). Personel değerlendirme sistemi için karar destek sistemi tasarımı. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 23(3), 937-960.
- Karimi, H., Sadeghi-Dastaki, M., & Javan, M. (2020). A fully fuzzy best-worst multi attribute decision making method with triangular fuzzy number: A case study of maintenance assessment in the hospitals. *Applied Soft Computing*, 86, 105882.
- Kayhan, G. (2010). İnsan kaynakları performans değerlendirilmesinde bulanık AHP/bulanık TOPSIS ile hibrit bir yapının oluşturulması ve bir uygulama, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri*.
- Kozarević, S., & Puška, A. (2018). Use of fuzzy logic for measuring practices and performances of supply chain. *Operations Research Perspectives*, 5, 150-160.
- Krishnamoorthi, S., & Mathew, S. K. (2018). Business analytics and business value: A comparative case study. *Information & Management*, 55(5), 643-666.
- Kusakci, A. O. (2019). Ürün seçimi için hibritlenmiş Fuzzy-AHP ve TOPSIS yöntemine dayalı bir karar destek sistemi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(1), 99-108.
- Küçük, M. (2007). *Effects of job evaluation analysis on Company's productivity and a case study in manufacturing industry*.
- Mathew, M., Chakraborty, R. K., & Ryan, M. J. (2020). A novel approach integrating AHP and TOPSIS under spherical fuzzy sets for advanced manufacturing system selection. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 96, 103988.
- Nguyen, A.-T., Taniguchi, T., Eciolaza, L., Campos, V., Palhares, R., & Sugeno, M. (2019). Fuzzy control systems: Past, present and future. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 14(1), 56-68.
- Özcan, S. G., Yıldızbaşı, A., & Eraslan, E. (2019). İnşaat firmalarının İSG bağlamında bulanık grup karar verme yaklaşımı ile değerlendirilmesi. *Endüstri Mühendisliği*, 30(3), 204-219.
- Özdaban, İ. (2012). *İş Değerlendirme ve Personel Değerlendirme Üzerine Bir Bulanık Karar Modeli* [PhD Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Öznel, A. (2016). Çok kriterli karar verme yöntemi seçiminde yeni bir yaklaşım. *Yayımlanmamış Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstatistik Anabilim Dalı. Ankara.*
- Sarucan, A., & Baysal, M. E. (2018). Türkiye için çok kriterli karar verme yöntemleri ile yenilenebilir enerji alternatiflerinin analizi analysis of renewable energy alternatives with the multi-criteria decision making methods for turkey Prof. Dr. Orhan Engin. *Journal of Social And Humanities Sciences Research (JSHSR)*, 5(23), 1223-1231.
- Sevinç, A., & Tamer, E. (2019). KOBİ'LER İÇİN KOSGEB Destek Modellerinin Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri İle Sıralanması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(1), 409-425.
- Sîrbu, J., & Pintea, F. R. (2014). Analysis and evaluation of jobs–important elements in work organization. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 124, 59-68.
- Sirisawat, P., & Kiatcharoenpol, T. (2018). Fuzzy AHP-TOPSIS approaches to prioritizing solutions for reverse logistics barriers. *Computers & Industrial Engineering*, 117, 303-318.
- Spyridakos, A., Siskos, Y., Yannacopoulos, D., & Skouris, A. (2001). Multicriteria job evaluation for large organizations. *European Journal of Operational Research*, 130(2), 375-387.
- Sümevra, U., & Kazan, H. (2016). Çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP TOPSIS ve PROMETHEE karşılaştırılması: Gemi inşada ana makine seçimi uygulaması. *Journal of Transportation and Logistics*, 1(1), 99-113.
- Welbourne, T. M., & Trevor, C. O. (2000). The roles of departmental and position power in job evaluation. *Academy of Management Journal*, 43(4), 761-771.
- Yertutan, D., & Çetinyokuş, T. (2021). Sürdürülebilir Konut Satın Alımının Çok Kriterli Karar Verme Metotlarıyla Değerlendirmesi ve Bir Uygulama. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(1), 32-54.
- Yu, S. (2017). Human resources management and evaluation system based on fuzzy analytic hierarchy process. *Journal of Interdisciplinary Mathematics*, 20(4), 951-964.
- Zhu, G.-N., Hu, J., & Ren, H. (2020). A fuzzy rough number-based AHP-TOPSIS for design concept evaluation under uncertain environments. *Applied Soft Computing*, 91, 106228.



A Novel Design of Constant Load Creep Test Machine

Hasan Demir^{1*} , Atıl Emre Coşgun¹ 

¹Aksaray University, Engineering Faculty, Software Engineering Department, 68100, Aksaray, Turkey

Başvuru/Received: 26/06/2022

Kabul / Accepted: 29/12/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Abstract

Polymer materials have been used in a wide area from our homes to industry today. For this reason, creep curves from the mechanical properties of polymer materials are an important factor for the correct use of polymers. This article presents a new constant load creep test machine design which is a mechatronic system to perform creep testing of polymers. A low-cost creep test machine was developed by mounting clamps, pulleys, weights and steel cable on top of a main frame. With the measurement unit, the linear movement of the steel cable was detected and recorded with the data logging system together with the ambient temperature. Tests were made with a 15% calcium carbonate reinforced polypropylene specimen. It was observed that the experimental data obtained were compatible with a standard creep test curve. These findings confirm that the presented constant load creep test machine design works efficiently.

Key Words

“Creep Test Machine, Calcium Carbonate Reinforced Polypropylene, Constant Load, Mechatronic System”

1. Introduction

Materials are generally both viscoelastic and extensible. Viscoelastic materials can be deformed by elongating under the loads they are exposed to. The temperature of the material being tested has a significant impact on a polymer's creep behaviour, which deforms at the fastest rate near the glass transition point. Depending on the rate at which its molecules are distorted, a polymer at a given temperature and molecular weight may behave as either a liquid or a solid. Viscoelastic behaviour is the broad term used to describe this phenomenon. The amount and duration of elongation of materials under a constant load can be quite interesting (Vogel & Papanicolaou, 1983). The permanent deformation of solid materials by continuous constant mechanical loads is called creep or cold flow. The material, which is exposed to loads for a long time, changes in size and shape (Asyraf et al., 2019). The amount of the load, time, temperature, and the structure and morphology of the polymer all affect how much the material deforms under creep (Hughes & Nix, 1986). Most polymers' creep behaviour can be roughly predicted using a power-law model, illustrated by Equation 1., (Osswald & Menges, 2012).

$$\varepsilon(t) = M(\sigma, T)t^n \quad (1)$$

where n is a material dependent property.

According to Hooke's law, the material behaves elastically. According to this principle, the force applied up to the yield strength causes the material to deform in the direction of the force and store elastic energy. If the applied force is removed without exceeding the yield strength, the material tends to return to its original shape. However, if the applied force exceeds the yield strength, the material exhibits a plastic behaviour and begins to tear and breaks (Sun & Frazier, 2007; Taniguchi et al., 2010).

An instantaneous deformation is a purely elastic response when a load is applied. Following this deformation is primary deformation, characterized by a rapid decrease in deformation. The next stage is secondary deformation, a steady-state linear deformation. Tertiary deformation, which occurs as the sample nears fracture, is the acceleration of deformation up to fracture (Plaseied & Fatemi, 2009). The typical stages of creep deformation are shown in Figure 1.

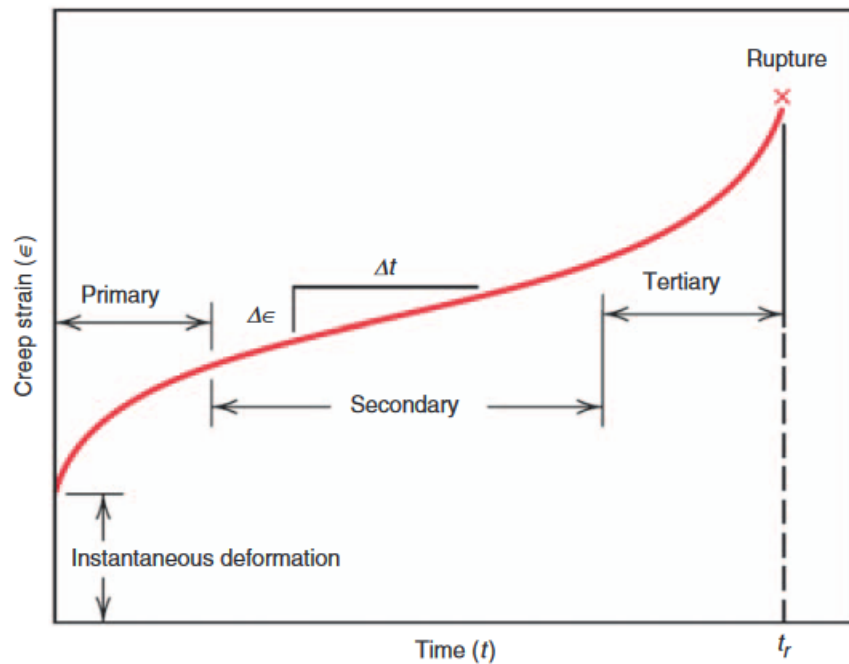


Figure 1. An example of a creep strain vs. time curve at constant tension and increasing temperature shows three separate deformation areas.

Anisotropic materials such as polymeric composites require more than ten years to rupture through creep testing. For this reason, creep tests of such materials are performed at high temperature to shorten the rupture time (Zhang et al., 2004). Therefore, creep tests are performed depending on time and temperature (Asyraf et al., 2020). Although the force applied to the specimen is constant in the creep test, the force applied to the cross-sectional area will increase because the cross-sectional area will decrease with the creep of the specimen. Machines that work with the technique of increasing the force applied to the cross-sectional area are called constant load creep machines, and the test devices in which the force applied to the cross-sectional area is constant are called constant stress creep machine. In constant load creep machines, a specimen is placed between two fixation devices such as a jaw and exposed to a load (Grishaber et al., 1997).

Typically, the temperature at which engineering components in power plants, oil refineries, and chemical industries function is around 500°C. Nuclear power plants and space rockets operate at much greater temperatures (about 1000°C), which calls for materials with high creep resistance. We can identify the condition and progression of creep at any early and non-critical stage by applying testing methodologies since creep in system components may have catastrophic effects (Khan et al., 2015). A horizontal test machine or a vertical test machine can be used to measure creep. The specimen is kept in both scenarios under constant tensile tension and at a constant temperature (Presby, 2015).

In this article, a low-cost test machine has been developed to perform creep tests under constant load of polymeric composite materials, which are widely used today. The most important feature that distinguishes the test device performed from other examples is that it is simple and low-cost to perform creep tests of polymer materials, which are used extensively today. Other reasons are that it can be accessed due to its low cost and can reduce production costs, however, it can be preferred in laboratory studies. Mechanical structure and electronic measurement circuit design has been made and applied. The mechanical structure consists of a main frame, clamps, steel cable transmitting the force and loading weights. Electronic measurement system was realized with microprocessor, rotary encoder, LCD display, temperature sensor and datalogger. A specimen was formed from calcium carbonate reinforced polypropylene composite material and uniaxial creep test was performed using the recommended test machine.

2. Background of Creep Testing Machines

Vicat was the first to examine the subject of high temperature deformation in the modern era and he carried out the experiments with a constant load. It is known that the strength of solids is time dependent, as they break at smaller loads as the time the load is applied increases. In addition, it has been determined that the strength of thermally activated solids changes (Vanel et al., 2009). Creep test machines were designed within the scope of all this information.

In general, there are two types of creep machines with uniaxial tension loading (Grishaber et al., 1997). It is a constant load creep machine using constant weights and constant stress creep machine. As shown in Figure 2, in a conventional creep test device today, specimens are loaded with constant weights by a lever arm mounted on a fixed body. In a standard creep test, specimens are tested in air at a constant temperature with constant weights. In addition, different creep test devices were developed to determine the behaviour of some materials at different temperatures, in different axes and working environments (Asyraf et al., 2020; Kelly, 1976; Ravi et al., 2014). External factors such as humidity and vibration cause uncertainty in creep test results (Buratti & Mazzotti, 2017).

The most important disadvantage of the creep test machine with a typical lever arm is the initial geometry of the sample (Grishaber et al., 1997). Depending on the mechanical structure of the specimen material and the possibility of creating different working conditions, the dimensions and costs of the test machines vary.

The test setup's precision and sensitivity must be extremely good for long-term measurements. The creep behaviour, particularly the second creep stage and the timing of failure, is strongly affected by even little changes in the load conditions. This may result in inappropriate behaviour and inaccurate failure predictions (Jorik et al., 2019). In this study, considering the mechanical properties of polymeric composite materials, a small size and low-cost creep test machine design was presented. Also, tensile creep test apparatus was done to optimize long-term measurements.

3. Design of Creep Testing System

The test machine design was built on a main carrier body. In order to simplify the machine, the lever arm was removed and the specimens were directly loaded. The most striking aspect of the design is the absence of a lever arm. The most striking aspect of the design is the absence of a lever arm. The absence of the lever arm resulted in no load gain, causing tests to be performed at lower loads. In the test machine, the load is transferred to the specimen with a steel cable. The cable span is approximately 280 mm, the overall span of approximately is 600 mm, the width is 400 mm and the height is 600 mm. The maximum test load that the machine can carry is designed as 24 kg. The CAD model and new design of the test machine is given in Figure 3.

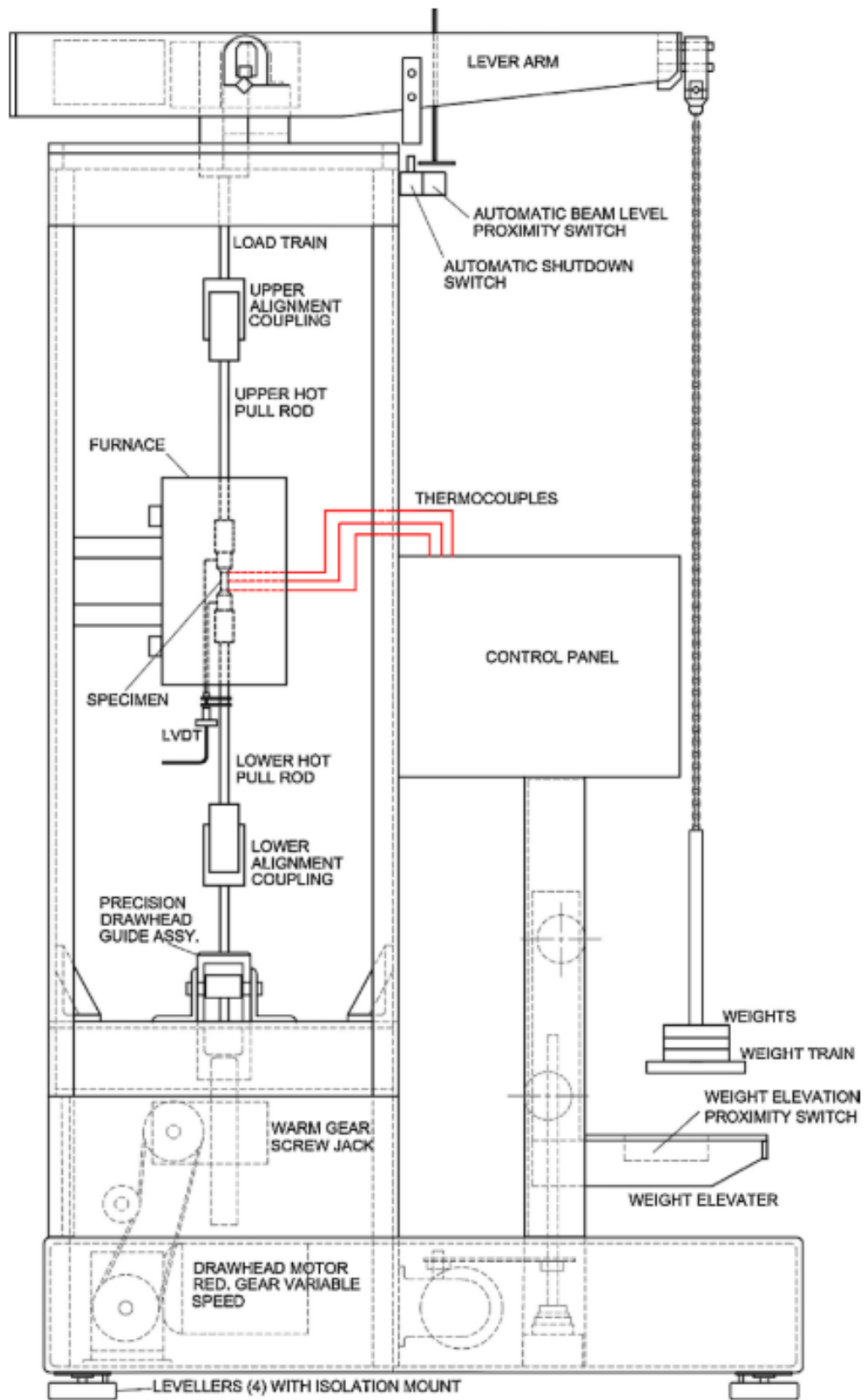


Figure 2. Conventional creep testing machine diagram (Ravi et al., 2014).

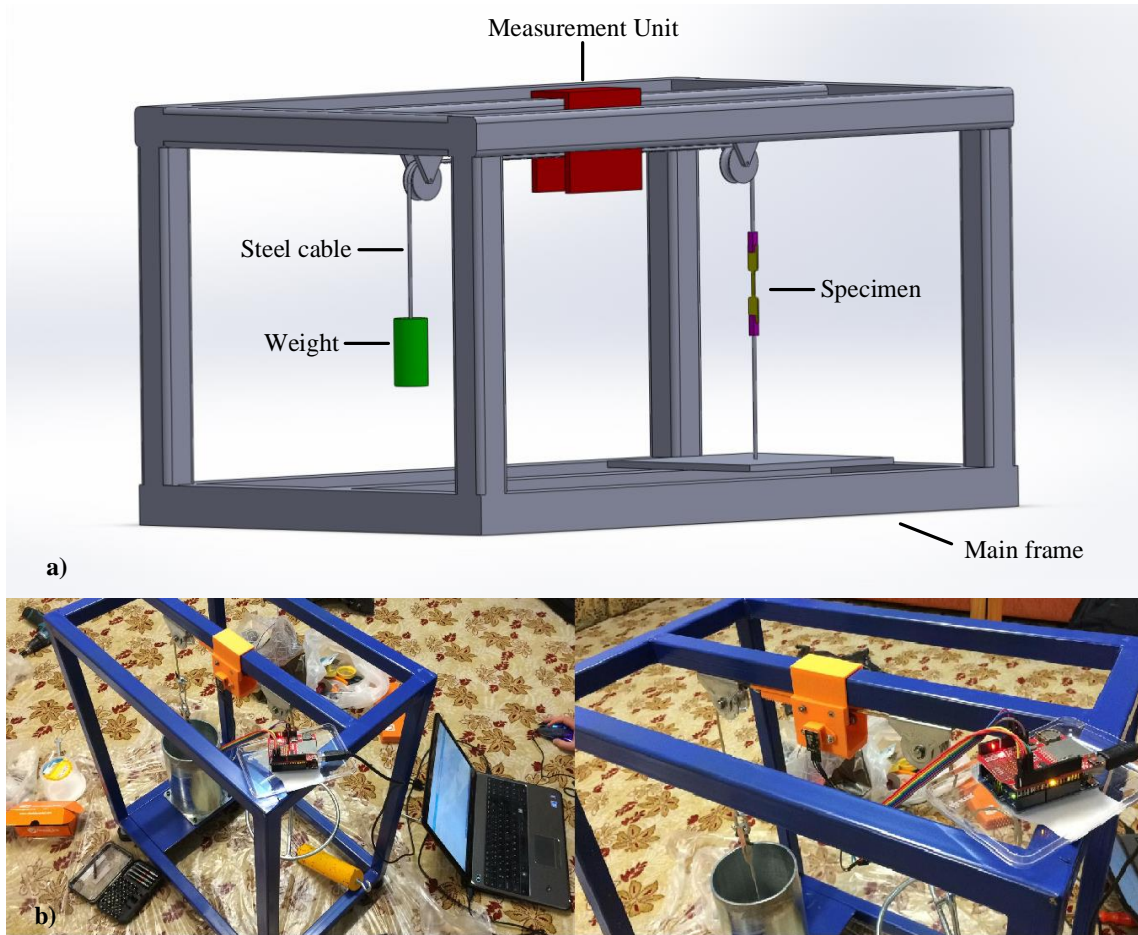


Figure 3. a) The CAD model of the designed creep testing machine; b) new design of creep test machine.

The measuring unit works according to the principle of sensing the displacement by the linear gear placed on the cable turning a circular gear. The circular gear rotates rotary encoder and the linear displacement is determined. Since the amount of elongation of the steel cable indicates the creep of the specimen, the data from the rotary encoder is converted to the elongation and recorded with the temperature depending on the time during the test using a data logger. The test device measurement software was created specifically for the mechanical structure of the device. The algorithm was implemented by the authors in an open source compiler without using commercial software. There is no temperature control in the test machine, so the experiments are carried out at ambient temperature and the ambient temperature is also measured and recorded in the experiments. The limits of the test machine are determined by the sensitivity of the electronic equipment and the dimensions of the mechanical structure. The position accuracy of the device is related to the encoder resolution and is 1.57 mm. Maximum creep measurement is 48 mm. A schematic of the creep testing machine is shown in Figure 4.

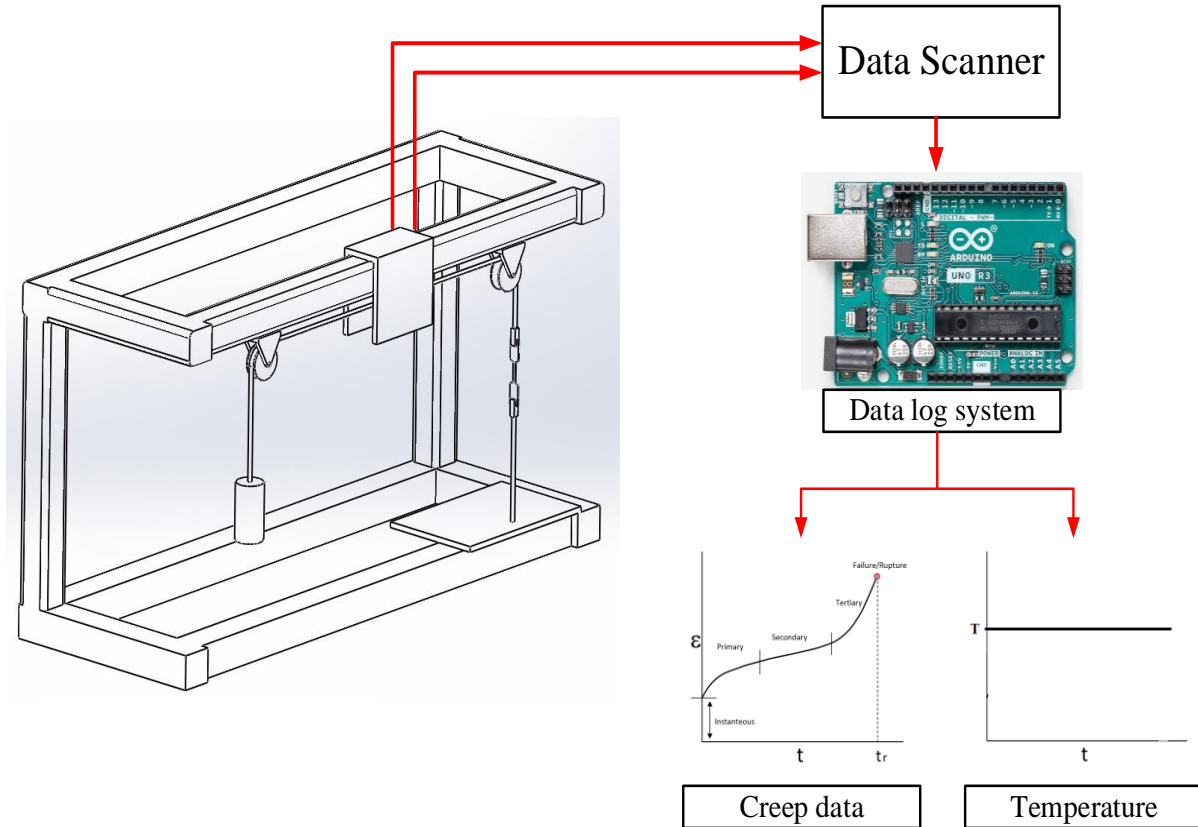


Figure 4. A schematic of the creep testing machine.

4. Testing Procedure

A very commonly used polymeric material was tested with the new test machine. Based on the dead load principle, the load is applied. By adjusting the weight or the cross-section of the specimen, the stress can be altered. A consistent plane stress state results from the specimen being clamped with sufficient accuracy. The test took 16 minutes.

4.1. Material And Specimen

High molecular weight substances formed as a result of the bonding of simple molecules by chemical bonds are called polymers. Today, polymeric materials such as PVC, nylon, teflon are widely used. Polymeric materials are used in many areas in industry, depending on their physical and mechanical properties. For this reason, the information given by the creep tests of polymer materials is important. In this study, a creep test specimen of 15% by weight calcium carbonate reinforced polypropylene (15% CaCO₃_PP) composite material was produced by plastic injection molding method. The mechanical properties of the specimen are given in Table 1.

Table 1. Elongation, initial length, final length and percent elongation of specimen.

Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio	Shear modulus (MPa)
~ 37	1347.7	0.38377	487.35

The shape and dimensions of the specimen are given in Figure 5 and the specimen was produced according to the standard ASTM D-638 protocol. The specimen is connected by clamps between the main frame and the steel cable. After loading the specimen with a constant weight of 12 kg, the measurement was started at room temperature. During the experiment, the deformation of the specimen and the ambient temperature were recorded with a data logger.

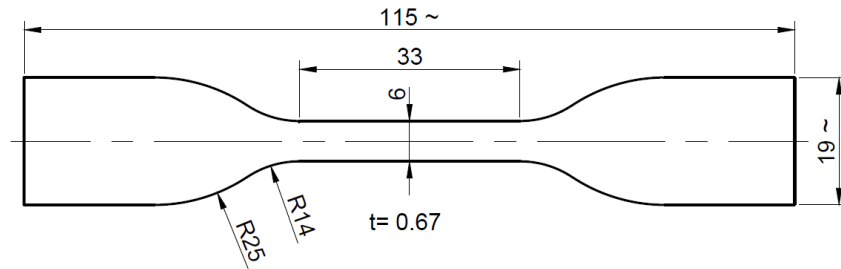


Figure 5. The specimen of %15 CaCO₃_PP.

5. Results

A failure mode may or may not be present in creep, a deformation mechanism. When stress is applied, creep deformation does not happen instantly. Instead, persistent stress causes strain to build up. Creep tests at constant temperature take place in three stages. Primary creep takes place at the beginning of the test and the specimen begins to elongate with the effect of dislocation movements. Second creep is called stable creep. At this stage the creep speed is constant and is the longest stage of the testing process. In the tertiary creep, there is an increase in the creep speed and internal cracks and grain boundary separations occur in the material. With the decrease of the cross-sectional area, the deformation speed increases rapidly and the specimen breaks. In experiments, factors such as the type of materials and temperature affect the results. Creep tests of polymer materials also take place in three stages.

In this study, the tests were carried out at ambient temperature and with a 15% calcium carbonate reinforced polypropylene specimen. The elongation-time graph of the material under 28 MPa loading stress is given in Figure 6 and the temperature at which the experiment was carried out is given in Figure 7. When the creep curve is analysed, it is seen that there is a non-linear relationship between time and elongation.

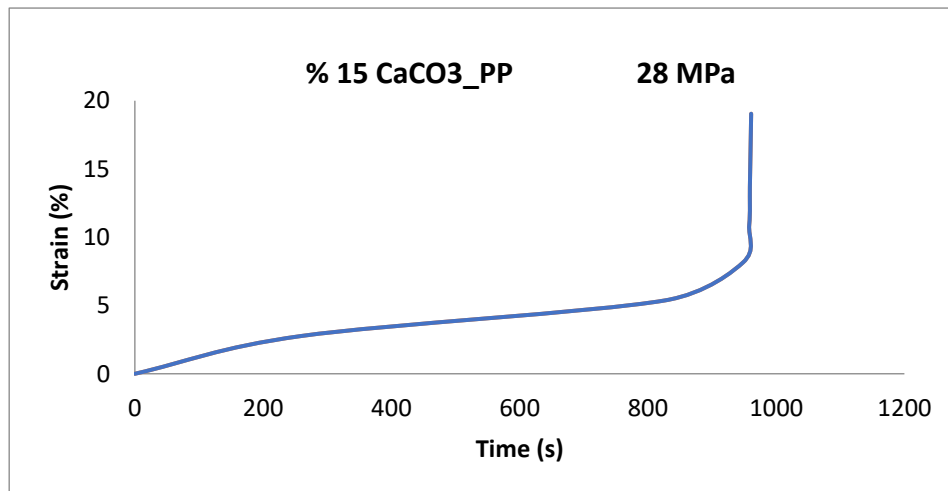


Figure 6. Creep curve of 15% CaCO₃_PP.

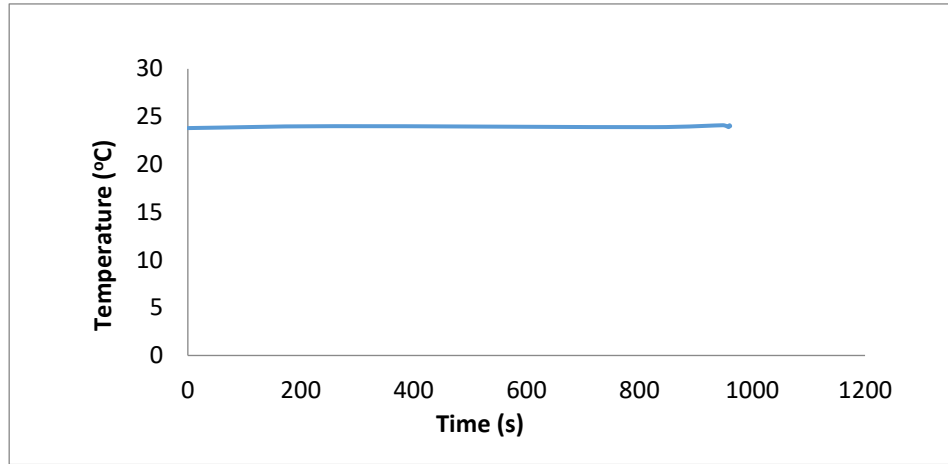


Figure 7. The temperature of the experiment.

In Table 2, time dependent elongation, initial length, final length and percent elongation obtained from the creep test were given. When the data in the table are examined, it is seen that the first stage takes place in the range of 0-260 seconds. In the second stage, the stable creep stage, the creep speed is constant and occurred in the range of 260-826 seconds. At this stage, the material has undergone more deformation because it has softened partially. The third stage started at the 826th second and lasted until the 961th second, when the sample ruptured. The picture of the broken sample is given in Figure 8. In this phase, due to the increased creep speed, the sample lengthened. With the lengthening of the size, the cross-sectional area decreased and the stresses on the cross-sectional area increased. As a result of these developments, the specimen broke.

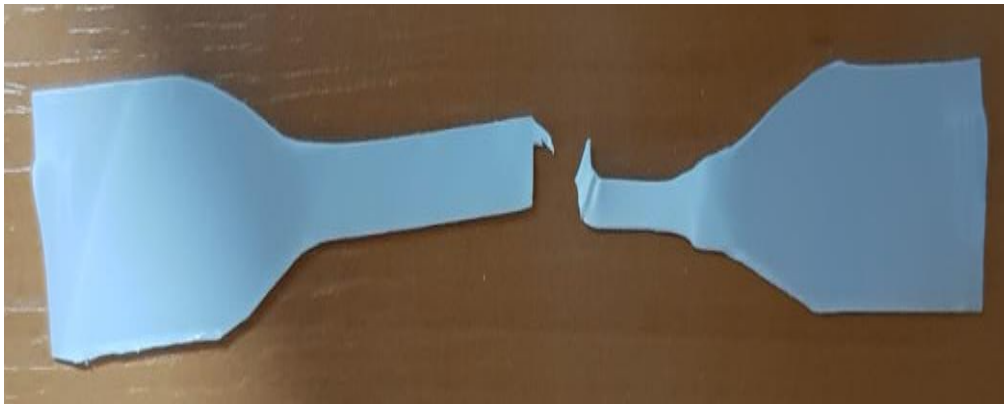


Figure 8. The ruptured specimen with elongation.

Table 2. Elongation, initial length, final length and percent elongation of specimen.

Time (s)	Elongation (%)	Elongation (mm)	The initial length (mm)	The final length (mm)
0	0	0	115.5	115.5
260	2.770563	3.2	115.5	118.7
826	5.367965	6.2	115.5	121.7
948	8.138528	9.4	115.5	124.9
958	10.90909	12.6	115.5	128.1
959	13.67965	15.8	115.5	131.3
960	16.27706	18.8	115.5	134.3
961	19.04762	22	115.5	137.5

6. Conclusion

This study presents a low-cost constant load creep test machine for performing creep testing of polymer materials. Today, polymer materials have a very common usage area and it is very important to know their mechanical properties. Therefore, a simple low-cost test system was created by adding clamps, weights, steel cable and pulleys on a main frame. The measuring unit sensed the linear displacement on the steel cable and recorded the change in sample length depending on time with the data logger system. At the same time, the ambient temperature data was recorded and the temperature information at which the experiments took place was obtained. The test was carried out for the 15% calcium carbonate reinforced polypropylene specimen. It was determined that the obtained data and the elongation graph were similar to a standard creep graph.

In summary, a low-cost test machine has been developed to examine the constant load creep properties of polymer materials. In the future, methods will be proposed for performing temperature-controlled creep tests under variable stresses.

References

- Asyraf, M. R. M., Ishak, M. R., Razman, M. R., & Chandrasekar, M. (2019). FUNDAMENTALS OF CREEP, TESTING METHODS AND DEVELOPMENT OF TEST RIG FOR THE FULL-SCALE CROSSARM: A REVIEW. *Jurnal Teknologi*, 81(4). <https://doi.org/10.11113/jt.v81.13402>
- Asyraf, M. R. M., Ishak, M. R., Sapuan, S. M., Yidris, N., Shahroze, R. M., Johari, A. N., Rafidah, M., & Ilyas, R. A. (2020). Creep test rig for cantilever beam: Fundamentals, prospects and present views. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 14(2), 6869–6887. <https://doi.org/10.15282/jmes.14.2.2020.26.0538>
- Buratti, N., & Mazzotti, C. (2017). Creep Testing Methodologies and Results Interpretation. In P. Serna, A. Llano-Torre, & S. H. P. Cavalaro (Eds.), *Creep Behaviour in Cracked Sections of Fibre Reinforced Concrete* (Vol. 14, pp. 13–24). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1001-3_2
- Grishaber, R. B., Lu, R. H., Farkas, D. M., & Mukherjee, A. K. (1997). A novel computer controlled constant stress lever arm creep testing machine. *Review of Scientific Instruments*, 68(7), 2812–2817. <https://doi.org/10.1063/1.1148200>
- Hughes, D. A., & Nix, W. D. (1986). On the limitations of dynamic recovery as revealed by temperature change tests at large strains. *Scripta Metallurgica*, 20(10), 1455–1458. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(86\)90114-6](https://doi.org/10.1016/0036-9748(86)90114-6)
- Jorik, S., Lion, A., & Johlitz, M. (2019). Design of the novel tensile creep experimental setup, characterisation and description of the long-term creep performance of polycarbonate. *Polymer Testing*, 75, 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.01.023>
- Kelly, D. A. (1976). Problems in creep testing under biaxial stress systems. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 11(1), 1–6. <https://doi.org/10.1243/03093247V111001>
- Khan, M. Z., Saleem, H., Mahi, A., Khalid, F. A., Naqvi, S. A. A., Lim, T.-H., & Song, R.-H. (2015). Design and Fabrication of High Temperature Creep Testing Machine. *American Journal of Materials Engineering and Technology*, 3(3), 8.
- Osswald, T. A., & Menges, G. (2012). *Materials Science of Polymers for Engineers* (3rd ed.). Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.3139/9781569905241>
- Plaseied, A., & Fatemi, A. (2009). Tensile Creep and Deformation Modeling of Vinyl Ester Polymer and Its Nanocomposite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28(14), 1775–1788. <https://doi.org/10.1177/0731684408090378>
- Presby, M. (2015). *Design of a Horizontal Creep Testing Machine*. 28.
- Ravi, S., Laha, K., Sakthy, S., Mathew, M. D., & Jayakumar, T. (2014). Design of creep machine and creep specimen chamber for carrying out creep tests in flowing liquid sodium. *Nuclear Engineering and Design*, 267, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.10.020>
- Sun, N., & Frazier, C. E. (2007). Time/temperature equivalence in the dry wood creep response. *Holzforschung*, 61(6), 702–706. <https://doi.org/10.1515/HF.2007.114>
- Taniguchi, Y., Ando, K., & Yamamoto, H. (2010). Determination of three-dimensional viscoelastic compliance in wood by tensile creep test. *Journal of Wood Science*, 56(1), 82–84. <https://doi.org/10.1007/s10086-009-1069-6>
- Vanel, L., Ciliberto, S., Cortet, P.-P., & Santucci, S. (2009). Time-dependent rupture and slow crack growth: Elastic and viscoplastic dynamics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(21), 214007. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/21/214007>

- Vogel, S., & Papanicolaou, M. N. (1983). A constant stress creep testing machine. *Journal of Biomechanics*, 16(2), 153–156. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(83\)90038-6](https://doi.org/10.1016/0021-9290(83)90038-6)
- Zhang, Z., Yang, J.-L., & Friedrich, K. (2004). Creep resistant polymeric nanocomposites. *Polymer*, 45(10), 3481–3485. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.03.004>



Investigation Of Energy Metabolism In The Different Tissues Of Colon Cancer Xenograft Models Based On The Tca And Cori Cycles And Glycolysis

Hülya Ayar Kayalı^{1,2,3*} Esra Bulut Atalay^{1,2}

¹ Izmir International Biomedicine and Genome Institute, Dokuz Eylül University, 35340 Izmir, Turkey

² Izmir Biomedicine and Genome Center, 35340 Izmir, Turkey

³ Department of Chemistry, Division of Biochemistry, Faculty of Science, Dokuz Eylül University, İzmir 35160, Turkey

Başvuru/Received: 07/07/2022

Kabul / Accepted: 28/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Abstract

The metabolism is reprogrammed in cancer cells to meet the requirement of their malignant properties. Some specific metabolites can contribute to the malignant transformation in different cancer types. This study aimed to determine the level of glucose, pyruvate, lactate, citrate, alpha-ketoglutarate, D-2-hydroxyglutarate, succinate, fumarate, malate, and oxaloacetate in the different tissues (tumor, colon, brain, and liver) of xenograft models generated by a colon adenocarcinoma cell line (SW480). Glucose and pyruvate levels were determined by the 3,5-dinitrosalicylic acid method and pyruvate assay, respectively. The level of other metabolites was determined by the HPLC analysis. The results show that D-2-HG is highly produced in the tumor tissues (120.2 mg/L), but it could not be detected in liver tissue. In conclusion, TCA and Cori cycles and Glycolysis were investigated in the different tissues of colon cancer xenograft models and found that some metabolites produced tissue-specific.

Key Words

“Colon cancer, xenograft model, targeted metabolomics, metabolite, HPLC”

Abbreviations

IDH	<i>Isocitrate dehydrogenase</i>
TCA	<i>tricarboxylic acid cycle</i>
α -KG	<i>alpha-ketoglutarate</i>
D-2-HG	<i>D-2-hydroxyglutarate</i>
DNS	<i>3,5-dinitrosalicylic acid</i>
DNPH	<i>2,4-dinitrophenylhydrazine</i>
MeOH	<i>methanol</i>
NaOH	<i>sodium hydroxide</i>
H&E	<i>hemotoxylin and eosin</i>
HPLC	<i>high-performance liquid chromatography</i>
OAA	<i>oxaloacetate</i>
AKT	<i>protein kinase B</i>
MYC	<i>Myelocytomatosis</i>
IBG-AELEC	<i>Izmir International Biomedicine and Genome Institute Local Ethics Committee for Animal Experiments</i>

1. Introduction

Colon cancer is the third most frequent malignancy in men and women. According to the new cancer data observed in 2020, colon cancer accounted for 10% of the total cancer incidence and 9.4% of all cancer-related deaths worldwide (Sung et al., 2020). New cases of colon cancer are generally diagnosed in the advanced stages. However, despite technological advancements in the medical field, the 5-year survival rate for late-stage patients has remained unchanged (Siegel et al., 2019). Nowadays, studies about metabolic reprogramming of cancer cells have been increasing to find new therapeutic methods (Neitzel et al., 2020).

Metabolic rearrangement is one of the hallmarks of cancer (Hanahan & Weinberg, 2011). During this process, metabolic pathways are inhibited or activated by mutation, feedback mechanisms, or other factors (DeBerardinis & Chandel, 2016). Significant changes are observed in many pathways, such as Glycolysis and the tricarboxylic acid cycle (TCA) during cancer progression. These pathways can support and/or direct cancer initiation, progression, and treatment response. In addition to energy production, precursors synthesized with TCA intermediates are used for the biosynthesis of amino acids, fatty acids, and nucleic acids, which are the basic building blocks of the cell. Therefore, one of the most critical features of the TCA cycle in dividing cells is its central location for biosynthesis (Martínez-Reyes & Chandel, 2020). In the TCA cycle, the accumulation of some specific metabolites role in the tumorigenesis process. For example, mutant isocitrate dehydrogenase (IDH) enzymes gain neomorphic enzymatic activity and catalyze the conversion from α -KG to 2-Hydroxyglutarate (2-HG). Although the 2-HG level is quite low in normal cells, it accumulates 10-100 times in various cancer types (such as glioma, AML, and colon) and participates in the carcinogenesis process (Du & Hu, 2021).

Metabolism consists of a series of biochemical reactions that provide energy for vital processes to maintain viability and synthesize new biomass. Because they play a role in regulating cellular hemostasis and connecting metabolism to epigenetic alterations, specific metabolites are at the crossroads of metabolism. Therefore, they significantly affect gene expression, cellular differentiation, and tumor microenvironment (Pavlova & Thompson, 2016). Biomarkers are found in cancer and healthy cells and are evaluated as indicators of critical biological and pathological processes. Biomarkers are discovered via metabolomics research, which determines the quantity of metabolites in all metabolic pathways in diverse biological samples. The levels of metabolites produced in only a few metabolic pathways are examined using targeted metabolomics (DeBerardinis & Chandel, 2016). So far, various biomarkers for colon cancer have been discovered in samples such as tissue, serum, and blood, and they have been used in a large variety of applications such as early detection and stage discrimination (Liesenfeld et al., 2015; Qiu, Y., et al., 2014). However, the level of metabolites in the different tissues of a xenograft model has not been investigated until now. This study aimed to determine the concentration of glucose, pyruvate, citrate, α -KG, D-2-hydroxyglutarate, succinate, fumarate, lactate, and malate in the tumor, colon, brain, and liver tissues. Thus, critical biochemical pathways (TCA cycle and Glycolysis) that control mitochondrial energy production were investigated in the different tissues of xenograft models generated by a colon adenocarcinoma cell line (SW480).

2. Material Method**2.1. Cell Line and Animals**

A colon adenocarcinoma cell line (SW480) cultured in RPMI-1640 medium was used in this study. The cell culture conditions were applied as described in our previous study (Subasi et al., 2020). The male or female athymic Nude mice (Foxn1^{nu}) were used when 6-8 weeks old. The animals were housed in IBG-Vivarium Rodent Facility, and their conditions were 22 \pm 2°C, with 12 hours of light/dark periods and access to food and water ad libitum. İzmir International Biomedicine and Genome Institute Local Ethics Committee for Animal Experiments (IBG-AELEC) approved all the conditions, protocol number: 17/2019.

2.2. Xenograft Model Development

Five million SW480 cells were suspended in the growth medium, mixed with matrigel (1:1), and subcutaneously injected into a flank of Nude mice (Chen et al., 2016). The subcutaneous tumor volume was measured with a caliper once a week and calculated with the formula below:

$$\text{Tumor volume} = (\text{length} \times \text{width}^2) \times 0.5 \quad (1)$$

When the diameter of the tumor reached 1 cm³, the mice were sacrificed. The tumor, brain, liver, and colon tissues were extracted and stored at -80 °C until metabolite extraction. Some tumor tissue was stored in the 10% formalin to H&E staining.

2.3. Metabolite Extraction from the Xenograft Tissues

The 50-100 mg of liver and brain tissues were grounded in cold %100 methanol (MeOH) (1:5, mg/mL), and colon and tumor tissues were homogenized in chloroform:MeOH: water (2:5:2) in ice for approximately 5 minutes by tissue grinder (NG010). Next, the lysate was incubated in ice for 20 minutes and then centrifuged at 16,000 g for 15 minutes at +4 °C. Next, a vacuum centrifuge was used to remove the supernatant, and the pellet was stored at -80 °C until analysis. Finally, the pellet was resuspended with double distilled water before analysis (Want et al., 2013).

2.4. 3,5-Dinitrosalicylic Acid (DNS) Method

DNS method was used to determine the reduced glucose in the tissues (Miller, 1957). First, the DNS reagent was prepared by dissolving the 1 g of DNS in 20 mL of 2N NaOH and boiled at 95 °C. Next, sodium potassium tartrate (30 g) dissolved in 50 ml of distilled water was slowly added to the DNS reagent, and the final volume was completed to 100 ml with distilled water. Next, the samples and DNS reagent were added 1:1 and mixed at 140 rpm for 10 minutes at 100 °C. Then it was incubated for 1 minute in ice. Finally, the samples and standard glucose solutions (100-4500 mg/L) were measured at 540 nm absorbance.

2.5. Pyruvate Assay

The protocol was adapted to 100 µL (96 well plates) (Yoo et al., 2011). First, the 2,4-dinitrophenylhydrazine (DNPH) solution was prepared by dissolving the 5 mg of DNPH in 5 mL of 2N Hydrochloric Acid (HCl, 37%). Next, to determine pyruvate level, 30 µl of samples and then 10 µl of DNPH solution were added to each well and incubated for 5 minutes at room temperature. Lastly, 60 µl of 2N sodium hydroxide (NaOH) solution was added and incubated again at room temperature for 10 minutes. The samples and standard solutions were measured at 520 nm absorbance.

2.6. Analyzing Metabolites with High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) System

The HPLC (Agilent, 1260 Infinity II LC System) system was used for targeted metabolomics analyses. The mobile phase was 9.0 mM H₂SO₄ solution, and the flow rate was 0.4 mL/min. The Alltech OA-1000 column was run at 42 °C. Citrate, α-KG, D-2-hydroxyglutarate, succinate, fumarate, lactate, and malate standards were detected in the UV detector (210 nm). All the HPLC-grade standards were bought from Sigma.

2.7. Hemotoxylin and Eosin (H&E) Staining

Tissue embedding, tissue follow-up, sectioning, and staining protocols were performed as previously described (Fischer et al., 2008). Experiments were carried out by a specialist at Izmir Biomedicine and Genome Center, Histopathology Unit.

2.8. Statistical Analysis

The experiments were carried out three times, and the results are mean ± SD of three independent experiments. The figures were created using GraphPad Prism 8.0 (GraphPad Software, CA, USA).

3. Results

3.1. H&E Staining Results of Tumor Tissues

When the tumor volume reached 1 cm³ in the xenograft models created from SW480 cells, the mice were sacrificed, and a piece of the tumor tissue was stored in %10 formalin for H&E staining (Figure. 1A). An expert veterinary pathologist evaluated the histopathology results. In the SW480 tumor tissue, tumor parenchyma in the form of islands was observed around the blood vessels (indicated with a yellow arrow). Both anisocytosis and anisonucleosis in tumor cells were moderate. The cell undergoing mitosis was moderately vigorous, and mitotic cells were marked with the red arrow (Figure. 1A).

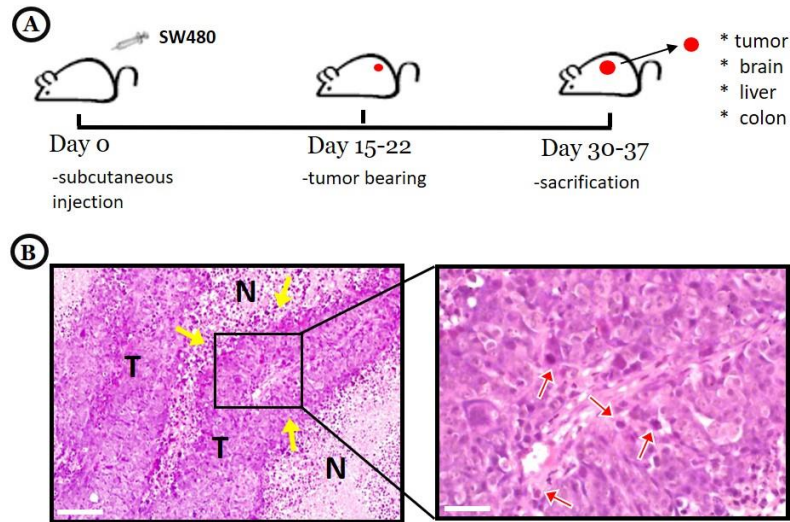


Figure 1. Histopathology Of Xenograft Tumor Tissues. By Subcutaneously Injecting 5 Million SW480 Cells Into The Flank Of Male Or Female Nude Mice 6–8 Weeks Old, Xenograft Models Were Generated. (A) Representative H&E Staining Images Of SW480 Tumor Tissue. (B) The Right Panel Illustrates Enlargements From The Left Panel (Marked Boxes). The Yellow Arrows Indicate The Borders, And The Red Arrows Indicate The Mitotic Cells. The Scale Bar Is 200 μm .

3.2. Investigating the Metabolite Concentration in the Different Tissues of Xenografts Models

The extracted tumor, brain, liver, and colon tissues from xenografts models were used for metabolite extraction, and the level of glucose, pyruvate, lactate, TCA cycle intermediates, and D-2-HG was estimated.

In the brain tissue, glucose was most metabolized to the TCA cycle than in all other tissues. Related to this, pyruvate level was decreased, and TCA cycle intermediates were more produced. As is seen in Figure 2A, glucose, pyruvate, citrate, α -KG, D-2-HG, succinate, fumarate, malate, and oxaloacetate levels were determined as 112.1, 3.3, 83.3, 78.5, 35.2, 98.9, 40.3, 107.7, 112.3 mg/L in the brain tissues, respectively.

The lowest glucose level was determined in the colon than in all other tissues. (Figure. 2B). The high glucose metabolism led to the increased level of TCA cycle intermediates. The levels of glucose, pyruvate, citrate, α -KG, D-2-HG, succinate, fumarate, malate, and oxaloacetate were determined as 104.1, 3.2, 71.2, 4.6, 11.2, 28, 10, 57.6, 47.4 mg/L in the colon tissues, respectively (Figure. 2B).

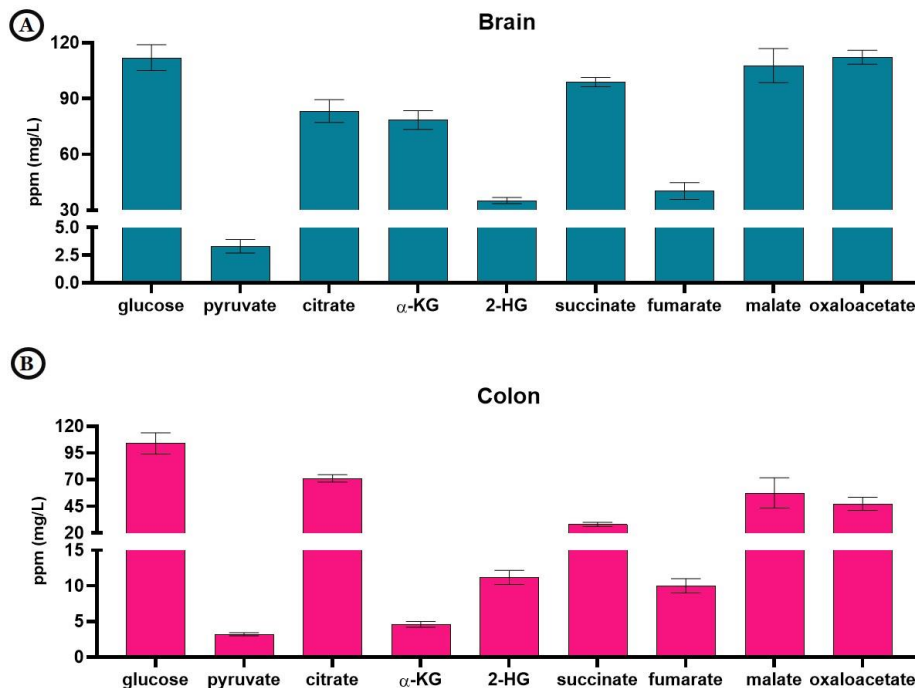


Figure 2. The Metabolites Extracted From The Brain And Colon Tissues Of Xenograft Models Were Generated By A Colon Adenocarcinoma Cell Line. The Level Of Glucose, Pyruvate, Citrate, A-KG, Succinate, Fumarate, Malate, Oxaloacetate, And, D-2-HG Were Determined In The Brain (A) And Colon (B) Tissues.

The tumor tissues take more glucose and quickly metabolize it to produce new biomass (Lunt&Vander Heiden, 2011). The results showed that the glucose level was more than the brain and the colon tissues. The levels of glucose, pyruvate, lactate, citrate, α -KG, D-2-HG, succinate, fumarate, malate, and oxaloacetate were determined as 150, 3.8, 70.2, 50.0, 2.4, 120.2, 49.7, 4.1, 22.9, 35.2 mg/L in the tumor tissues, respectively (Figure 3A). Most importantly, the level of D-2-HG was highest in the tumor tissue than in all other tissues.

The glucose and lactate levels were the highest in the liver tissues. The CCD-18Co liver had a very high glucose level (4451.0 g/L). The levels of glucose, pyruvate, lactate, citrate, α -KG, succinate, fumarate, malate, and oxaloacetate were determined as 2173.7, 4.0, 195.7, 43.3, 12.9, 45.7, 2.3, 35.0, 47.3 mg/L in the liver tissue, respectively (Figure 3A). More importantly, D-2-HG was not detected in the liver tissue, revealing that metabolites have produced tissue-specific.

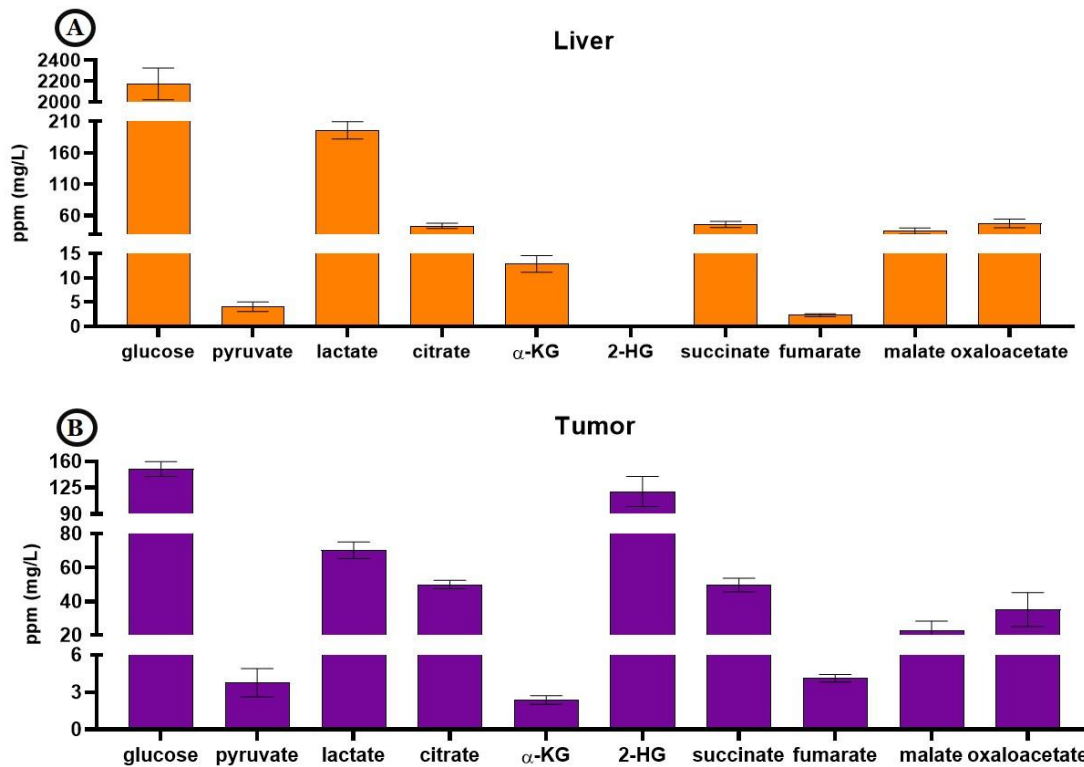


Figure 3. The Metabolites Were Extracted From Liver And Tumor Tissues Of Xenograft Models Generated By A Colon Adenocarcinoma Cell Line. The Level Of Glucose, Pyruvate, Lactate, Citrate, A-KG, Succinate, Fumarate, Malate, Oxaloacetate, And, D-2-HG Were Determined In The Liver (A) And Tumor (B) Tissues.

4. Discussion

Cells must adapt to changing metabolic pathways to survive and proliferate in certain conditions (DeBerardinis & Chandel, 2016). Hence, metabolites produced in different forms due to mutations or changing their concentrations are significant therapeutic advantages for scientists. Previous studies showed that the high rate of Glycolysis resulted in a decrease in glucose level and an increase in the level of glycolytic intermediates (Lunt & Vander Heiden, 2011). In our study, the decrease in glucose level in tumor tissues compared to other tissues (Figures 2 and 3) was thought to result from the Warburg effect. On the other hand, glucose level was significantly different in all xenograft tissues. While glucose level in the brain, tumor, and colon tissue decreased, they accumulated in the liver tissues of xenograft models (Figure 4). Genetic analysis shows that the mutations in some glycolytic-enzymes such as the pyruvate kinase, and activation of oncogenes such as protein kinase B (AKT) and Myelocytomatosis (MYC), affect cancer metabolism *in vivo* and lead to dysregulation of glucose metabolism in different tissues (Camarda et al., 2017). We hypothesize that the differences in glucose metabolism in the different tissues can be related to the glycolysis-related enzyme equipment.

In addition to glycolytic intermediates, the synthesis of TCA cycle intermediates is also increased in cancer metabolism. The two different anaplerotic pathways provide an intermediate to the TCA cycle. Glutamine converts to α -KG through the glutaminolysis pathway and participates in the TCA cycle, and pyruvate is converted to oxaloacetate (Dang, 2010; Fan et al., 2009). While the pyruvate level is low in all tissues, the increased oxaloacetate level may be due to the active anaplerotic pathway (Figures 2 and 3). Although the α -KG level is kept in balance with the glutaminolysis pathway, the lowest α -KG level (2.4 mg/L) is determined in tumor tissue. Relatedly, the level of D-2-HG, the reduced form of α -KG, is highest in tumor tissue (Figure 3B; Figure 4).

Lactate, which is highly produced in cancer tissues, can be converted to pyruvate and participate in the TCA cycle, as well as sent to the liver. In this pathway known as the Cori cycle, lactate participates in the gluconeogenesis in the liver tissue, and the glucose produced here is sent back to the cancer tissue (Cori, 1931). In our study, lactate level was lower in tumor tissue compared to liver tissue, and glucose level in liver tissue was found at the highest level compared to other cancer types is consistent with the Cori cycle (Figure 4).

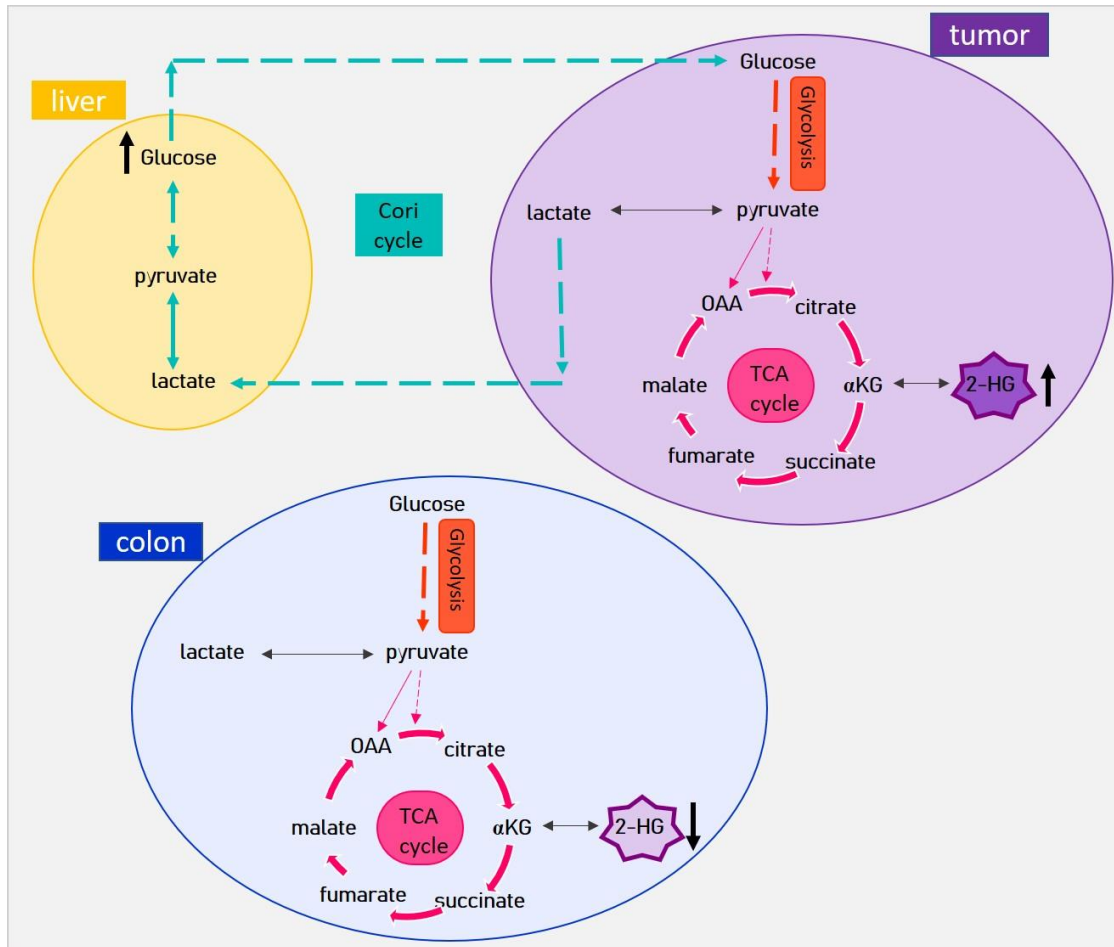


Figure 4. Schematic Presentation Of Metabolic Changes In The TCA And Cori Cycle And Glycolysis In The Tumor, Colon, And Liver Tissues Of Xenograft Models. The TCA And Cori Cycles And Glycolysis Are Shown In Pink, Blue, And Orange, Respectively. A-KG, Alpha-Ketoglutarate; D-2-HG, D-2-Hydroxyglutarate; OAA, Oxaloacetate.

Targeted metabolomics examines the quantities of metabolites produced in specific metabolic pathways (DeBerardinis&Chandel, 2016). In this study, we focus on the metabolite produced in the TCA cycle and Glycolysis. Identifying alterations in metabolite levels is a critical point for the early detection of cancer. Because while some metabolites are produced at a very low level in the healthy cell, they are highly synthesized in the cancer cell and can accumulate to millimolar level. D-2-HG is an example of these oncometabolite. High levels of D-2-HG have been detected in various types of cancer, such as glioma and colon (Du&Hu, 2021). In our study, significant results were obtained for D-2-HG synthesized in all the different tissues. D-2-HG was produced in the brain (35.2 mg/L), colon (11.2 mg/L), and tumor (120.2 mg/L) tissues (Figure 2A-B; figure 3B), whereas it could not be detected in the liver tissue (Figure 3A). The results demonstrated that D-2-HG production is tissue-specific, highlighting the need to use different tissues in metabolomics analyses when analyzing cancer-specific biomarkers. In addition, a 10.7-fold higher D-2-HG level in tumor than in colon tissue (Figures 2 and 3) indicates that this oncometabolite is involved in tumor growth and is consistent with the previous study (Montrose et al., 2012).

5. Conclusion

In this study, how the level of certain intermediates changed in different tissues of xenograft models was investigated. Thus, important pathways that control mitochondrial energy production, such as TCA and Cori cycle, and Glycolysis were investigated besides determining tissue type-specific metabolite levels.

References

- Camarda, R., Williams, J., & Goga, A. (2017). In vivo reprogramming of cancer metabolism by MYC. *Frontiers in Cell Developmental Biology*, 5, 35. doi:10.3389/fcell.2017.00035
- Chen, S., Li, X., Chen, R., Yin, M., & Zheng, Q. (2016). Cetuximab intensifies the ADCC activity of adoptive NK cells in a nude mouse colorectal cancer xenograft model. *Oncology Letters*, 12(3), 1868-76. doi:10.3892/ol.2016.4835
- Cori, C.F. (1931). Mammalian carbohydrate metabolism. *Physiological Reviews*, 11(2),143-275. doi:10.1152/physrev.1931.11.2.143
- Dang, C.V. (2010). Glutaminolysis: supplying carbon or nitrogen or both for cancer cells? *Cell Cycle*, 9(19), 3884-6. doi:10.4161/cc.9.19.13302
- DeBerardinis, R. J., & Chandel, N. S. (2016). Fundamentals of cancer metabolism. *Science Advances*, 2(5), e1600200. doi:10.1126/sciadv.1600200
- Du, X., & Hu, H. (2021). The roles of 2-Hydroxyglutarate. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 9,486. doi:10.3389/fcell.2021.651317
- Fan, T. W. M., Lane, A. N., Higashi, R. M., Farag, M.A., Gao, H., Bousamra, M., & Miller, D. M. (2009). Altered regulation of metabolic pathways in human lung cancer discerned by ¹³C stable isotope-resolved metabolomics (SIRM). *Molecular Cancer*, 8(1), 1-19. doi: 10.1186/1476-4598-8-41
- Fischer, A. H., Jacobson, K. A., Rose, J., & Zeller, R. (2008). Hematoxylin and eosin staining of tissue and cell sections. *Cold Spring Harbor Protocols*, 2008(5), 4986. doi:10.1101/pdb.prot073411
- Hanahan, D., & Weinberg, R. A. (2011). Hallmarks of cancer: the next generation. *Cell*, 144(5), 646-674. doi:10.1016/j.cell.2011.02.013
- Liesenfeld, D. B., Habermann, N., Toth, R., Owen, R. W., Frei, E., Böhm, J., Schrotz-King, P., Klika Karel, D., & Ulrich Cornelia, M. (2015). Changes in urinary metabolic profiles of colorectal cancer patients enrolled in a prospective cohort study (ColoCare). *Metabolomics*, 11(4),998-1012. doi:10.1007/s11306-014-0758-3
- Lunt, S. Y., & Vander Heiden, M. G. (2011). Aerobic Glycolysis: Meeting the metabolic requirements of cell proliferation. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 27(1), 441–464. doi:10.1146/annurev-cellbio-092910-154237
- Martínez-Reyes, I., & Chandel, N. S. (2020). Mitochondrial TCA cycle metabolites control physiology and disease. *Nature Communications*, 11(1),1-11. doi:10.1038/s41467-019-13668-3
- Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*, 31(3), 426-428. doi:10.1021/ac60147a030
- Montrose, D.C., Zhou, X.K., Kopelovich, L., Yantiss, R.K., Karoly, E.D., Subbaramaiah, K., & Dannenberg, A. J. (2012). Metabolic profiling, a noninvasive approach for the detection of experimental colorectal neoplasia. *Cancer Prevention Research*, 5(12), 1358-1367. doi:10.1158/1940-6207.CAPR-12-0160
- Neitzel, C., Demuth, P., Wittmann, S., & Fahrner, J. (2020). Targeting altered energy metabolism in colorectal cancer: oncogenic reprogramming, the central role of the TCA cycle and therapeutic opportunities. *Cancers*, 12(7),1731. doi:10.3390/cancers12071731
- Pavlova, N. N., & Thompson, C. B. (2016). The emerging hallmarks of cancer metabolism. *Cell Metabolism*, 23(1),27-47. doi:10.1016/j.cmet.2015.12.006
- Qiu, Y., Cai, G., Zhou, B., Li, D., Zhao, A., Xie, G. Li, H., Cai, S., Xie, D., Huang, C., Ge, W., Zhou, Z., Xu, L. X., Jia, W., Zheng, S.,Yen Y., & Jia W. (2014). A distinct metabolic signature of human colorectal cancer with prognostic potential. *Clinical Cancer Research*, 20(8), 2136-2146. doi:10.1158/1078-0432.CCR-13-1939
- Siegel, R. L., Miller, K. D., & Jemal, A. (2019). Cancer statistics. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 69(1), 7-34. doi: 10.3322/caac.21551

- Subasi, E., Atalay, E. B., Erdogan, D., Sen, B., AyarKayali, H., & Pakyapan B. (2020). Synthesis and characterization of thiosemicarbazone-functionalized organoruthenium (II)-arene complexes: Investigation of antitumor characteristics in colorectal cancer cell lines. *Materials Science and Engineering: C*, 106, 110152. doi:10.1016/j.msec.2019.110152
- Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R. L., Laversanne, M., Soerjomataram, I., Jemal, A., & Bray, F. (2021). Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 71(3), 209-249. doi:10.3322/caac.21660
- Want, E. J., Masson, P., Michopoulos, F., Wilson, I. D., Theodoridis, G., Plumb, R. S. Shockcor J., Loftus N., Holmes, E., & Nicholson J. K. (2013). Global metabolic profiling of animal and human tissues via UPLC-MS. *Nature Protocols*, 8(1), 17-32. doi:10.1038/nprot.2012.135
- Yoo, K. S., Lee, E. J., & Patil, B. S. (2011). Underestimation of pyruvic acid concentrations by fructose and cysteine in 2, 4-dinitrophenylhydrazine-mediated onion pungency test. *Journal of Food Science*, 76(8), C1136-42. doi:10.1111/j.1750-3841.2011.02357.x



Robust Output Feedback Control Design for Nonlinear Coupled-tank System using Linear Matrix Inequalities

Jaffar Seyyedesmaeili^{1*} , Abdullah Başçı¹ 

¹Electrical Engineering Department, Atatürk University, Erzurum, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 23/07/2022

Kabul / Accepted: 28/11/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Abstract

In this study, the Robust Output Feedback controller (ROF) is designed based on the H_{∞} theory and implemented in the liquid level control of the coupled tank system. As many chemical processes have complicated and nonlinear characteristics, this robust methodology is proposed to overcome them. Hence, the vertical coupled tank system is selected as one of the popular case study systems to simulate the large scaled chemical processes to illustrate the effectiveness of the proposed ROF controller. Linear Matrix Inequalities (LMIs) methodology is selected as the main mathematical method of the design procedure. To demonstrate the performance and robustness of the ROF controller, the simulation and experimental results are compared with the Feedforward Proportional Integrator, one of the most common controllers in the industries. Two different liquid-level control scenarios are considered in this comparison and the obtained results show the expected performance of the ROF controller guaranteeing the design objectives.

Key Words

“Coupled-Tank, Robust Control, LMIs, Liquid Level Control, Output Feedback”

1. Introduction

Today, the control systems theory plays an undeniable role in many chemical industries' flow, level, and pressure control processes. Whereas the complexity of most of these processes is increasing day by day, the need for new and efficient control methodologies is highlighted. Because of the complexity and nonlinear behavior of these chemical processes, some of the common classical control approaches such as Proportional Integral Derivative controller (PID) and Linear Quadratic Regulator (LQR), are more common for their low costs and ease of implementation, cannot properly handle the objectives of the process control in terms of the robustness and performance as good as possible. Some research studies have worked on these methodologies Jaafar et al. (2014), Saad et al. (2014), Selamat et al. (2015), Engules et al. (2015), and Dutta et al. (2014). To overcome their low efficiency, the design and implementation of robust and high-performance controllers are proposed in the last years such as by Sekban et al. (2020), Xu et al. (2020), and Mahapatro et al. (2018).

The coupled tank system is a well-known benchmark that is used to verify the performance of the controller design in nonlinear systems and is also used to simulate the nonlinear level process controls. The system's nonlinear behavior is concluded from the different scenarios of the interaction between tanks. Some control approaches are presented for level control of the nonlinear coupled tank system. In some research studies, the SMC (Sliding Mode Control) is designed to control the reference tracking of the system on different platforms Aksu and Coban (2019), Başçi et al. (2016), Dutta et al. (2014), Derdiyok and Başçi (2013), Prusty et al. (2016), Nail et al. (2015), Ayten and Dumlu (2021). This methodology has its pros and cons; robustness to uncertainties and disturbances is its advantage and the large chattering in the control signal and slow tracking response as disadvantages. In many case studies, the Neuro-Fuzzy control and the GA (Genetic Algorithm) are presented by Owa et al. (2013), Yilmaz et al. (2021), Başçi and Derdiyok (2016); Arun and Mohan (2017), Souran et al. (2013), Teng et al. (2003). Adaptive learning, fault tolerance characteristics, and more complex learning algorithms with the large response time and the need for high memory requirements are the advantages and disadvantages of these approaches. In another research, Fue et al. (2021) proposed an optimal reference tracking controller for linear coupled systems and applied it to the coupled tank system.

In the above-stated research works, the nonlinear behavior of the system and the incompatibility of the control objectives make it difficult to accede to the main objectives of the design procedure such as robustness and better reference tracking. Therefore, most of them try to reach a better tradeoff between these incompatible objectives sometimes with trial and error. Hence, according to some weaknesses of the aforementioned methods in dealing with the system's nonlinearity, the H_∞ -based feedback control methodology is proposed to satisfy the design objectives of this study. On the other hand, the H_∞ -norm is explained as the output's worst-case RMS (Root Mean Square) value. So, the characteristics of the H_∞ synthesis in response to the deterministic inputs and its acceptable performance and robustness in disturbance rejection make it an effective choice for the level control of the system. Generally, the coupled tank system with two main configurations named configurations 1 and 2 is considered in most controller design studies as a case study to verify the effectiveness of their designed controller. Two scenarios cover these configurations: #1 controlling the upper tank liquid level and #2 controlling the bottom tank liquid level in presence of the disturbance of the upper tank output.

This paper is structured as follows; section 2 contains coupled tank system description and its mathematical model. In section 3 the design objectives are explained and the ROF H_∞ control methodology is described mathematically in LMIs. To illustrate the performance of the designed controller the simulations and experimental results have been discussed in section 4. In this section to demonstrate the efficacy of the proposed controller, it is compared to the PI+Feedforward controller experimentally. Comparison between these two controllers is done by computing the Mean Absolute Deviation (MAD) of the reference tracking responses. The last section, section 5, includes the conclusions of the study.

2. Coupled Tank System Description

Two scenarios of configuration #1 and configuration #2, which are described based on the choice of the level control of the tanks, are illustrated in Fig. 1 and Fig. 2. The mathematical descriptions of these configurations are presented in the following.

2.1. First-tank System with Configuration #1

The single-tank system consists of the top tank of the coupled-tank system shown in Fig. 1. The input of the system is the pump flow into the first tank and the bottom tank is not considered. So the voltage of the pump is introduced as the input and the liquid level in the top tank is described as the output of the process.

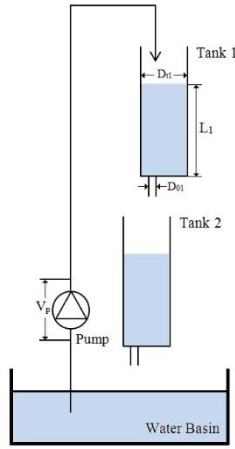


Figure 1. Coupled-tank system schematic diagram: configuration #1

In the stationary consideration of the system, the input liquid flow to the tank is in the same amount as the output flow drained from the system. The difference between these two amounts is accumulated in the tank in the dynamic consideration. Therefore, the mathematical model of configuration #1 is determined by the following equations (Esmacili and Başçi (2019)):

$$f_{i1} = K_m V_p \quad (1)$$

$$f_{o1} = A_{o1} v_{o1} \quad (2)$$

where K_m is the pump volumetric constant, V_p is the pump input voltage, A_{o1} is the cross-sectional area of the system, and v_{o1} is the outflow velocity of the tank 1. As a remark, the A_{o1} is calculated by,

$$A_{o1} = \frac{1}{4} \pi D_{o1}^2 \quad (3)$$

where D_{o1} denotes the tank 1 outlet diameter. Bernoulli's equation can calculate the outflow velocity

$$v_{o1} = \sqrt{2gL_1} \quad (4)$$

where g and L_1 are the gravitational constant ($\cong 981 \text{ cm/sec}^2$) and the height of the fluid in tank1, respectively. Substituting the presented equations into equation (2), the outflow rate of tank 1 becomes,

$$f_{o1} = A_{o1} \sqrt{2gL_1} \quad (5)$$

As mentioned before, the difference between the input and output flow is accumulated in the tank and this difference can be written as a mass balance principle by the following first-order differential equation

$$A_{t1} \left(\frac{\partial}{\partial t} L_1 \right) = f_{i1} - f_{o1} \quad (6)$$

where A_{t1} is the inside cross-sectional area of tank 1. Rewriting the equation (6) with eqs. (1) and (2) can be denoted in the following form:

$$\frac{\partial}{\partial t} L_1 = - \frac{A_{o1}}{A_{t1}} \sqrt{2gL_1} + \frac{K_m}{A_{t1}} V_p \quad (7)$$

2.2. Coupled Tank System as Configuration #2

Fig. 2 illustrates configuration #2 of the coupled-tank plant. According to the schematic diagram of the second configuration, tank 1 is fed by the pump, and the outlet of tank 1 is fed into tank 2. The liquid level of tank 1 and tank 2 are the states of the system in this configuration. The state-space equation for tank 1 is the same one in equation (7). For the bottom tank 2, the outlet flow rate can be described as

$$f_{o2} = A_{o2} v_{o2} \quad (8)$$

The tank 2 outflow velocity using Bernoulli's formula is

$$v_{o2} = \sqrt{2gL_2} \quad (9)$$

In the same form as in the previous configuration, the cross-sectional area of the outlet of tank 2 is calculated by

$$A_{o2} = \frac{1}{4}\pi D_{o2}^2 \quad (10)$$

The outlet flow rate of tank 1 is considered as the input flow to tank 2. So using Eq. (5) the input flow of tank 2 is

$$f_{i2} = f_{o1} = A_{o1}\sqrt{2gL_1} \quad (11)$$

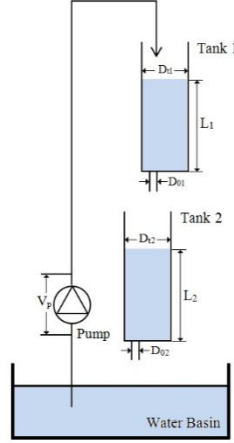


Figure 2. Coupled-tank system schematic diagram: configuration #2

Considering the mass balance rule for tank 2, the differential equation for tank 2 is obtained as follows

$$A_{t2} \left(\frac{\partial}{\partial t} L_2 \right) = f_{i2} - f_{o2} \quad (12)$$

Substituting Eqs. (8) and (11) into equation (12) give the state-space realization for the level of tank 2 as follows:

$$\frac{\partial}{\partial t} L_2 = \frac{A_{o1}}{A_{t2}} \sqrt{2gL_1} - \frac{A_{o2}}{A_{t2}} \sqrt{2gL_2} \quad (13)$$

Eqs. (7) and (13) are considered as main equations of the coupled-tank system, and the state variables will be as below

$$\begin{aligned} x_1(t) &= L_1 \\ x_2(t) &= L_2 \end{aligned}$$

Using the linearization principle around the equilibrium point of the system as (L_{o1}, L_{o2}) , the state-space representation of the LTI (Linear Time Invariant) system is described by:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

with

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{A_{o1}}{A_{t1}} \sqrt{\frac{g}{2L_{o1}}} & 0 \\ \frac{A_{o1}}{A_{t2}} \sqrt{\frac{g}{2L_{o1}}} & -\frac{A_{o2}}{A_{t2}} \sqrt{\frac{g}{2L_{o2}}} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{K_m}{A_{t1}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

3. LMI-Based ROF Synthesis Description

3.1. H_∞ Norm

There are several descriptions for the H_∞ norm in the time and frequency domains. In generality, the main goal of designing this controller is to minimize the H_∞ norm of the system's transfer function. In the frequency domain representation, the H_∞ norm

minimizes the biggest singular value of the system, and in the SISO case; it is the largest input/output RMS gain of the transfer function. The H_∞ norm is described as the following:

$$\|G(s)\|_\infty \triangleq \sup_{\omega} \bar{\sigma}(G(j\omega)) \tag{15}$$

The time-domain expression of the H_∞ norm is named the induced 2-norm as follows (Esmaeili et al. 2015):

$$\|G(s)\|_\infty = \sup_{w(t) \neq 0} \frac{\|z(t)\|_2}{\|w(t)\|_2} \tag{16}$$

where $\|z(t)\|_2 = \sqrt{\int_0^\infty \sum_i |z_i(t)|^2 dt}$ is the energy of the signal vector. It minimizes the energy of the output signal for the worst-case input signal Esmaeili et al. (2015).

3.2. Design Objectives

As mentioned before, in this study the main aims of the controller design are the reference setpoint tracking by considering the structural constraints of the nonlinear system. On the other hand, some unexpected inputs such as disturbances and sensor noise which the system must be isolated from are considered uncertainties in the design procedure. So these objectives, which are to be taken into consideration in designing the controller, are listed as follows:

- Minimization of the reference tracking error: to have better reference tracking in the level control, it has to be minimized the setpoint liquid level tracking error. Fast accurate reference tracking with minimum error has an important role in process control applications.
- Disturbance rejection: Besides the main input of the system named as the reference setpoint, sometimes there are other types of unexpected exogenous inputs such as disturbances and sensor noises. The need for a robust controller is highlighted to isolate the system from and overcome these unwelcome inputs. This objective of designing a procedure motivates the disturbance rejection characteristic of the H_∞ controller.
- Control signal: the upper and lower bounds of the water pump input voltage are considered the structural constraints of the system, so the control signal constraint is determined as below:

$$|u| \leq u_{max}$$

3.3. Robust Output Feedback Synthesis

The design framework of the augmented plant is shown in Fig. 3. To negate the frequency effects of the exogenous inputs of the system, it is undeniable to add some weights on the system inputs $[L_{ref} \ n_1 \ n_2]$ and desired control outputs $[Z_e \ Z_{u_i}]$. In other words, the input and output weights explain the frequency content of the inputs and the interested frequencies of controlled outputs (Esmaeili et al. (2015)). The $[y_1 \ y_2]$ are measured using sensors which are described as the measured outputs of the tank levels.

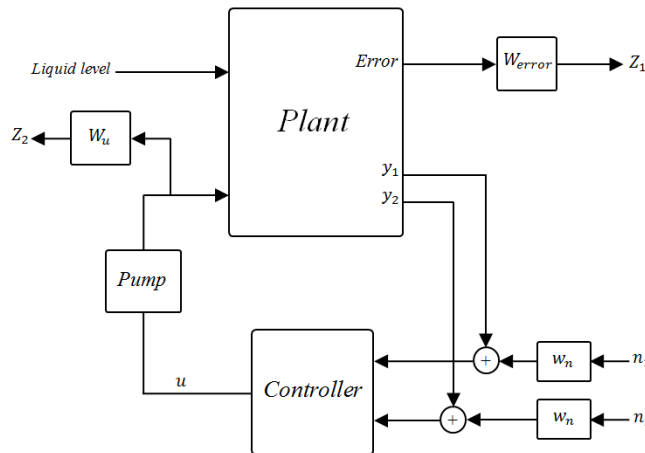


Figure 3. Augmented Plant model

Now the state-space realization of the augmented plant for designing the H_∞ control is described below:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_1\omega(t) + B_2u(t) \quad (17. a)$$

$$z(t) = C_1x(t) + D_{11}\omega(t) + D_{12}u(t) \quad (17. b)$$

$$y(t) = C_2x(t) + D_{21}\omega(t) + D_{22}u(t) \quad (17. c)$$

To design the H_∞ controller the controller is described as

$$S := \begin{pmatrix} \dot{x}_c \\ u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_c & B_c \\ C_c & D_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y \end{pmatrix} \quad (18)$$

and the closed-loop system realization is described as

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{cl} &:= \begin{pmatrix} A + B_2D_cC_2 & B_2C_c \\ B_cC_2 & A_c \end{pmatrix} \\ \mathcal{B}_{cl} &:= \begin{pmatrix} B_1 + B_2D_cD_{21} \\ B_cD_{21} \end{pmatrix} \\ \mathcal{C}_{cl} &:= (C_1 + D_{12}D_cC_2 \quad D_{12}C_c) \\ \mathcal{D}_{cl} &:= D_{11} + D_{12}D_cD_{21} \end{aligned} \quad (19)$$

Considering the linear dissipative systems theory that Gahinet et al. (1994) have presented, the following BMI (Bilinear Matrix Inequality) gives the controller:

Minimize γ_∞ subject to

$$K > 0 \quad (20)$$

$$\begin{pmatrix} \mathcal{A}_{cl}^T K + K \mathcal{A}_{cl} & K \mathcal{B}_{cl} & \mathcal{C}_{cl}^T \\ * & -\gamma_\infty^2 I & \mathcal{D}_{cl}^T \\ * & * & -I \end{pmatrix} < 0$$

As the inequality described in (20) involves nonlinear terms, this BMI (Bilinear Matrix Inequality) must be changed to an LMI using a change of variables and the proper congruence transformation (Gahinet et al. (1994), Scherer and Weiland (2000)). So these new variables are described as follows:

$$\left(K, \begin{pmatrix} A_c & B_c \\ C_c & D_c \end{pmatrix} \right) \rightarrow v = \left(X, Y, \begin{pmatrix} \tilde{A} & \tilde{B} \\ \tilde{C} & \tilde{D} \end{pmatrix} \right) \quad (21)$$

The matrix K is chosen in such a way that

$$K = \begin{pmatrix} X & M \\ M^T & * \end{pmatrix}, \quad K^{-1} = \begin{pmatrix} Y & N \\ N^T & * \end{pmatrix} \quad (22)$$

that the matrices X and Y are symmetric and in the same dimension as the matrix A which are satisfied $MN^T = I - XY$.

$$\mathcal{Y} = \begin{pmatrix} Y & I \\ N^T & 0 \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$\mathcal{Y}^T K \mathcal{Y} = \begin{pmatrix} Y & I \\ I & X \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$\mathcal{Y}^T (K \mathcal{A}) \mathcal{Y} := \begin{pmatrix} AY + B_2 \tilde{C} & A + B_2 \tilde{D} C_2 \\ \tilde{A} & XA + \tilde{B} C_2 \end{pmatrix} \quad (25)$$

$$\mathcal{Y}^T (K \mathcal{B}) := \begin{pmatrix} B_1 + B_2 \tilde{D} D_{21} \\ XB_1 + \tilde{B} D_{21} \end{pmatrix} \quad (26)$$

$$\mathcal{Y}^T \mathcal{C} := (C_1 Y + D_{12} \tilde{C} \quad C_1 + D_{12} \tilde{D} C_2) \quad (27)$$

Choosing the abovementioned transformations, the LMI of the ROF controller is obtained as follows:

$$\begin{pmatrix} X & I_n \\ I_n & Y \end{pmatrix} > 0, \quad (28)$$

$$\begin{pmatrix} AX + XA^T + B_2\tilde{C} + \tilde{C}^T B_2^T & * & * & * \\ \tilde{A} + A^T + C_2^T \tilde{D}^T B_2^T & YA + A^T Y + \tilde{B}C_2 + C_2^T \tilde{B}^T & * & * \\ B_1^T + D_{21}^T \tilde{D}^T B_2^T & B_1^T Y + D_{21}^T \tilde{B}^T & -\gamma_\infty I_{n_u} & * \\ C_1 X + D_{12} \tilde{C} & C_1 + D_{12} \tilde{D} C_2 & D_{11} + D_{12} \tilde{D} D_{21} & -\gamma_\infty I_{n_y} \end{pmatrix} < 0$$

The unknown parameters $\tilde{D}, \tilde{C}, \tilde{B}, \tilde{A}, Y, X$ obtain from solving the above LMIs. Finally, the controller parameters are given by using the following (Gahinet et al. (1994)):

$$\begin{cases} \tilde{D} = D_c \\ \tilde{C} = D_c C_2 X + C_c M^T \\ \tilde{B} = Y B_2 D_c + N B_c \\ \tilde{A} = Y A X + Y B_2 D_c C_2 X + N B_c C_2 X + Y B_2 C_c M^T + N A_c M^T \end{cases} \quad (29)$$

where M and N are square and nonsingular matrices with $MN^T = I - XY$. From Eq. (29) the controller matrices are obtained as below:

$$\begin{cases} D_c = \tilde{D} \\ C_c = (\tilde{C} - D_c C_2 X) * (M^T)^{-1} \\ B_c = (N)^{-1} * (\tilde{B} - Y B_2 D_c) \\ A_c = (N)^{-1} * (\tilde{A} - Y A X - Y B_2 D_c C_2 X - N B_c C_2 X - Y B_2 C_c M^T) * (M^T)^{-1} \end{cases} \quad (30)$$

4. PI+Feedforward Controller Design

Proportional-Integral controllers are one of the most employed controllers in a wide range of industrial processes due to their relative simplicity and low cost of implementation. The great success of these controllers is due to the implementation of their additional functionalities such as feedforward action (Veronesi and Visioli (2013)). Although the PI controller minimizes small changes and oscillations of the output from its operating point, the feedforward control can promote the disturbance rejection performance of the controller and reference tracking of the system. The block diagram of the PI+ feedforward controller is demonstrated in Fig. 4. Because the plant doesn't involve an integrator, the parameters of the controller are adjusted from the first method of the Ziegler-Nicoles methodology as follows (Åström and Hägglund (2004), Ziegler and Nichols (1942))

$$C_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (31)$$

$$K_p = 0.45 K_{cr}, \quad T_i = \frac{1}{1.2} P_{cr}$$

which K_{cr} and P_{cr} represent the critical gain and period, respectively.

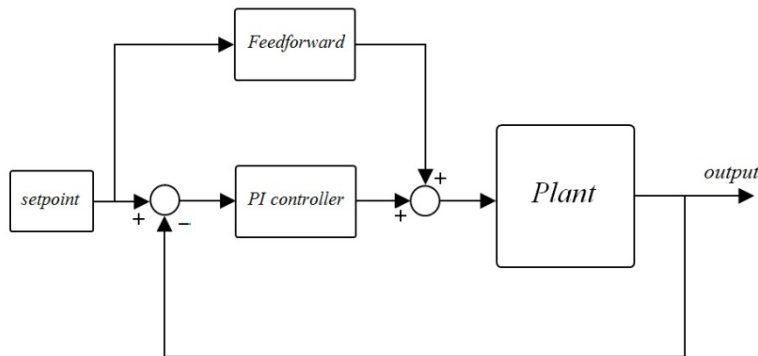


Figure 4. Block diagram of closed-loop PI Feedforward system

5. Experimental Results

After designing the ROF controller in the previous section, the simulation and experimental results of the closed-loop coupled tank system with two configurations 1 and 2 are expressed in this section. The performance of the designed controller is tested on the real coupled tank system setup. Fig. 5 shows this setup of the Quanser coupled tank system. The results are compared with the PI+feedforward controller to demonstrate the effectiveness and superiority of the ROF H_∞ controller methodology and improvements

to the design objectives. To have a good view of the performance comparison of these controllers, the Mean Absolute Deviation (MAD) methodology is used. In this mathematical method, the difference between the reference signal and the experimental data is calculated as $y - \hat{y}$ that the reference liquid level of the tank is denoted as y , and \hat{y} is the experimental tracking level. This residual can be positive or negative as the tracking level moves above or under the reference level signal. So, averaging the absolute value of the error ($y - \hat{y}$) calculates the MAD as the below equation:

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \tag{32}$$

which n is the sample number.



Figure 5. Quanser Coupled tank system setup

5.1. Configuration #1

According to the augmented plant model of the system mentioned in the third section, to satisfy the design frequency response requirements in reference tracking and noise rejection some weights need to be added to the exogenous inputs and controlled outputs. These weights are introduced as follows:

$$\begin{aligned} W_n &= 0.001 \\ W_{error} &= \frac{s + 3.1}{s^2 + 26s + 85} \\ W_u &= 0.0001 \end{aligned}$$

which the W_n represents the weight on the noise input and W_{error} is chosen as the weight on the closed-loop error wishing for good reference tracking. In configuration 1 choosing the first order of the W_n increases the order of the designed controller, so it is chosen as a constant gain that reduces the possible effect of the noise on the system's sensor. The W_u has to be chosen as a small constant near zero to dispel the singularity in the controller at high frequencies, and W_{error} is chosen based on the frequency characteristics of the desired level tracking signal. Interested readers in choosing the weights on the control objectives are referred to for more details (Skogestad and Postlethwaite (2007); Zhou et al. (1996)). Fig. 6a and Fig. 6b illustrate the comparison of the simulation and experimental results of the ROF H_∞ vs. PI+feedforward. In this configuration, the reference level is set to 10 cm adding different sinusoidal and square signals to show the efficiency of the ROF approach. The parameters of the coupled-tank system are introduced in Table 1.

Table 1. Parameter Values of the Coupled-tank System

Description	Symbol	Value	Units
Cross sections area of Tanks	$A_1 = A_2$	15.5179	cm^2
Outflow orifices areas of Tanks	$a_1 = a_2$	0.1781	cm^2
Pump volumetric constant	K_m	4.6	$(cm^3/sec)/V$

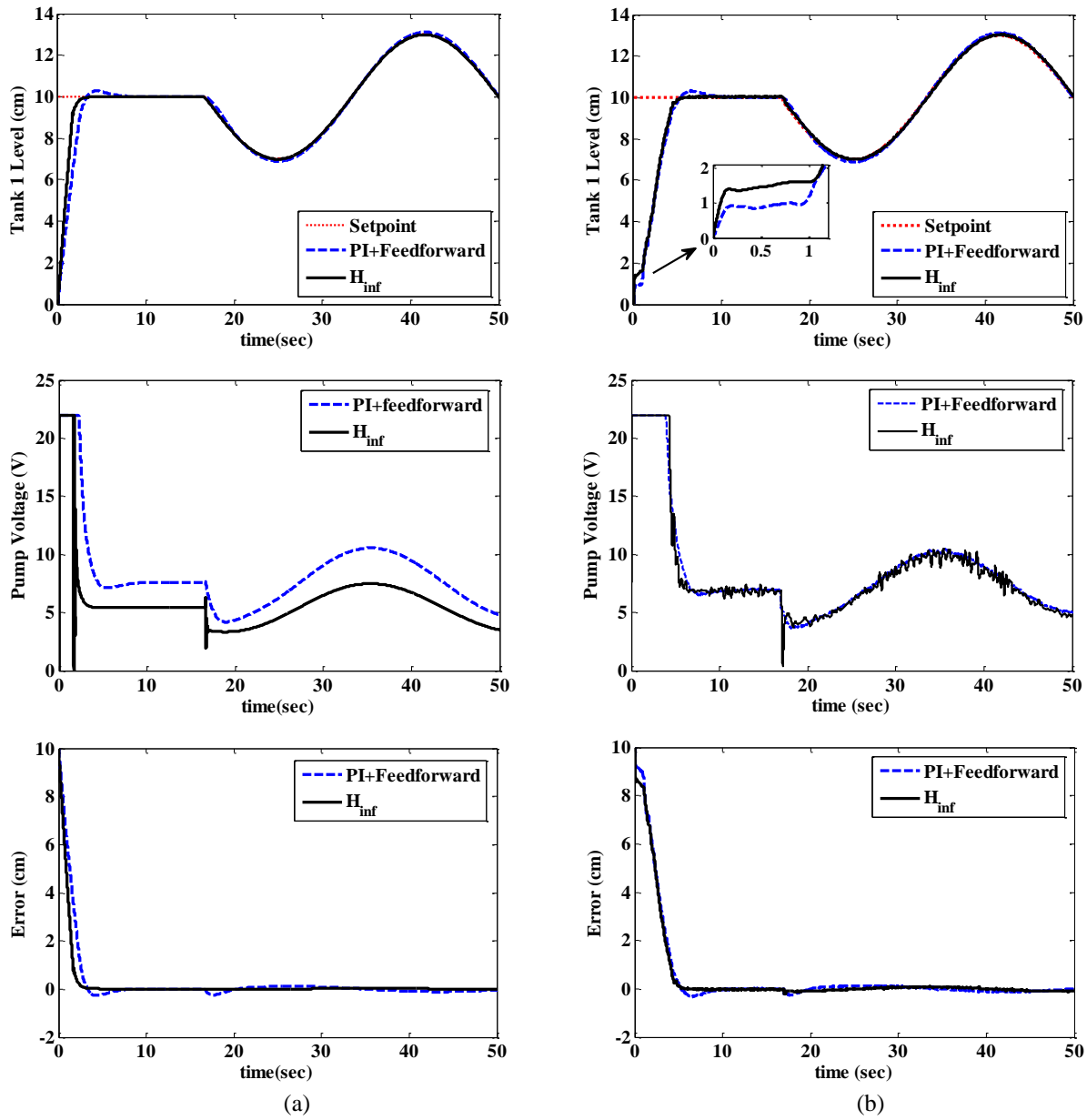


Figure 6. Comparison of ROF H_{∞} and PI feedforward controllers on configuration 1; constant with sinusoidal reference: a) simulation results; b) experimental results.

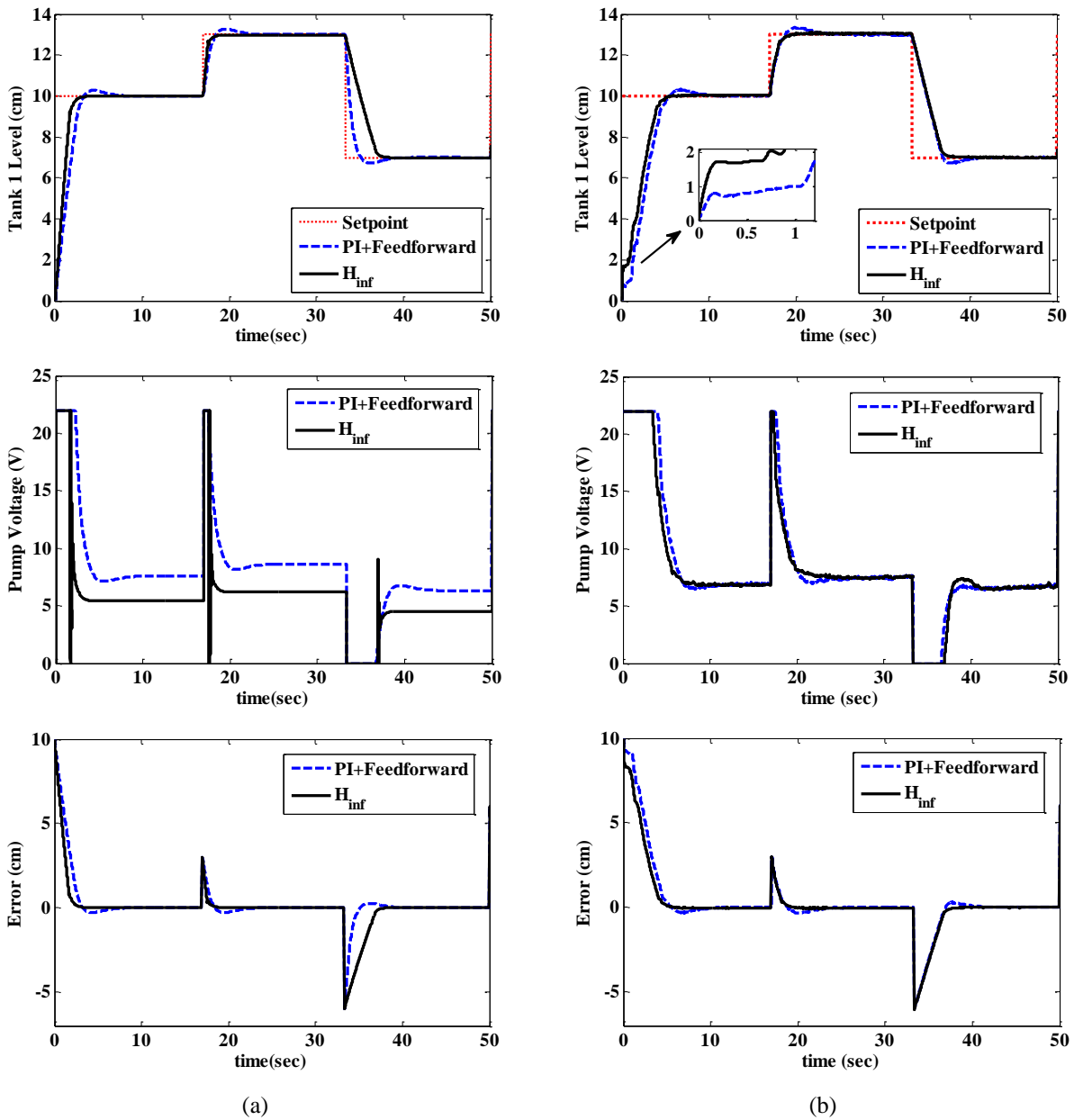


Figure 7. Comparison of ROF H_∞ and PI feedforward controllers on configuration #1; constant with square setpoint: a) simulation results; b) experimental results.

According to Fig. 6 and Fig. 7, the ROF H_∞ controller has a considerable performance improvement in the reference setpoint track versus the PI feedforward. The MAD values of the two controllers are shown in Tables 2 and 3 to mathematically evaluate these controllers' performance.

Table 2. Mean Absolute Deviation values on Sinusoidal Reference Setpoint

Controller	Constant part	Sinusoidal part	Total MAD
PI+ feedforward	1.4637	0.0834	0.5528
ROF H_∞	1.2661	0.0589	0.4694

Table 3. Mean Absolute Deviation values on Square Reference Setpoint

Controller	Constant part	Square part	Total MAD
PI+ feedforward	1.5413	0.4310	0.8085
ROF H_∞	1.2025	0.4127	0.6813

According to tables 2 and 3, the ROF H_∞ controller versus the PI+ feedforward has considerable improvement in setpoint tracking of the sinusoidal and square inputs about 15% and 15.7%, respectively.

5.2. Configuration #2

In this scenario, the main goal is to set the liquid level of the second tank at the setpoint level besides the satisfaction of the system’s robustness in the existence of the output noises and disturbance. Similar to the previous section, according to the design objectives similar to the previous design, some weights are added to the system. These weights are described below:

$$W_n = \frac{7}{s + 0.31}$$

$$W_{error} = \frac{100}{s + 85}$$

$$W_u = 0.0001$$

Considering the previous section descriptions, these weights are chosen based on the augmented system’s frequency needs and the system’s sensitivity function and need some trial and error methods. After solving the related LMIs of ROF H_∞ controller synthesis, the obtained controller has a high order of four. This controller adds extra states to the system which causes difficulties such as low response time. Hence, using the order reduction function in MATLAB the order of the controller is reduced to two by eliminating unnecessary Hankel singular values. This order reduction and the related frequency responses of the controller transfer function and its reduced order are shown in Fig. 8.

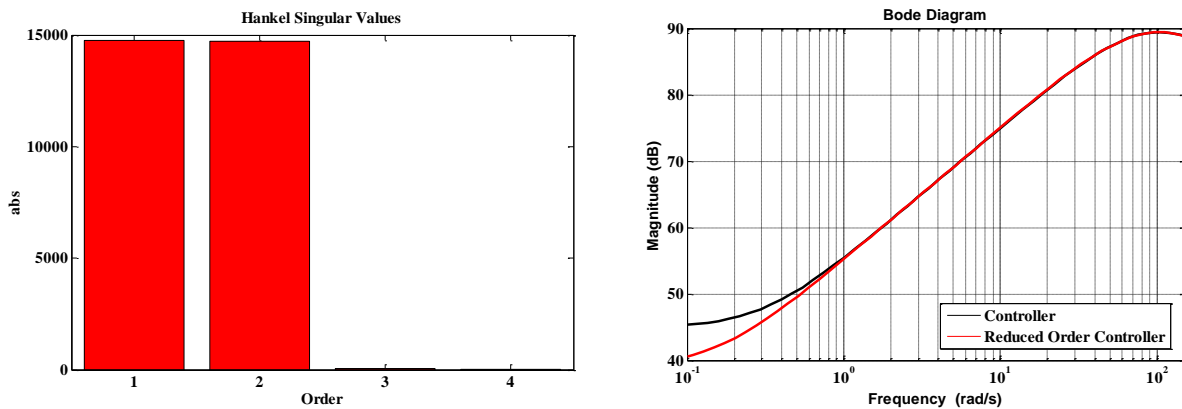


Figure 8. ROF H_∞ Controller Order Reduction (Hankel Singular Values)

Fig. 9 contains the results comparison of the nonlinear system using two controllers. As shown in Fig. 9, the proposed ROF controller has perfect setpoint tracking in tank 2 and its performance improvement against the PI+feedforward controller is about a total of 27.8%. The mathematical comparison of two controllers using the mean absolute deviation of tracking errors is obtained in table 4.

Table 4. Mean Absolute Deviation values on Sinusoidal Reference Setpoint

Controller	Constant part	Sinusoidal part	Total MAD
PI+ feedforward	2.3516	0.3430	0.8452
ROF H_∞	2.1300	0.1039	0.6104

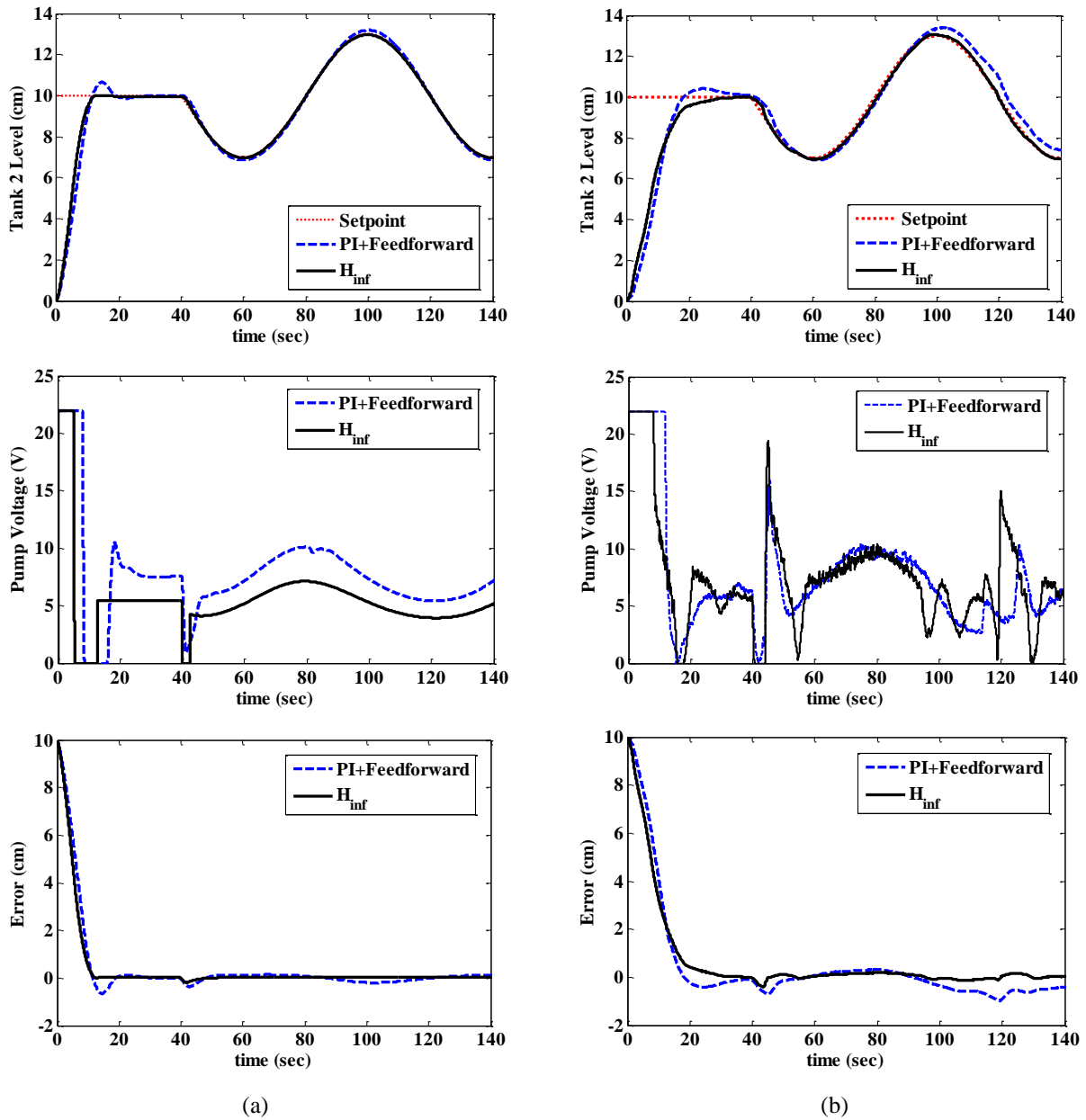


Figure 9. Comparison of ROF H_∞ and PI+feedforward controllers on configuration 2; constant with sinusoidal setpoint: a) simulation results; b) experimental results.

6. Conclusion

In this experimental study, a ROF H_∞ -based controller is proposed to use in the control of the liquid level in a vertical coupled tank system as a case study system in the simulation of large-scale process controls. The verification of the designed controller is done in a procedure consisting of two configuration scenarios named configuration #1 and #2, in which the main goal is the setpoint level tracking in tanks 1 and 2, respectively, besides satisfying the design objectives, as the robustness of the system by reducing the effects of the disturbance and sensor noises besides the good setpoint tracking and a tradeoff between structural constraints. The synthesis of the proposed approach is done using LMIs to handle the existence of the estimated singularities in the system and adjust the design objectives simultaneously. Whereas in the second tank control the designed controller has a high order, the order reduction methodology is used to decrease the order of the controller with retaining the frequency characteristics of the main one. The good performance of the proposed robust controller is shown in simulation results in comparison to the PI+feedforward controller and verified with experimental results using both controllers. Attained results demonstrate the perfect improvements in the performance of the closed-loop system by about 15% in level control of tank 1 and 28% in reference tracking in tank 2.

Designing a mixed robust controller and comparison to the last designs for the coupled tank system and improvement of the system performance is the future scope of the authors.

References

- Aksu, I. O., & Coban, R. (2019). Sliding mode PI control with backstepping approach for MIMO nonlinear cross-coupled tank systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 29(6), 1854-1871.
- Arun, N. K., & Mohan, B. M. (2017). Modeling, stability analysis, and computational aspects of some simplest nonlinear fuzzy two-term controllers derived via center of area/gravity defuzzification. *ISA transactions*, 70, 16-29.
- Åström, K. J., & Hägglund, T. (2004). Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control. *Journal of process control*, 14(6), 635-650.
- Ayten, K. K., & Dumlu, A. (2021). Implementation of a PID Type Sliding-Mode Controller Design Based on Fractional Order Calculus for Industrial Process System. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 27(6), 4-10.
- Başçi, A., & Derdiyok, A. (2016). Implementation of an adaptive fuzzy compensator for coupled tank liquid level control system. *Measurement*, 91, 12-18.
- Başçi, A., Sekban, H. T. & Can, K. (2016). Real-Time Application of Sliding Mode Controller for Coupled Tank Liquid Level System. *International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*, Special Issue (2016), 301-306.
- Derdiyok, A., Başçi, A. (2013). The application of chattering-free sliding mode controller in coupled tank liquid-level control system. *Korean J. Chem. Eng.* 30, 540–545.
- Dutta, S., Seal, S., & Sengupta, A. (2014, September). Real-time linear quadratic versus sliding mode liquid level control of a coupled tank system. In *2014 International Conference on Devices, Circuits, and Communications (ICDCCom)* (pp. 1-6). IEEE.
- Engules, D., Hot, M., & Alikoc, B. (2015, June). Level control of a coupled-tank system via eigenvalue assignment and LQG control. In *2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)* (pp. 1198-1203). IEEE.
- Esmaeili, J. S., & Başçi, A. (2019, July). LMI-based H_2 Control of Vertical Nonlinear Coupled-tank System. In *2019 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD)* (pp. 1-7). IEEE.
- Esmaeili, J. S., Akbari, A., & Karimi, H. R. (2015). Load-dependent LPV/ H_2 output-feedback control of semi-active suspension systems equipped with MR damper. *International Journal of Vehicle Design*, 68(1-3), 119-140.
- Fu, Y., Chen, W., & Fu, J. (2021). A New Optimal Tracking Controller of Linear Strongly Coupled Systems and Its Applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 69(3), 1387-1391.
- Gahinet, P., Nemirovskii, A., Laub, A. J., & Chilali, M. (1994, December). The LMI control toolbox. In *Proceedings of 1994 33rd IEEE Conference on Decision and Control* (Vol. 3, pp. 2038-2041). IEEE.
- Jaafar, H. I., Hussien, S. Y. S., Selamat, N. A., Aras, M. S. M., & Rashid, M. Z. A. (2014). Development of PID controller for controlling the desired level of coupled tank system. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 3(9), 32-36.
- Khalil, I. S., Doyle, J. C., & Glover, K. (1996). *Robust and optimal control*. Prentice-Hall.
- Mahapatro, S. R., Subudhi, B., & Ghosh, S. (2019). Design and experimental realization of a robust decentralized PI controller for a coupled tank system. *ISA transactions*, 89, 158-168.
- Nail, B., Bekhiti, B., Bdirina, K., Kouzou, A., & Hafaiifa, A. (2015, May). Sliding mode control and optimal GPC algorithm for coupled tanks. In *2015 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT)* (pp. 1-6). IEEE.
- Owa, K. O., Sharma, S. K., & Sutton, R. (2013). Optimized multivariable nonlinear predictive control for coupled tank applications.
- Prusty, S. B., Seshagiri, S., Pati, U. C., & Mahapatra, K. K. (2016, January). Sliding mode control of coupled tanks using conditional integrators. In *2016 Indian Control Conference (ICC)* (pp. 146-151). IEEE.

Quanser manufacturer, <https://www.quanser.com>

Saad, M., Albagul, A., & Abueejela, Y. (2014). Performance comparison between PI and MRAC for coupled-tank system. *Journal of Automation and Control Engineering Vol, 2*(3).

Scherer, C., & Weiland, S. (2000). Linear matrix inequalities in control. *Lecture Notes, Dutch Institute for Systems and Control, Delft, The Netherlands, 3*(2).

Sekban, H. T., Can, K., Basci, A. (2020). Model-based Dynamic Fractional-order Sliding Mode Controller Design for Performance Analysis and Control of a Coupled Tank Liquid-level System, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol.20, no.3, pp.93-100.

Selamat, N. A., Daud, F. S., Jaafar, H. I., & Shamsudin, N. H. (2015, March). Comparison of LQR and PID controller tuning using PSO for Coupled Tank System. In *2015 IEEE 11th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA)* (pp. 46-51). IEEE.

Skogestad, S., & Postlethwaite, I. (2007). *Multivariable feedback control: analysis and design* (Vol. 2). New York: Wiley.

Souran, D. M., Abbasi, S. H., & Shabaninia, F. (2013). Comparative study between tank's water level control using PID and fuzzy logic controller. In *Soft computing applications* (pp. 141-153). Springer, Berlin, Heidelberg.

Teng, T. K., Shieh, J. S., & Chen, C. S. (2003). Genetic algorithms applied in online autotuning PID parameters of a liquid-level control system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control, 25*(5), 433-450.

Veronesi, M., & Visioli, A. (2013, July). Automatic feedforward tuning for PID control loops. In *2013 European Control Conference (ECC)* (pp. 3919-3924). IEEE.

Xu, T., Yu, H., Yu, J., & Meng, X. (2020). Adaptive disturbance attenuation control of two tank liquid level system with uncertain parameters based on port-controlled Hamiltonian. *IEEE Access, 8*, 47384-47392.

Yılmaz, M., Can, K. & Başçi, A. (2021). PI+Feed Forward Controller Tuning Based on Genetic Algorithm for Liquid Level Control of Coupled-Tank System. *Journal of the Institute of Science and Technology, 11* (2), 1014-1026.

Ziegler, J. G., & Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *trans. ASME, 64*(11).



Etilen Oksit Sterilizasyonunun PEEK Bazlı Dental İmplantın Kimyasal Yapısı Üzerine Etkisi

Effect Of Ethylene Oxide Sterilization On The Chemical Structure Of PEEK-Based Dental Implant

Ogün Bozkaya¹

¹ Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi, Fen ve Mühendislik Laboratuvarları, 71450 Yahşihan, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 25/07/2022

Kabul / Accepted: 26/09/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Polietereterketon (PEEK), kemik ve kıkırdak replasmanı için uygun mekanik özelliklere sahip biyoyumlu bir polimerdir. Bu nedenle titanyum bazlı metallere alternatif olarak tıpta ve diş hekimliğinde birçok potansiyel kullanıma sahiptir. Tıbbi cihaz yönetmeliğine göre implante edilebilir cihazlar yüksek risk sınıfında olması nedeniyle yıkama, dezenfeksiyon ve sterilizasyon süreçlerinden geçirilirler. Etilen oksit (EtO) sterilizasyonu özellikle PEEK bazlı polimerik implantların sterilizasyonu için kullanılan en yaygın ve etkili yöntemlerden biridir. Bununla birlikte, değişken sterilizasyon koşulları, polimerik malzemenin kimyasal yapısında, mekanik özelliklerini ve ömrünü etkileyen birtakım değişikliklere neden olabilir. Bu çalışmanın amacı, belirli koşullar altında EtO ile sterilize edilen PEEK bazlı dental implantların kimyasal yapısının değişip değişmediğini araştırmaktır. Kimyasal karakterizasyon çalışmaları ISO 10993-18:2020 standardında polimerik malzemeler için önerilen fourier transform kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), termogravimetrik analiz (TGA), CHNS elementel analiz, gaz kromatografi-kütle spektrometrisi (GC-MS) ve X-ışınları difraktometresi (XRD) teknikleri kullanılarak yürütülmüştür. Karakterizasyon sonuçları, etilen oksit sterilizasyonundan sonra PEEK materyalin moleküler yapısında, kristalinitesinde ve elementel bileşiminde önemli bir değişiklik olmadığını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler

“PEEK, dental implant, medikal cihaz, etilen oksit, sterilizasyon, ISO 10993-18”

Abstract

Polyetheretherketone (PEEK) is a biocompatible polymer with suitable mechanical properties for bone and cartilage replacement. Therefore, it has many potential uses in medicine and dentistry as an alternative to titanium-based metals. According to the medical device regulation, implantable devices are subjected to washing, disinfection and sterilization processes because they are in a high risk class. Ethylene oxide (EtO) sterilization is one of the most common and effective methods used especially for the sterilization of PEEK-based polymeric implants. However, variable sterilization conditions can cause a number of changes in the chemical structure of the polymeric material, affecting its mechanical properties and lifetime. The aim of this study is to investigate whether the chemical structure of PEEK-based dental implants sterilized with EtO under certain conditions changes. Chemical characterization studies were carried out using fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetric analysis (TGA), CHNS elemental analysis, gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and X-ray diffraction (XRD) techniques recommended for polymeric materials in the ISO 10993-18:2020 standard. The characterization results revealed that there was no significant change in the molecular structure, crystallinity and elemental composition of the PEEK material after ethylene oxide sterilization.

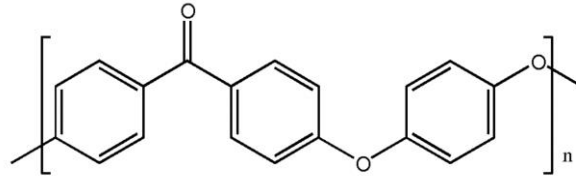
Key Words

“PEEK, dental implant, medical device, ethylene oxide, sterilization, ISO 10993-18”

1. Giriş

Her yıl milyonlarca hastaya, yaşam kalitelerini iyileştirmek ve/veya biyolojik yapının tamamını veya bir kısmını değiştirmek veya onun bir parçası gibi davranmak için tıbbi cihazlar implante edilmektedir. İmplant edilebilir tıbbi cihazlar, sağlık alanındaki potansiyel uygulamaları nedeniyle önemli araştırma ve geliştirme alanlarından biri olmaya devam etmektedir. Günümüzde biyoimplantlar, ortopedi (kalça veya diz), dişçilik, kardiyovasküler stentler, nöral protezler, kalp pilleri, defibrilatörler ve ilaç taşıma sistemi gibi çeşitli uygulamalar için vücudun farklı bölgelerinde kullanılmaktadır (Park & Webster, 2005). İmplant edilebilir cihazlar; metal alaşımları, seramikler ve polimerler gibi çeşitli malzeme sınıflarını kapsayan biyoyumlu malzemelerdir (Kulkarni et al., 2022; Yin & Luan, 2016). Polimerik biyomalzemeler, post-operatif MRI (magnetic resonance imaging) uyumluluğu, mekanik, kimyasal, biyokararlı ve biyoyumlu özellikleri nedeniyle ortopedik uygulamalarda metal alaşımlarının yerine veya tamamlayıcısı olarak kullanılmaktadır (Yin & Luan, 2016). Bu nedenle FDA (Food and Drug Administration) tarafından onaylanmış polimerik implantlar klinik pratikte on yıllardır kullanılmaktadır. Polietilen tereftalat (PET), polipropilen (PP), poliamit (PA), polivinil klorür (PVC), polistiren (PS), polikarbonat (PC), poliüretan (PU), akrilonitril bütadien stiren (ABS), polietilen (PE) ve polietereterketon (PEEK); cerrahi sütürler, vasküler greftler, spinal kafesler, stentler, fitik ağları, yapay diz ve kalça eklemleri gibi birçok tıbbi cihazın üretiminde kullanılan biyokararlı (emilemeyen) polimerlerdir (Abruzzo et al., 2014; Dhandayuthapani et al., 2011; Kurtz, 2009; Kurtz & Devine, 2007). Bu polimerler arasında PEEK polimeri, biyoyumluluğu, sağlam mekanik özellikleri ve uyarlı birliktirliği nedeniyle kemik dokusu gereksinimlerini karşılamak için oldukça uygun biyomalzeme haline gelmiştir (Kurtz & Devine, 2007; Puppi et al., 2010).

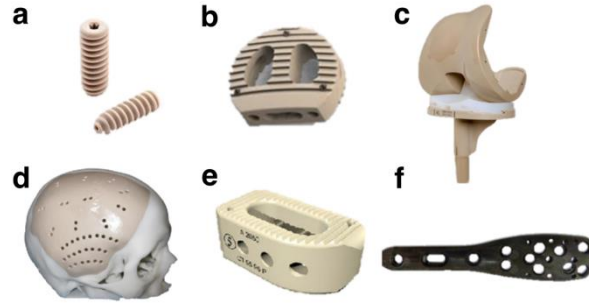
Poliarileterketon (PAEK) polimerleri, eter veya keton bağlarıyla birleştirilen aromatik halkalardan oluşur ve bu fonksiyonel grupların sayısını ve sırasını yansıtan kısaltmalarla (PEEK, PEK, PEKK, PEKEKK vb.) ifade edilir. PAEK ailesinin bir üyesi olan PEEK, aril halkaları arasında keton ve eter fonksiyonel gruplarının kombinasyonlarından oluşan aromatik bir moleküler yapıya sahiptir. PEEK polimerinin kimyasal formülü Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. PEEK Polimerinin Tekrarlanan Biriminin Yapısı.

PEEK amorf bölgelerde dağılmış kristalli bölgelerden oluşan iki fazlı bir morfolojiye sahip yarı kristalin bir termoplastiktir (Atkinson et al., 2002). PEEK polimeri rezonans özelliğinden dolayı kararlı kimyasal yapıya sahiptir, bu da onu kimyasal, termal ve ısınlama sonrası (gama ve elektron ışını vb.) bozulmaya karşı dirençli hale getirir. PEEK'in sülfürik asit, hidroflorik asit, polifosforik asit ve dikloroasetik asit gibi konsantrasyonlu asitlerin yanı sıra benzofenon, 4-klorofenol, difenil sülfon ve α -kloronaftalen gibi birkaç çözücüde çözüldüğü bildirilmiştir (Godara et al., 2007; Li et al., 1999; Talley et al., 2017; Xu et al., 1992).

PEEK polimerinin *in vivo* ve *in vitro* çalışmalarla biyoyumlu olduğu, toksik veya mutajenik etkilere neden olmadığı kanıtlanmıştır (Ortega-Martínez et al., 2017). Mekanik özellikleri açısından insan kortikal kemiğine benzer bir elastik modüle sahip (3-4 GPa) olduğundan destek dokularına daha homojen bir stres dağılımı potansiyeli olduğu düşünülmektedir (Sarot et al., 2010). Ayrıca yapısına karbon fiberler, cam fiberler, hidroksiapatit gibi diğer materyallerin eklenmesiyle elastik modülü 18 GPa'a kadar artırılabilmiştir (Najeeb et al., 2016; Ortega-Martínez et al., 2017). Bütün bu özellikleri nedeniyle PEEK; maksillo-fasiyal kafatası implantları, spinal cerrahi, ortopedik cerrahi (kemik ve kalça eklemi implantları, ortopedik sabitleyici plak ve vidalar), kalp cerrahisi, diş hekimliği (karbon fiberle güçlendirilmiş (CFR-PEEK) dental implantlar, protezler ve kanal içi postlar) alanlarında metalik implantların ikamesi olarak kullanılan önemli bir materyal haline gelmiştir (Şekil 2) (Özden & Demir, 2020). PEEK, mekanik ve biyoyumlu özelliklerinin yanı sıra doğal diş renginde bir görünüme çok yakın olması nedeniyle diş hekimliğinde de geniş kullanım alanına sahiptir. Örneğin implantlarda, geçici abutmentlerde, implant destekli barlarda, çıkarılabilir diş protezlerinde ve ortodontik metalik tellere alternatif olarak kullanılmaktadır (Maekawa et al., 2015).



Şekil 2. PEEK Polimerinden Üretilen Bazı Medikal İmplantlar: (A) Dental İmplant; (B) Servikal Kafes; (C) Total Diz Protezi; (D) Maksillofasiyal Kafatası İmplantı; (E) Lumbar İnterbody Füzyon Kafes; (F) Karbon Fiber Güçlendirilmiş Proksimal Humerus Plakası.

Tıbbi cihazlar, kullanımlarındaki enfeksiyon risk derecesine göre kritik, yarı kritik ve kritik olmayan olarak sınıflandırılabilir. Hastanın vücudunun steril kısmına yerleştirilen implantlar enfeksiyon riski yüksek kritik cihazlardır. Bu nedenle cerrahi operasyon öncesinde implantın bakteri, virüs, mantar, maya ve küf gibi tüm enfeksiyon yapan mikroorganizmaları yok edecek şekilde sterilize edilmesi son derece önemlidir (Govindaraj & Muthuraman, 2015). Tıbbi cihazları sterilize etmek için kullanılan birçok teknik vardır. Otoklavlama, kuru ısı, ozon gazı, hidrojen peroksit buharı, düşük sıcaklıklı gaz plazma, glutaraldehit solüsyonu, perasetik asit, formaldehit, mikrodalga, gama ışınları, ultraviyole ışık ve EtO ile sterilizasyon bunlardan bazılarıdır. Bu teknikler arasında polimerik malzemeler için ve özellikle de PEEK için en çok kullanılan sterilizasyon tekniği EtO'dur (Govindaraj & Muthuraman, 2015; Rutala & Weber, 1999; Tipnis & Burgess, 2018)

EtO; etkili bakterisidal, sporisidal ve virüsidal aktivitesi nedeniyle tıbbi cihazların sterilizasyonunda sıklıkla kullanılan olağanüstü bir ajandır (Ries et al., 1996). EtO'nun antimikrobiyal etkisi, kimyasal etkileşimler yoluyla mikroorganizmada hücre duvarı, protein, DNA ve RNA hasarına neden olarak normal hücresel metabolizma ve replikasyonu inhibe etmesinden kaynaklanmaktadır (Mendes et al., 2007). Sterilizasyonun etkinliği EtO konsantrasyonuna, sıcaklığa, neme, ambalaj malzemesine, gaz ve maruz kalma süresine bağlıdır (Mosley et al., 2002).

Sterilizasyon yöntemleri ve koşulları polimerik implantın fiziko-kimyasal ve mekanik özelliklerini değiştirerek vücuttaki performansını olumsuz yönde etkileyebilir (Düzyer et al.; Heider et al., 2002). Özellikle buhar ve gama sterilizasyon işlemleri sonrasında polimer tarafından emilebilen nem miktarının değiştiği bilinmektedir (Godara et al., 2007). Emilen nem miktarının artmasıyla polimerde yapısal bozunmalara yol açan hacimsel değişimler gözlenir. Bu değişimlerin, malzemenin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini farklı ölçeklerde güçlü bir şekilde değiştirebildiği rapor edilmiştir (Mensitieri et al., 1989; Zheng & Morgan, 1993). Farrar ve Gilson (2002), sterilizasyon koşullarına bağlı olarak moleküler ağırlığın azalması nedeniyle polimerin mukavemetinin azaldığını bildirmiştir (Farrar & Gillson, 2002). Polimerin molekül ağırlığının değişmesi ile emilimini, ömrünü ve mekanik özelliklerini etkileyen, mikro yapısındaki zincir segment hareketliliği bozulur (Mendes et al., 2007; Saeidlou et al., 2012). Sasuga ve ark. (1989) düşük enerjili gama ışınlarının farklı sıcaklıklarda PEEK kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar düşük sıcaklıklarda gama ışınlarıyla muammele ettikleri PEEK polimerin mekanik özelliklerinin iyileştiğini ve sıcaklık artışına bağlı olarak çapraz bağlanma miktarının ve Tg değerinin arttığını rapor etmişlerdir (Sasuga et al., 1989). Godara ve ark. (2006) buhar ve gama radyasyonu sterilizasyon yöntemlerinin PEEK bazlı kemik implantının mikromekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar ne buhar ne de gama radyasyonu sterilizasyonunun, yığın polimer matrisindeki azaltılmış elastik modül, sertlik veya sürtünme katsayısında önemli değişikliklerin olmadığını belirtmişlerdir. Ancak PEEK matrisinde interfaz bölgesinde küçük malzeme değişiklikleri gözlemlenmişlerdir. Araştırma bulguları buhar ile sterilizasyon yönteminin bu bölgedeki küçük değişiklikler üzerinde daha önemli bir etkisinin olduğunu ve interfaz bölgesinin kalınlığının biraz arttırdığını ortaya koymuştur (Godara et al., 2007).

Tıbbi cihaz belgelendirme kuruluşları, tıbbi cihaz üreticilerinden FDA onaylı bir malzemenin hammadde halini, şekillendirme ve sterilizasyon işlemlerinden geçen nihai ürünle kimyasal olarak karşılaştırmasını talep etmektedir. Bu çalışmada, ticari medikal sınıf PEEK bazlı dental implantın non-steril ve EtO ile steril edilmiş versiyonlarının karşılaştırmalı kimyasal karakterizasyonu ISO 10993-18'e göre yapılmıştır (Tıbbi cihazların biyolojik değerlendirilmesi-Bölüm 18: Tıbbi cihaz malzemelerinin risk altındaki kimyasal karakterizasyonu). Bu çalışmanın amacı, belirli koşullarda etilen oksit ile sterilize edildikten sonra PEEK polimerinden üretilen tıbbi cihazların kimyasal yapısında bir değişiklik olup olmadığını ortaya koymaktır.

2. Materyal ve yöntem

2.1. Materyal

Ticari bir ürün olan PEEK bazlı dental implantlar non-steril ve steril olarak yerel bir tıbbi cihaz firmasından (Ankara, Türkiye) temin edilmiştir.

2.2. Etilen oksit sterilizasyonu

EtO sterilizasyon işlemi ISO 11135 gerekliliklerine göre sterilizasyon merkezinde gerçekleştirilmiştir. Kısaca, PEEK materyaller ayrı bir bölmede %70-90 bağıl nemde 50 ± 5 °C'de 4 saat süreyle ön koşullandırılmıştır. Daha sonra örnekler EtO sterilizasyon odasına yerleştirilmiştir. Sterilizasyon odası içinde 50 ± 5 °C'de 80 dakika ön koşullandırma yapılmıştır (18 çevrim). Daha sonra numuneler, 8 saat boyunca %20 EtO ve %80 CO₂ gaz karışımına maruz bırakılmıştır. Sterilizasyondan sonra kurutma, 40 °C'de vakum altında (1 torr) 50 dakika (40 dk vakum, 10 dk azot gazı şarjı) yapılmıştır. Steril edilmiş PEEK bazlı dental implant Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Eto İle Steril Edilmiş Ambalaj İçerisinde PEEK Dental İplant (Ambaj İçerisine Yapıştırılmış Renk İndikatörü Eto Gazına Maruz Kaldığında Yeşil Renge Dönerek Ambalajın Gazı Geçirdiğini Kanıtlamaktadır).

2.3. Karakterizasyon

2.3.1. FTIR Analizleri

Non-steril ve steril PEEK materyallerin fonksiyonel grup analizi, Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi (Bruker Vertex 70 V, ABD) ile yayıflatılmış toplam yansıma (ATR) ataşmanı kullanılarak ASTM E1252'ye göre yapılmıştır (tarama hızı: 32 cm⁻¹, çözünürlük: 4 cm⁻¹). Materyallerin FTIR spektrumları arasındaki benzerlik yüzdesi FTIR/OPUS yazılımı (4.2 Versiyon, Copyright© Bruker Optics GmHb, ABD) ile belirlenmiştir.

2.3.2. DSC analizleri

Materyallerin erime noktası (T_m) ve camı geçiş sıcaklığı (T_g) gibi termal özellikleri bir diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC, Q 2000, TA Instruments, ABD) ile, azot gazı (N₂) atmosferinde 20 °C/dk ısıtma hızında ve T-zero alüminyum kefe kullanılarak 30-400 °C sıcaklık aralığında analiz edilmiştir. Ayrıca DSC ile polimerlerin toplam kristalinitesi (X_c, %) aşağıdaki eşitlik (Eş. 1) yardımıyla hesaplanmıştır:

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_{100}} \times 100 \quad (1)$$

Eşitlikte ΔH_f füzyon ısısı ve ΔH_{100} ise %100 kristalin polimerin erime (füzyon) entalpisidir. Teorik olarak %100 kristal PEEK polimerinin erime entalpsi 130 J g⁻¹'dir (Díez-Pascual et al., 2009; Savaris et al., 2016).

2.3.3. TGA analizleri

PEEK malzemelerin termal bozunma basamakları bir termogravimetrik analiz cihazı (TGA, Q 500, TA Instruments, ABD) ile N₂ atmosferinde, 20°C/dk ısıtma hızında ve seramik kefe kullanılarak 30-900 °C sıcaklık aralığında analiz edilmiştir.

2.3.4. GC-MS analizleri

PEEK materyallerin gaz kromatografisi-kütle spektrometresi (GC-MS) analizleri, MS üzerinden DI (doğrudan enjeksiyon) yöntemi kullanılarak bir Shimadzu QP 2010 GC-MS sisteminde gerçekleştirilmiştir (tarama parametreleri; m/z tarama aralığı= 20-1090; event time= 0,5 s; tarama hızı=2500 µm/s; iyon kaynağı sıcaklığı= 350 °C; ısıtma hızı= 10 °C/dk).

2.3.5. CHNS/O analizleri

Materyallerin karbon(C), azot (N), hidrojen (H) ve oksijen (O) içerikleri bir CHNS/O element analiz cihazı (vario MICRO cube, Elementar, Almanya) ile belirlenmiştir.

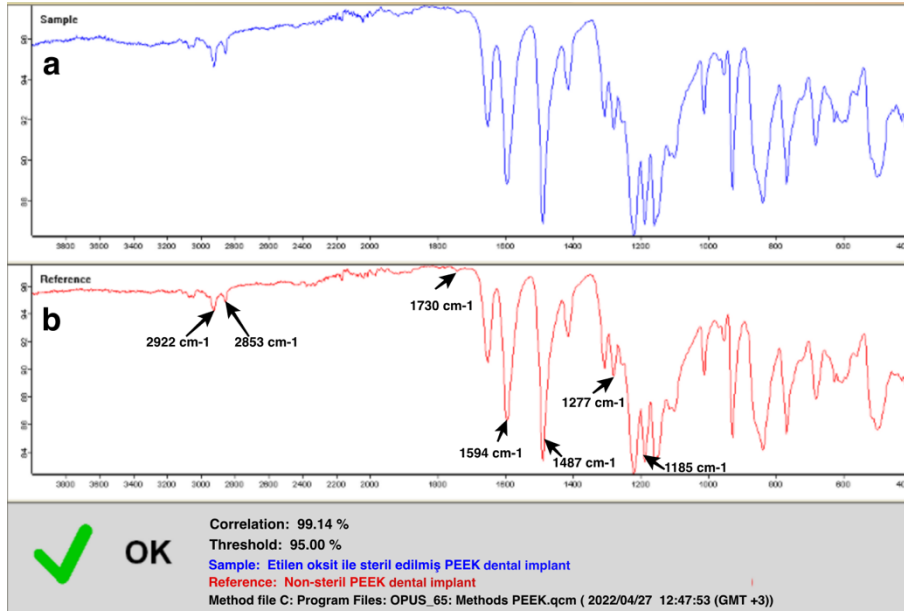
2.3.6. XRD analizleri

Steril ve non-steril PEEK materyallerin faz ve kristalin özellikleri, 40 kV CuK α radyasyonlu ($\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$) bir X-ışını difraktometresi (XRD, Empyrean, Malvern Panalytical) kullanılarak belirli tarama koşullarında ($2\theta = 10\text{-}80^\circ$, adım boyutu = 0.013° , tarama hızı = $2.0^\circ \text{ dk}^{-1}$) analiz edilmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Kimyasal Bağ Analizi

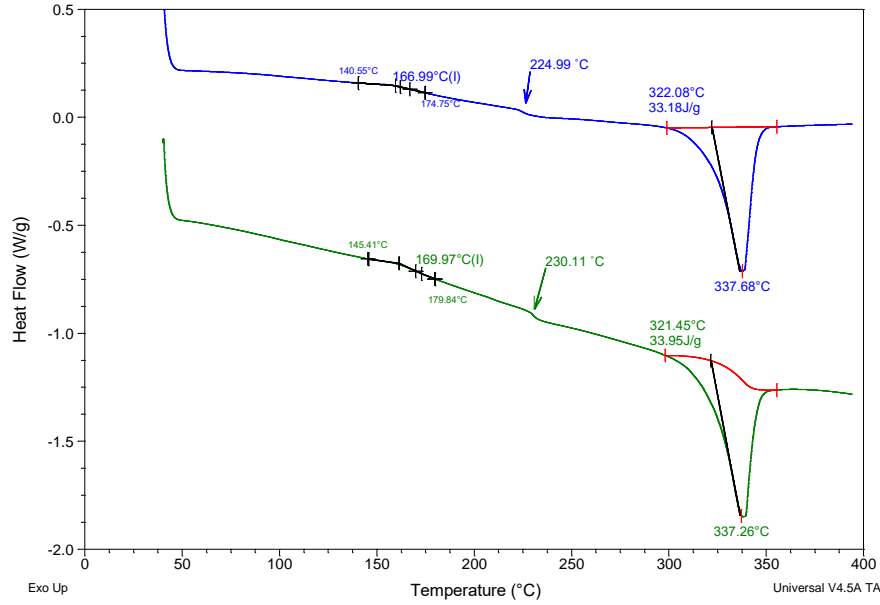
Sterilizasyon işlemi sırasında sıcaklık, nem, maruz kalma süresi gibi koşullara bağlı olarak EtO gazı ile polimerik malzeme arasında kimyasal reaksiyon meydana gelebilir. Bu durum polimerik malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin değişmesine neden olur. FTIR, polimerik malzemelerin kimyasal bağ değişikliklerini belirlemek için önemli bilgiler sağlar (Gün Gök et al., 2020). Non-steril ve steril PEEK dental implantların FT-IR spektrumları Şekil 4'te gösterilmiştir. 2853 cm^{-1} ve 2922 cm^{-1} 'deki pikler alifatik C-H gerilme titreşimlerine aittir. 1594 cm^{-1} ve 1487 cm^{-1} 'deki absorpsiyon bantları, muhtemelen yapıdaki benzene halkalarının varlığını gösterir. 1487 cm^{-1} 'de ortaya çıkan pik aromatik halkaların C-C gerilmesine atfedilmiştir (Díez-Pascual et al., 2009). 1277 cm^{-1} ve 1730 cm^{-1} civarındaki küçük pikler, sırasıyla eter ve keton fonksiyonel gruplarının varlığından kaynaklanmaktadır (Coates, 2000). 1225 cm^{-1} - 950 cm^{-1} aralığındaki pikler C-H düzlem içi bükülme titreşimlerine atfedilebilir (Ahmad et al., 2018). Diaril eter gruplarının C-O-C (eter) gerilme titreşiminin özelliği olan 1185 cm^{-1} 'deki absorpsiyon bandı, absorpsiyon oranının hesaplanmasında dahili bir standart olarak kullanılmıştır (Simonin & Liao, 2000). Steril ve non-steril PEEK dental implantların FTIR spektrumları cihaza ait yazılım (OPUS) ile karşılaştırılmış ve aralarındaki benzerlik %99,14 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç sterilizasyon işleminden sonra PEEK malzemenin kimyasal bağ yapısında kayda değer bir değişim olmadığını açıkça ortaya koymuştur. Ayrıca etilen oksitle sterilize edilmiş PEEK'in oksitlenmesi muhtemeldir. Oksidasyon, 1720 cm^{-1} 'deki (karbonil grupları) değişikliklere bakılarak belirlenebilir (Stojilovic et al., 2017; Wang et al., 2015). 1720 cm^{-1} 'de mevcut piklere ilaveten herhangi bir absorpsiyon pikinin ortaya çıkmaması, malzemenin etilen oksit sterilizasyonundan sonra oksitlenmediğinin güçlü bir kanıtıdır.



Şekil 4. (A) Eto İle Steril Edilmiş PEEK İmplant; (B) Non-Steril PEEK İmplant.

3.2. Termal Özellikler

Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) polimerlerin camsı geçiş sıcaklığı (T_g), erime sıcaklığı (T_m), kristalleşme sıcaklığı (T_c) ve oksidasyon sıcaklığı gibi termal özelliklerinin yanı sıra kimyasal bozunmasının endotermik ya da ekzotermik olduğunu belirlemek için kullanılan en yaygın enstrümantal tekniktir (Bozkaya et al., 2022). DSC, ISO 10993-18' de polimerik materyallerin kimyasal karakterizasyonu için belirtilen teknikler arasında polimer zincirlerinin taktisitesini aydınlatmak amacıyla önerilmektedir. Bu çalışmada non-steril ve steril PEEK materyallerin aynı koşullarda analiz edilmesiyle elde edilen DSC termogramları Şekil 5'te gösterilmiş, termogramlardan elde edilen kalorimetrik veriler ise Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 5. Non-Steril (Mavi) Ve Steril (Yeşil) PEEK Dental İmplantların DSC Termogramları (Oklar Soğuk (Cold) Kristalizasyon Sıcaklıklarını Göstermektedir).

Non-steril ve steril PEEK dental implantların erime sıcaklıkları sırasıyla 337,68 °C ve 337,26 °C, erime (füzyon) entalpileri (ΔH_f) ise 33,18 J g⁻¹ ve 33,95 J g⁻¹ olarak tespit edilmiştir. Füzyon entalpilerinden yararlanarak PEEK dental implantların kristaliniteleri yukarıdaki sırasıyla %25,52 ve %26,11 olarak hesaplanmıştır. Bu kristalinite indeksleri PEEK polimerinin yarı kristalin bir polimer olduğunun kanıtıdır (Savaris et al., 2016). Sterilizasyon işleminden sonra PEEK dental implantın kristalinitesi yaklaşık %0,6 artmıştır. Polimerin artan kristalinitesinin bir sonucu olarak azalan zincir hareketliliği nedeniyle camsı geçiş sıcaklığının daha yüksek bir sıcaklığa kayması beklenir. Sterilizasyon sonrasında PEEK materyalin Tg değerinde yaklaşık 3 °C'lik bir artış gözlenmiştir. Tg değeri polimerin serbest hacminin ya da zincir hareketliliğinin azalmasına bağlı olarak artar. Dolayısıyla Tg sıcaklığındaki 3 °C'lik artış polimerin sterilizasyon aşamasında sabit sıcaklıkta uzun süre bekletilmesi nedeniyle hacimsel gevşemeye uğraması ve moleküler taşıma hareketliliğinin değişmesi ile açıklanabilir (Struik, 1966). Buna ek olarak Liu ve ark. (2014), Tg sıcaklığındaki değişimi neme, basınca ve gaza maruz kalan polimerin amorf bölgelerine nemin ya da etilen oksit gazının difüze olmasına atfetmişlerdir (Liu et al., 2014). Tg sıcaklığının ve/veya kristalinitesinin değişmesi polimerin fiziksel özelliklerini dolayısıyla da biyomekanik özelliklerini etkileyeceğinden hayati önem taşımaktadır. Bu çalışmaya paralel olarak Savaris ve ark. (2016), PEEK materyalini sterilizasyon işleminin her aşamasından sonra DSC ile analiz etmişler ve etilen oksit gazı ile muamele sonrasında kristalinitesinin %1 civarında azaldığını bildirmişlerdir. Ancak araştırmacılara göre bu değişim önemli olmamakla birlikte, bunun sebebinin polimerin üretim aşamasındaki safsızlıklardan ya da katkı maddelerinden kaynaklanabileceğine atfetmişlerdir (Savaris et al., 2016).

Tablo 1. DSC'den Elde Edilen Termal Özellikler Ve Kristallik Dereceleri

Polimer	Tg (°C)	Tm (°C)	ΔH_f (J g ⁻¹)	Xc (%)
Non-steril PEEK	166,99	337,68	33,18	25,52
Steril PEEK	169,97	337,26	33,95	26,11

3.3. Termal kararlılık

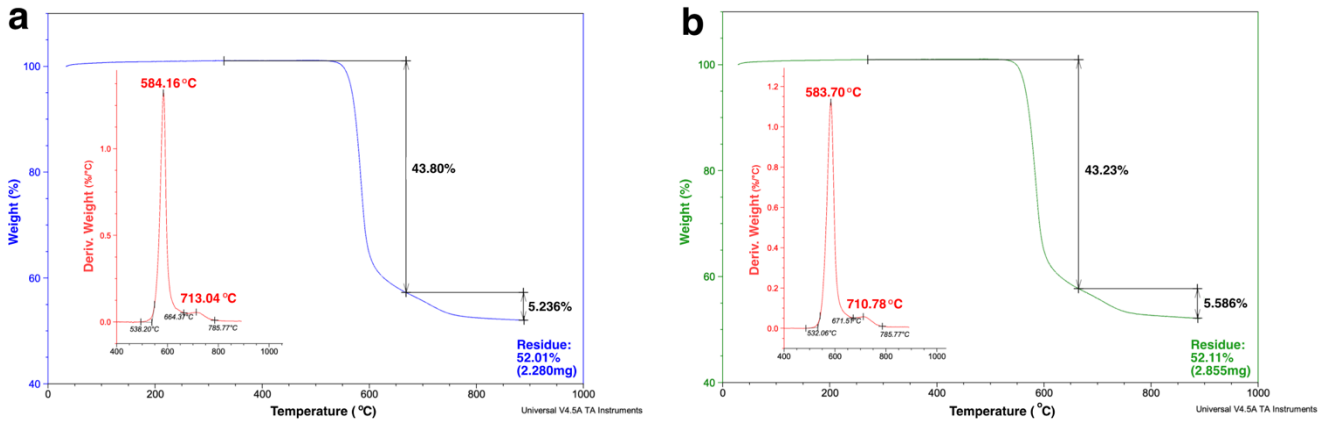
Etilen oksit sterilizasyon işlemi sırasında polimerik malzeme sıcaklık, nem, basınç ve kimyasal gaza maruz bırakılır. Bu nedenle polimerin yapısında termal kararlılığını da etkileyen bazı fiziksel ve kimyasal değişiklikler meydana gelebilir (Inal et al., 2021). TGA, kütle değişimlerinin zamanın ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tespit edildiği bir termal analiz tekniğidir (Bozkaya et al., 2022; Gün Gök et al., 2021). Non-steril ve steril PEEK bazlı dental implantın termal stabilitesi TGA ile analiz edilmiş ve sonuçlara ait TGA/DTG termogramları Şekil 6'da DTG verileri ise Tablo 2'de gösterilmiştir. Non-steril PEEK materyal 538 °C'ye kadar termal olarak kararlıdır ve sonraki sıcaklıklarda iki basamaklı bir bozunma sergilemiştir. Şekil 6a'daki TGA termogramından türetilen DTG eğrisi incelendiğinde birinci bozunma 538 °C'de (T_i) başlamış, 584 °C'de (T_{max}) maksimum bozunma hızına ulaşmış ve 664 °C'de (T_s) tamamlanmıştır. Birinci ana bozunma basamağın sonunda polimerde %43,80 kütle kaybı gerçekleşmiştir. Literatüre göre ana

basamağın bozunması dekarboksilasyon, dekarbonilasyon ve dehidrasyon süreçlerini içerir ve bozunma ürünlerinin başlıcaları fenol grupları, karbondioksit ve karbonmonoksit molekülleridir (Naffakh et al., 1999; Ramgobin et al., 2020). 670 °C'de başlayan ikinci bozunma 713 °C'de maksimum hıza ulaşmış ve 785 °C'nin sonunda %5,2'lik bir kütle kaybı ile tamamlanmıştır. İkinci basamağın bozunma ürünleri ise karbondioksit (CO₂), karbonmonoksit (CO), metan (CH₄) ve fenol molekülleridir (Ramgobin et al., 2020). 900 °C'nin sonunda PEEK materyalin % 52'si bozunmadan kalmış ve bu kalıntı azot gazı atmosferinde yüksek sıcaklıklarda bozulan eter ve aromatik yapılarının varlığına atfedilmiştir (Diez-Pascual et al., 2009). Ramgobin ve ark. (2020), eşzamanlı TGA-DSC ile PEEK polimerin termal davranışlarını incelemişler ve meydana gelen iki bozunma basamağının da ekzotermik olduğunu rapor etmişlerdir.

EtO sterilizasyonu sonrasında 530 °C'ye kadar nem ve gaz kalıntısından kaynaklanan buharlaşan veya uçucu bileşenlerden dolayı herhangi bir kütle kaybı gözlenmemiştir (Şekil 6b). Ancak TGA gravimetrik bir teknik olduğundan bu durum kesin olarak etilen oksit kalıntısının olmadığı anlamına gelmez. EtO kalıntı analizi ayrıca ISO 10993-7'ye göre gaz kromatografisi ile yapılmalıdır. Bununla birlikte basamakların maksimum bozunma sıcaklıklarında ve 900 °C'nin sonundaki kalıntı kütlelerinde kayda değer bir farklılık gözlenmemiştir. Sonuç olarak sterilizasyon işleminden sonra malzemelerin termal kararlılığını etkileyecek önemli bir değişim tespit edilmemiştir.

Tablo 2. Non-Steril Ve Steril PEEK İmplantların DTG Sonuçları.

Polimer	1. basamak			2. basamak			Kalıntı
	T _i (°C)	T _{max} (°C)	T _s (°C)	T _i (°C)	T _{max} (°C)	T _s (°C)	900 °C (%)
Non-steril PEEK	538,2	584,2	664,4	665	713,0	785,8	52,01
Steril PEEK	532,1	583,7	671,5	672	710,8	785,8	52,11



Şekil 6. PEEK İmplantların TGA/DTG Termogramları: (A) Non-Steril; (B) Steril.

3.4. Elementel Analiz

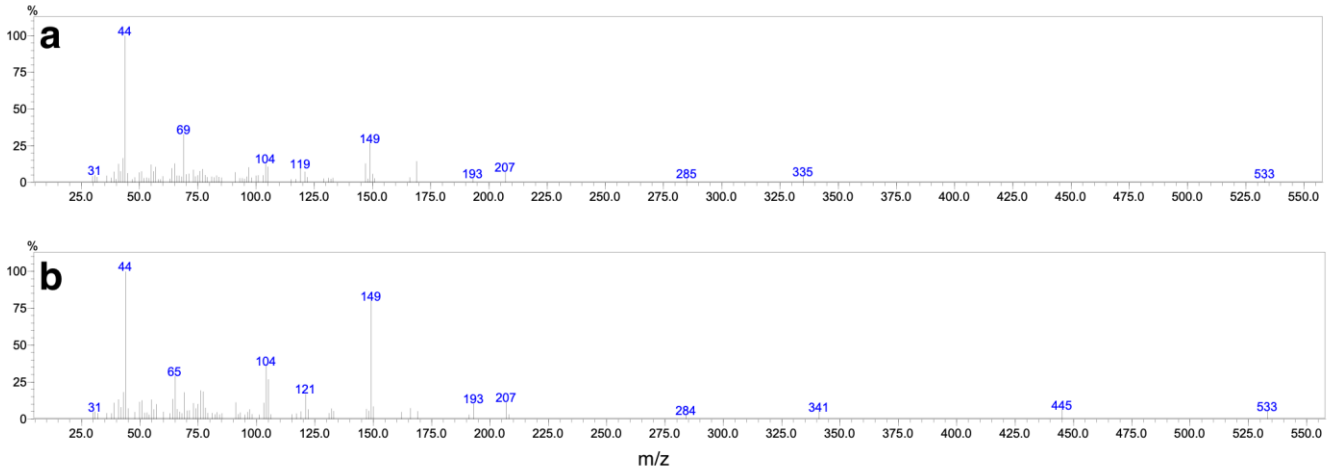
CHNS/O element analizi birçok malzemenin yapısındaki karbon (C), hidrojen (H), azot (N), kükürt (S) ve oksijen (O) miktarını belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir (Bozkaya et al., 2021; Nizamuddin et al., 2020). PEEK polimerin kimyasal yapısı, aril (-C₆H₄-), keton (-CO-) ve eter bağından (-O-) oluşur (Mazlan et al., 2022). Tekrarlanan biriminin formülü [-C₆H₄-O-C₆H₄-O-C₆H₄-CO-]_n olup mol ağırlığı 288,3 gramdır (Panayotov et al., 2016). Dolayısıyla PEEK polimeri teorik olarak %79,1 C, %16,6 O ve %4,3 H içerir. Polimerik malzemenin kimyasal kompozisyonu sterilizasyon işlemi aşamalarında sıcaklığa, etilen oksite, karbondioksit gazına, azot gazına, neme ve havaya maruz kalması nedeniyle değişebilir. Bu nedenle steril ve non-steril PEEK materyallerin C, H, N ve O içerikleri CHNS/O elementel analiz tekniği ile üç tekrarlı olarak analiz edilmiş ve sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Non-steril PEEK implantın ortalamada C, H ve O içeriği sırasıyla %79,117 ± %0,025; %4,358 ± %0,014 ve %16,525 ± %0,029 olarak belirlenmiştir. Sterilizasyon sonrasında ise C, H ve O içeriği sırasıyla %79,250 ± %0,066; %4,353 ± %0,016 ve %16,397 ± %0,081 olarak tespit edilmiştir. Sterilizasyondan sonra C, H ve O içeriğinden hidrojen içeriklerinde önemli bir fark görünmese de bu küçük değişiklikler analiz cihazının anlak duyarlılığından veya bir kalıntıdan kaynaklanıyor olabilir. Kalıntıya etilen oksit veya diğer kirlenici maddeler neden olabilir, ancak özellikle etilen oksit gazı toksik ve kanserojen olduğundan sterilizasyondan sonra kalıntı analizinin yapılması şarttır (Mendes et al., 2007).

Tablo 3. Non-Steril Ve Steril PEEK İmplantların C, H, N Ve O İçerikleri.

Materyal	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)
Non-steril PEEK	79,12	4,342	16,538	0,00
Non-steril PEEK	79,14	4,368	16,492	0,00
Non-steril PEEK	79,09	4,365	16,545	0,00
Ortalama değer	79,117	4,358	16,525	0,00
Sapma	0,025	0,014	0,029	0,00
Steril PEEK	79,18	4,339	16,481	0,00
Steril PEEK	79,26	4,349	16,391	0,00
Steril PEEK	79,31	4,371	16,319	0,00
Ortalama değer	79,250	4,353	16,397	0,00
Sapma	0,066	0,016	0,081	0,00

3.5. GC-MS İle Parçalanma Ürünlerinin Analizi

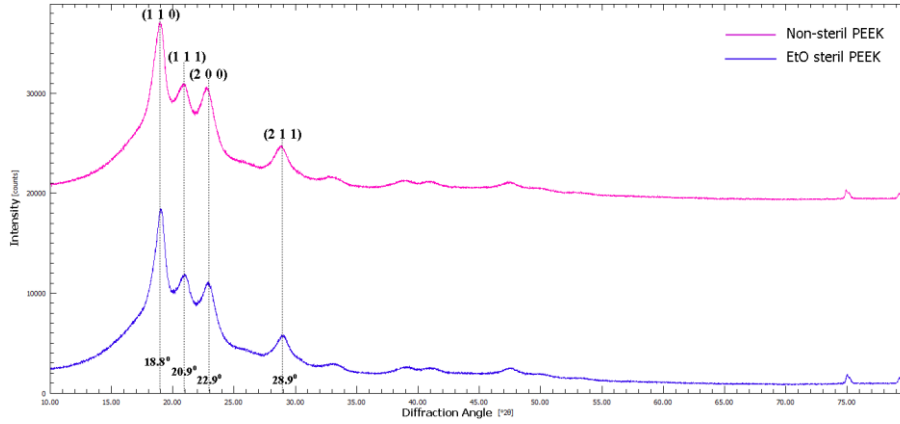
GC-MS, polimerik malzemelerin uçucu bileşenlerini, artık monomerleri, istenmeyen kirleticileri ve bozunma ürünlerini tanımlamak ve karakterize etmek için kullanılan önemli bir tekniktir (Rial-Otero et al., 2009). Bu çalışmada non-steril ve steril PEEK implantların direk enjeksiyon yöntemiyle MS üzerinden analizi yapılmış ve parçalanma ürünlerine ait kromatogram Şekil 7'de gösterilmiştir. Non-steril PEEK materyalin pik yoğunluk profillerinde (Şekil 5a) en yüksek yoğunluğa sahip m/z değeri 44'tür ve bu da CO₂ molekülüne karşılık gelir (Ramgobin et al., 2020). Literatürde CO₂ salınımının karbonillerin pirolitik bozunmasıyla da ilişkili olduğu bildirilmiştir (Tsai et al., 1997). Ayrıca Tsai ve ark. (1997) tarafından diğer parçalanma ürünlerinin benzen, fenol, metil benzen, p-benzokinon, difenil eter, dibenzo furan, naftalin, hidrokinon gibi moleküler olduğu bildirilmiştir. Sterilizasyon işleminden sonra polimerin moleküler yapısının değişmesi ile iyonize bozunma ürünleri de kısmen değişir. Sterilizasyon işleminden sonra PEEK materyalin parçalanma ürünlerinde kayda değer bir farklılık tespit edilmemiştir (Şekil 5b). Dolayısıyla bu yüksek benzerlik hem kimyasal yapının korunmasına hem de sterilizasyondan sonra etilen oksit (m/z=29) kalıntısının olmamasına atfedilebilir. Ancak bu çalışmadaki analiz metodunun amacı kalıntı analizi olmadığından, etilen oksit kalıntısı için ayrıca ISO 10993-7'de (Tıbbi cihazların biyolojik değerlendirilmesi- Bölüm 7: Etilen oksit sterilizasyon kalıntıları) belirtilen yöntem ve koşullara göre analiz yapılmalıdır.

**Şekil 7.** PEEK İmplantların Kütle Spektrumları: (A) Steril; (B) Non-Steril.

3.6. Kristalinite Ve Faz Analizi

Non-steril ve steril PEEK implantların faz yapısının ve/veya kristalinitesinin değişip değişmediği bir X-ışını difraktometresi (XRD) ile karakterize edilmiş ve materyallerin XRD difraktogramları Şekil 8'de verilmiştir. Non-steril polimerin kırınım deseninde dört ana tepe noktası görülebilmektedir. 18.8°, 20.9°, 22.9° ve 28.9°'lik 2θ açılarındaki tepe noktaları sırasıyla yarı kristal PEEK'in (110), (111), (200) ve (211) ortorombik kristal düzlemlerine karşılık gelmektedir ve sonuçlar literatürle uyumludur (Díez-Pascual et al., 2009; Naffakh et al., 2003). Sterilizasyondan sonra PEEK implantın düzlemler arası boşluktaki değişikliği gösterecek olan (110) düzleminde (Bragg piki) kayda değer bir kayma olmadığı söylenebilir (Stojilovic et al., 2017). Gama ışını, UV ve etilen oksit gibi sterilizasyon

yöntemleri oksidatif bozulmaya neden olarak polimerin kristalinitesini değiştirebilir (Stojilovic et al., 2017). Kristallik derecesinin Young modülü, mukavemet, yorulma ve akma gerilimi gibi polimerlerin mekanik özelliklerini etkilediği literatürde bildirilmiştir (Khalil et al., 2019). Dolayısıyla materyallerin XRD kırınım desenlerinin uyumlu olması, bu çalışmada belirtilen EtO sterilizasyon koşullarının PEEK dental implantın mekanik özelliklerinde kayda değer bir değişim olmadığını ortaya koyabilir.



Şekil 8. Non-Steril (Pembe) Ve Steril (Mavi) PEEK Dental İmplantların XRD Difraktogramları.

4. Sonuçlar

Son on yılda özellikle implante edilebilir polimerik tıbbi cihazların sayısında muazzam bir artış olmuştur. Polimerik implantların sterilizasyonu için FDA tarafından önerilen tek bir standart yöntem yoktur. Üreticiler, kullanılan polimer tipine, moleküler ağırlığa, biyolojik yüke, cihazın şekline ve boyutuna göre sterilizasyon koşullarını optimize etmelidir. EtO sterilizasyonu PEEK bazı materyallerin sterilizasyonu için kullanılan yöntemlerden biridir. Ancak sterilizasyon koşulları polimerin biyomekanik özelliklerini etkileyebilecek fiziksel ve kimyasal değişimlere yol açabilir. Bu nedenle tıbbi cihaz belgelendirme kuruluşları tıbbi cihaz üreticilerinden özellikle implante edilebilir cihazların ISO 10993 standardında belirtilen diğer deneylere ek olarak sterilizasyon öncesi ve sonrası kimyasal karakterizasyon karşılaştırma raporlarını talep etmektedirler. Bu çalışmada EtO ile steril edilen PEEK dental implantın kimyasal bağ yapısında kayda değer bir değişimin olmadığı FTIR ile tespit edilmiştir. Materyallerin Tg değeri, erime noktası ve kristalinite indeksi gibi özellikleri DSC ile araştırılmış sonuçlar birbiriyle hemen hemen aynı çıkmıştır. Tg, erime noktası ve kristalinite bir polimerin mekanik özelliklerini doğrudan etkilediğinden, bu sonuçlar sterilizasyondan sonra PEEK dental implantın mekanik özelliklerinde de bir değişimin olmadığını gösterebilir. Ayrıca polimerlerin faz ve kristalinite özelliklerinin analiz edildiği XRD kırınım eğrileri arasındaki uyum DSC sonuçlarını destekler niteliktedir. Sterilizasyon sonrasında termal kararlılıklarında, elementel bileşimlerinde ve temel parçalanma ürünlerinde önemsenecek bir değişim olmadığı ortaya konmuştur. Bu nedenle bu çalışmada belirtilen sterilizasyon koşulları altında EtO sterilizasyonunun PEEK materyaller için uygun ve güvenli bir yöntem olabileceği sonucuna varılmıştır.

Referanslar

- Abruzzo, A., Fiorica, C., Palumbo, V. D., Altomare, R., Damiano, G., Gioviale, M. C., Tomasello, G., Licciardi, M., Palumbo, F. S., & Giammona, G. (2014). Using polymeric scaffolds for vascular tissue engineering. *International Journal of Polymer Science*, 2014.
- Ahmad, A., Iqbal, T., Yasin, S., Hanif, R., Riaz, S., & Luckham, P. F. (2018). Stability of Amorphous PEEK in Organic Solvents. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 40(4), 810-818.
- Atkinson, J. R., Hay, J. N., & Jenkins, M. J. (2002). Enthalpic relaxation in semi-crystalline PEEK. *Polymer*, 43(3), 731-735. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00668-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00668-1)
- Bozkaya, O., Arat, E., Gök, Z. G., Yiğitoğlu, M., & Vargel, İ. (2022). Production and characterization of hybrid nanofiber wound dressing containing *Centella asiatica* coated silver nanoparticles by mutual electrospinning method. *European Polymer Journal*, 111023.
- Bozkaya, O., Günay, K., Arslan, M., & Gün Gök, Z. (2021). Removal of anionic dyes with glycidyl methacrylate-grafted polyethylene terephthalate (PET) fibers modified with ethylenediamine. *Research on Chemical Intermediates*, 47(5), 2075-2093. <https://doi.org/10.1007/s11164-021-04398-7>

- Coates, J. (2000). Interpretation of infrared spectra, a Practical Approach in Encyclopedia of Analytical Chemistry. In (pp. p. 8): John Wiley & Sons.
- Dhandayuthapani, B., Yoshida, Y., Maekawa, T., & Kumar, D. S. (2011). Polymeric scaffolds in tissue engineering application: a review. *International Journal of Polymer Science*, 2011.
- Díez-Pascual, A. M., Martínez, G., & Gómez, M. A. (2009). Synthesis and Characterization of Poly(ether ether ketone) Derivatives Obtained by Carbonyl Reduction. *Macromolecules*, 42(18), 6885-6892. <https://doi.org/10.1021/ma901208e>
- Düzyer, S., Hockenberger, A., Agah, U., Elif, E., & Kahveci, Z. Etilen oksit, otoklav ve ultra viyole sterilizasyonlarının PET elektroçekim liflerin yüzey topografisi üzerine etkisi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 21(2), 201-218.
- Farrar, D., & Gillson, R. (2002). Hydrolytic degradation of polyglyconate B: the relationship between degradation time, strength and molecular weight. *Biomaterials*, 23(18), 3905-3912.
- Godara, A., Raabe, D., & Green, S. (2007). The influence of sterilization processes on the micromechanical properties of carbon fiber-reinforced PEEK composites for bone implant applications. *Acta Biomaterialia*, 3(2), 209-220.
- Govindaraj, S., & Muthuraman, M. S. (2015). Systematic review on sterilization methods of implants and medical devices. *Int J ChemTech Res*, 8(2), 897-911.
- Gün Gök, Z., Demiral, A., Bozkaya, O., & Yiğitoğlu, M. (2021). In situ synthesis of silver nanoparticles on modified poly(ethylene terephthalate) fibers by grafting for obtaining versatile antimicrobial materials. *Polymer Bulletin*, 78(12), 7241-7260. <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03486-9>
- Gün Gök, Z., İnal, M., Bozkaya, O., Yiğitoğlu, M., & Vargel, İ. (2020). Production of 2-hydroxyethyl methacrylate-g-poly (ethylene terephthalate) nanofibers by electrospinning and evaluation of the properties of the obtained nanofibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(41), 49257.
- Heider, D., Gomann, J., Junghann, B., & Kaiser, U. (2002). Kill kinetics study of *Bacillus subtilis* spores in ethylene oxide sterilisation processes. *Zentr Steril*, 10(3), 158-167.
- Inal, M., Erduran, N., & Gökgöz, M. (2021). The dye adsorption and antibacterial properties of composite polyacrylamide cryogels modified with ZnO. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 98, 200-210.
- Khalil, Y., Hopkinson, N., Kowalski, A., & Fairclough, J. P. A. (2019). Characterisation of UHMWPE polymer powder for laser sintering. *Materials*, 12(21), 3496.
- Kulkarni, S. V., Nemade, A. C., & Sonawwanay, P. D. (2022). *Recent Advances in Manufacturing Processes and Systems*. Springer Singapore.
- Kurtz, S. M. (2009). *UHMWPE biomaterials handbook: ultra high molecular weight polyethylene in total joint replacement and medical devices*. Academic Press.
- Kurtz, S. M., & Devine, J. N. (2007). PEEK biomaterials in trauma, orthopedic, and spinal implants. *Biomaterials*, 28(32), 4845-4869.
- Li, H., Fouracre, R., Given, M., Banford, H., Wysocki, S., & Karolczak, S. (1999). The effects on polyetheretherketone and polyethersulfone of electron and/spl gamma/irradiation. *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, 6(3), 295-303.
- Liu, Q., Li, C., Wei, L., Shen, M., Yao, Y., Hu, B., & Chen, Q. (2014). The phase structure, chain diffusion motion and local reorientation motion: ¹³C Solid-state NMR study on the highly-crystalline solid polymer electrolytes. *Polymer*, 55(21), 5454-5459.
- Maekawa, M., Kanno, Z., Wada, T., Hongo, T., Doi, H., Hanawa, T., Ono, T., & Uo, M. (2015). Mechanical properties of orthodontic wires made of super engineering plastic. *Dental Materials Journal*, 2014-2202.
- Mazlan, N., Hua, T. C., Ramli, N., Abdan, K., & Zin, M. H. (2022). Thermoplastics for Aircraft Cabin Applications. In M. S. J. Hashmi (Ed.), *Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers* (pp. 482-497). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820352-1.00101-2>
- Mendes, G. C. C., Brandão, T. R. S., & Silva, C. L. M. (2007). Ethylene oxide sterilization of medical devices: A review. *American Journal of Infection Control*, 35(9), 574-581. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ajic.2006.10.014>

- Mensitieri, G., Apicella, A., Kenny, J., & Nicolais, L. (1989). Water sorption kinetics in poly (aryl ether ether ketone). *Journal of Applied Polymer Science*, 37(2), 381-392.
- Mosley, G. A., Gillis, J. R., & Whitbourne, J. E. (2002). Calculating equivalent time for use in determining the lethality of EtO sterilization processes. *Medical Device and Diagnostic Industry*, 24(2), 54-63.
- Naffakh, M., Ellis, G., Gómez, M., & Marco, C. (1999). Thermal decomposition of technological polymer blends 1. Poly (aryl ether ether ketone) with a thermotropic liquid crystalline polymer. *Polymer degradation and stability*, 66(3), 405-413.
- Naffakh, M., Gómez, M. A., Ellis, G., & Marco, C. (2003). Thermal properties, structure and morphology of PEEK/thermotropic liquid crystalline polymer blends. *Polymer International*, 52(12), 1876-1886.
- Najeeb, S., Zafar, M. S., Khurshid, Z., & Siddiqui, F. (2016). Applications of polyetheretherketone (PEEK) in oral implantology and prosthodontics. *Journal of Prosthodontic Research*, 60(1), 12-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpjor.2015.10.001>
- Nizamuddin, S., Jamal, M., Gravina, R., & Giustozzi, F. (2020). Recycled plastic as bitumen modifier: The role of recycled linear low-density polyethylene in the modification of physical, chemical and rheological properties of bitumen. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121988.
- Ortega-Martínez, J., Farré-Lladós, M., Cano-Batalla, J., & Cabratosa-Termes, J. (2017). Polyetheretherketone (PEEK) as a medical and dental material. A literature review. *Medical Research Archives*, 5(4).
- Özden, S., & Demir, H. (2020). Polieter eter keton (peek) dış hekimliğinde yükselen materyal. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Dış Hekimliği Dergisi*, 2(2), 76-85.
- Panayotov, I. V., Orti, V., Cuisinier, F., & Yachouh, J. (2016). Polyetheretherketone (PEEK) for medical applications. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 27(7), 118. <https://doi.org/10.1007/s10856-016-5731-4>
- Park, G. E., & Webster, T. J. (2005). A review of nanotechnology for the development of better orthopedic implants. *Journal of Biomedical Nanotechnology*, 1(1), 18-29.
- Puppi, D., Chiellini, F., Piras, A. M., & Chiellini, E. (2010). Polymeric materials for bone and cartilage repair. *Progress in Polymer Science*, 35(4), 403-440.
- Ramgobin, A., Fontaine, G., & Bourbigot, S. (2020). A case study of polyether ether ketone (I): investigating the thermal and fire behavior of a high-performance material. *Polymers*, 12(8), 1789.
- Rial-Otero, R., Galesio, M., Capelo, J.-L., & Simal-Gándara, J. (2009). A Review of Synthetic Polymer Characterization by Pyrolysis–GC–MS. *Chromatographia*, 70(3), 339-348. <https://doi.org/10.1365/s10337-009-1254-1>
- Ries, M. D., Weaver, K., & Beals, N. (1996). Safety and Efficacy of Ethylene Oxide Sterilized Polyethylene in Total Knee Arthroplasty. *Clinical Orthopaedics and Related Research®*, 331, 159-163.
- Rutala, W., & Weber, D. (1999). Infection control: the role of disinfection and sterilization. *Journal of Hospital Infection*, 43, S43-S55.
- Saeidlou, S., Huneault, M. A., Li, H., & Park, C. B. (2012). Poly (lactic acid) crystallization. *Progress in Polymer Science*, 37(12), 1657-1677.
- Sarot, J. R., Contar, C. M. M., Cruz, A. C. C. d., & de Souza Magini, R. (2010). Evaluation of the stress distribution in CFR-PEEK dental implants by the three-dimensional finite element method. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 21(7), 2079-2085.
- Sasuga, T., Seguchi, T., Sakai, H., Nakakura, T., & Masutani, M. (1989). Electron-beam irradiation effects on mechanical properties of PEEK/CF composite. *Journal of Materials Science*, 24(5), 1570-1574.
- Savaris, M., Carvalho, G. A., Falavigna, A., Santos, V. d., & Brandalise, R. N. (2016). Chemical and thermal evaluation of commercial and medical Grade PEEK sterilization by Ethylene oxide. *Materials Research*, 19, 807-811.
- Simonin, L., & Liao, H. (2000). Characterization of flame-sprayed PEEK coatings by FTIR-ATR, DSC and acoustic microscopy. *Macromolecular Materials and Engineering*, 283(1), 153-162.

- Stojilovic, N., Dordevic, S. V., & Stojadinovic, S. (2017). Effects of clinical X-ray irradiation on UHMWPE films. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 410, 139-143. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.08.023>
- Struik, L. C. E. (1966). Volume relaxation in polymers. *Rheologica Acta*, 5(4), 303-311. <https://doi.org/10.1007/BF02009739>
- Talley, S. J., Yuan, X., & Moore, R. B. (2017). Thermoreversible Gelation of Poly (ether ether ketone). *ACS Macro Letters*, 6(3), 262-266.
- Tipnis, N. P., & Burgess, D. J. (2018). Sterilization of implantable polymer-based medical devices: A review. *International Journal of Pharmaceutics*, 544(2), 455-460. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.12.003>
- Tsai, C., Perng, L., & Ling, Y. (1997). A study of thermal degradation of poly (aryl-ether-ether-ketone) using stepwise pyrolysis/gas chromatography/mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 11(18), 1987-1995.
- Wang, H., Xu, L., Hu, J., Wang, M., & Wu, G. (2015). Radiation-induced oxidation of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) powder by gamma rays and electron beams: A clear dependence of dose rate. *Radiation Physics and Chemistry*, 115, 88-96. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.06.012>
- Xu, J., Zhang, Z., Xiong, X., & Zeng, H. (1992). A new solvent for poly (ether ether ketone). *Polymer*, 33(20), 4432-4434.
- Yin, J., & Luan, S. (2016). Opportunities and challenges for the development of polymer-based biomaterials and medical devices. *Regenerative biomaterials*, 3(2), 129-135.
- Zheng, Q., & Morgan, R. (1993). Synergistic thermal-moisture damage mechanisms of epoxies and their carbon fiber composites. *Journal of Composite Materials*, 27(15), 1465-1478.



Toz Metalurjisi Yöntemi İle Tane İnceltici Üretimi Ve Döküm Performansının İncelenmesi

Grain Refiners Production With Powder Metallurgy Method And Investigation Of Casting Performance

Ramazan Can¹, Engin Kocaman^{2*}, Nazım Kunduracı¹, Süleyman Can Kurnaz³

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 67100, Zonguldak, TÜRKİYE

²Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, 67100, Zonguldak, TÜRKİYE

³Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 54100, Sakarya, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 28/08/2022

Kabul / Accepted: 05/10/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Alüminyum ve alaşımlarına uygulanan tane inceltme işlemi özellikle döküm alüminyum alaşımların mekanik ve dökülebilirlik özelliklerini iyileştirmede kullanılan bir yöntemdir. Ticari olarak alüminyumun titanyum ve bor içeren halojenür tuzların ergitilmesi ile üretilen master alaşımlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada toz metalürjisi yöntemi ile üretilen tane incelticilerin Etial 180 (LM2) alaşımının tane inceltme performansını üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ticari olarak kullanılan Al5Ti1B ve Al8B master alaşımına alternatif olabilecek tane incelticiler toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır. Bu amaçla Al25Ti, Al25B, Al5Ti1B ve Al5Ti5B bileşimlerine sahip dört farklı tane inceltici geliştirilmiş ve farklı sıcaklıklarda atmosfer altında sinterlenmiştir. Akabinde üretilen tane incelticilerin performansı Etial 180 alaşımı kullanılarak kokil kalıba gerçekleştirilen döküm işlemi ile incelenmiştir. Çalışma sonucu toz metalürjisi ile üretilen tane incelticilerin alaşımın tane boyutunu önemli oranda azalttığı ve ticari olarak kullanılan tane inceltici kadar performans sağladığı tespit edilmiştir. Toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilen tane incelticiler ile döküm alaşımın tane boyutunu başlangıç durumuna göre ~%80'e kadar azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca toz metalürjisi yöntemi ile üretilen tane incelticilerin döküm parçanın sertliğini %10 ile %15 arasında artırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

"Etial 180 (LM2), Tane İnceltme, Toz Metalürjisi, Döküm, Sertlik"

Abstract

Grain refinement applied to aluminum and its alloys is a process used to improve the mechanical and castability properties of cast aluminum alloys. Commercially, master alloys produced by melting aluminum halide salts containing titanium and boron are used. In this study, the effects of grain refiners produced by powder metallurgy method on grain refinement performance of Etial 180 (LM2) alloy were investigated. Grain refiners, which can be alternatives to commercially used Al5Ti1B and Al8B master alloys, were produced by powder metallurgy method and their performances were compared. For this purpose, four different grain refiners with Al25Ti, Al25B, Al5Ti1B and Al5Ti5B compositions were developed and sintered under atmosphere at different temperatures. Subsequently, the performance of the grain refiners produced was investigated by casting process in a permanent mold using Etial 180 alloy. As a result of the study, it has been determined that the grain refiners produced by powder metallurgy significantly reduce the grain size of the alloy and provide performance as much as the commercially used grain refiner. It has been observed that the grain refiners produced using the powder metallurgy method reduce the grain size of the cast alloy up to ~80% compared to the initial situation. In addition, it has been determined that the grain refiners produced by the powder metallurgy method increase the hardness of the cast part between 10% and 15%.

Key Words

"Etial 180 (LM2), Grain Refinement, Powder Metallurgy, Casting, Hardness"

1. Giriş

Alüminyum alaşımları düşük yoğunluğunun yanında sergilediği nispeten yüksek mukavemet, yüksek süneklik, iyi elektrik iletkenliği ve yüksek korozyon direnci sayesinde hayatımızın hemen her alanında kullanılan bir metal haline gelmiştir. Alüminyum ve alaşımlarına olan bu denli yüksek talep alüminyum ve alaşımlarının üretiminin artmasına neden olurken, üretim yöntemlerinin ve teknolojisinin de gelişmesine neden olmuştur. Günümüzde alüminyum alaşımlarının özellikleri ısıtma işlemi veya mekanik/termomekanik benzeri yöntemler ile artırılabilir. Bu yöntemlere ek olarak son 50 yıldır özellikle alüminyum döküm alaşımlarında çeşitli döküm hatalarının giderilmesine yardımcı olan ve alaşımların mekanik özelliklerini arttıran tane inceltme işlemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde tane inceltme işlemi çubuk veya tablet formundaki ön alaşımlandırılmış master alaşımların ergiyik içerisine ilavesi ile gerçekleştirilmektedir. Tane inceltmede etkili mekanizmanın ise sıvı metale ilave edilen master alaşımların ergiyik içerisinde heterojen çekirdeklenme için çekirdeklenme merkezleri oluşturduğu yönündedir. Alüminyumda tane inceltme işlemi ilk olarak 1930'lu yıllarda ergiyik alüminyum içerisine titanyum eklenerek gerçekleştirilmiştir (Eser, 2019). Tane inceltme işlemi sonucu malzemenin tane yapısında inceltme ve eş eksenli bir taneye dönüşüm söz konusudur bu durum döküm parçanın mekanik özellikleri önemli seviyede artırmaktadır. Ayrıca tane inceltme işlemi ikincil fazların dağılımını da homojen ve daha rafine hale getirmektedir. Bu durum mekanik özellikleri etkileyen diğer bir husustur (Sigworth & Kuhn, 2007; Teke et al., 2019). Alüminyum alaşımlarında tane inceltme işleminin ile kritik katılaşma oranını artırdığı, gözeneklerin boyutunda ve miktarında azaltma olduğu rapor edilmiştir (Kayıkci et al., 2015; Samuel et al., 2018). Bu sebeple tane inceltme işleminin yorulma dayanımını geliştirmede etkili olduğu bilinmektedir.

Geçmişte gerçekleştirilen uygulamalarda Al-Ti esaslı tane incelticilerin ergiyik içerisinde oluşturduğu $TiAl_3$ bileşiğinin tane inceltmede etkili olduğu düşünülmekteydi. Bu konuda çalışma yapan Davies ve arkadaşları (Davies et al., 1970) alüminyum içerisindeki $TiAl_3$ bileşiğini incelemiş ve çekirdeklenmeye katkı sağladığını belirtmişlerdir. 1950'li yıllarda ise borun tane inceltme etkileri araştırılmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmalarda, bor ve titanyumun içeren tane incelticilerin çok daha fazla tane inceltme etkisi oluşturduğu tespit edilmiştir. Al-Ti-B çubuğu, bu bulgunun ilk ürünü olmuştur. Bor içeren yeni tane incelticiler çok daha yüksek tane inceltme performansına sahip ve ekonomik oldukları için alüminyum alaşımlarında alüminyum-titanyum tane incelticilerin yerine Al-Ti-B içeren tane inceltici master alaşımlar kullanılmaya başlamıştır. İlk modern ticari Al-Ti-B alaşımı, 1970'li yılların başında geliştirilmiştir. Al-Ti-B esaslı tane incelticilerde borun alüminyum ile yaptığı AlB_2 ve titanyum ile yaptığı TiB_2 intermetalik bileşikler düşük çözünürlüğe sahiptirler ve döküm alaşımlarında oldukça etkili çekirdekleştirici maddeler olduğu tespit edilmiştir (Bahadır, 2021). Sonraları ise ağırlıkça %5 titanyumun ve %1 bor içeren Al_5Ti_1B tane incelticilerin sistemde daha verimli tane küçülttüğü belirtilmiştir ve bu üçlü alaşım bileşimlerinin içerdiği çok ince TiB_2 ve $TiAl_3$ kristalleri tane inceltmede etkili olduğu rapor edilmiştir (Gül, 2014). Şenel (Şenel, 2004) tarafından yapılan çalışmada ise TiB_2 ve $TiAl_3$ bileşiklerinin ikisinin de birlikte bulunduğu zaman $TiAl_3$ 'ün daha verimli bir çekirdekleştirici olduğu rapor edilmiştir. Murty (Murty et al., 2002) tarafından yapılan çalışmada alüminyum ile TiB_2 arasında hiçbir ilişki bulunamamış, alüminitlerin alüminyum tanelerinin ortasında kaldıkları gözlemlenirken, borürlerin ise alaşımlarda tane sınırlarına doğru toplandıkları gözlemlenmiştir. Bununla birlikte son 20 yıl içerisinde yapılan çalışmalar Al-Si alaşımlarında silisyum oranının ağırlıkça % 3'ün üzerine çıkması ile $AlTiB$ tane incelticilerin tane inceltme performansının azaldığı rapor edilmiştir (Murat Çolak, 2020; Qiu et al., 2007; Quested et al., 2006). Balzoni ve Nadendla tarafından yapılan çalışmada Al-Si alaşımlarında tane inceltmede $AlTiB$ esaslı tane incelticilere nazaran $AlNbB$ esaslı tane incelticilerin tane inceltme performansının daha iyi olduğu bildirilmiştir (Bolzoni & Hari Babu, 2020).

Alüminyum alaşımlarında master alaşım kullanarak tane inceltme üzerine çok sayıda çalışma gerçekleştirilmekle birlikte özellikle tane inceltme mekanizması hakkında hala açıklığa kavuşturulamayan durumlar söz konusudur. Özellikle bu durum alüminyum-silisyum döküm alaşımlara uygulanan tane inceltme işleminde gizemini korumaktadır. Bu çalışmada ise tane inceltme işleminin mekanizması daha iyi anlamaya yönelik ve ticari olarak kullanılan mevcut tane incelticilere alternatif olarak toz metalürjisi yöntemi ile farklı oranlarda Al-Ti, Al-B ve Al-Ti-B içeren tane incelticiler üretilmiştir. Üretilen bu tane incelticilerin özellikle otomotiv sanayinde kullanılan bir basınçlı alüminyum döküm alaşımı olan ve ana alaşım elementi silisyum olan Etial 180 alaşımı üzerindeki tane inceltme performansı, mikroyapısal incelemeleri, tane boyutu ölçümü ve sertlik testi gerçekleştirilmiş. Elde edilen bulgular ticari olarak kullanılan Al_5Ti_1B tane inceltici ile tane inceltme işlemine tabi tutulan numune ile karşılaştırılmıştır.

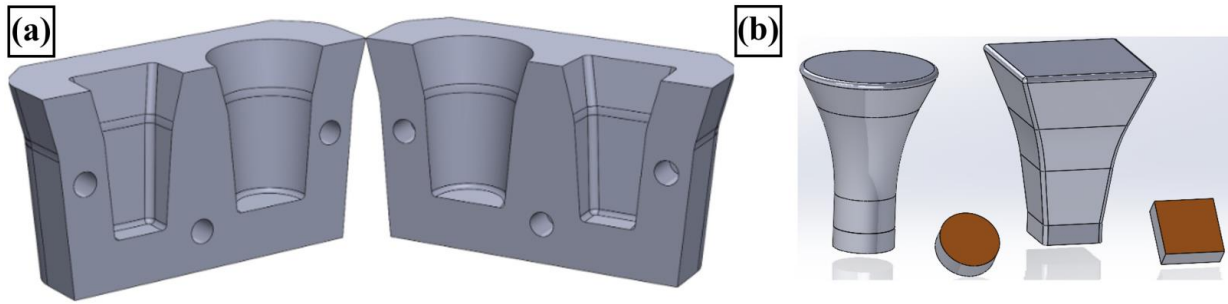
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada toz metalürjisi (TM) yöntemiyle üretilen farklı Al-Ti-B içeriklerine sahip tane incelticilerin tane inceltme performansı incelenmiş ve ticari olarak kullanılan Al_5Ti_1B tane inceltici master alaşım ile karşılaştırılmıştır. TM yöntemi ile üretilen tane incelticiler için başlangıç malzemesi olarak Egenanotek firmasından temin edilen 45 mikron tane boyutuna sahip %99,99 saflıkta alüminyum tozu, Egenanotek firmasından temin edilen 45 mikron tane boyutuna sahip %99 saflıkta bor tozu, Egenanotek firmasından temin edilen 45 mikron tane boyutuna sahip %99,9 saflıkta titanyum tozu kullanılmıştır. Precisia marka 0,0001 hassasiyete sahip hassas terazi ile Tablo 1'de verilen bileşimlere göre tartılan tozlar hidrolik pres yardımıyla 120 Mpa basınç altında preslenmiştir. Akabinde atmosfer kontrollü fırın içerisinde 600 °C, 650 °C ve 700 °C olmak üzere üç farklı sinterleme sıcaklığında 360 dakika boyunca sinterlenmiştir.

Tablo 1. TM Tane İncelticilerin Kimyasal Bileşimleri (% Ağ.)

	Ti	B	Kal.
Al25Ti	25	-	Al.
Al25B	-	25	Al.
Al5Ti1B	5	1	Al.
Al5Ti5B	5	5	Al.

Üretilen tane incelticilerin tane inceltme performansının incelenmesi için Şekil 1’de şematik görünümü verilen kokil kalıp kullanılarak 250 °C’de ön ısıtılmış kalıp içerisine döküm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Döküm alaşımı olarak katılaşma aralığı geniş bir alaşım olan ve Tablo 2’de spektral analiz sonucu verilen Etial180 alaşımı tercih edilmiştir. Ergitme işlemi 2 kg kapasiteli SiC pota içerisinde elektrik direnç ocağı vasıtasıyla 740 °C’de gerçekleştirilmiştir. Ergiyik metal içerisine 740 °C’de ticari Al5Ti1B için % 0,02 Ti olacak şekilde TM hazırlanan tane incelticiler için %0.02 Ti veya B oranında tane inceltici ilave edilmiştir. Döküm pota içerisine ilave edilen tane incelticiler 15 dakika bekleme süresi sonunda 720 °C’de döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Döküm öncesi ergiyik metal bulunduğu pota içerisnde bir grafit çubuk yardımıyla 30 saniye süre ile karıştırılmış ve gaz alma tableti (ALDEGAS-NCL) kullanılarak gaz giderme işlemi gerçekleştirilmiştir.

**Şekil 1.** Kokil Kalıbın Şematik Gösterimi.

Dökülen numuneler standart metalografik işlemlere göre önce 240, 600, 1200, 2500 grid zımpara ile zımparalanmış sonrasında 1, 6 ve 0,05 µm solüsyon kullanılarak parlatılmış ve Keller (5 ml. HNO₃, 3 ml. HCl, 2 ml. HF ve 190 ml saf su) çözeltisiyle dağlanmıştır. Dağlanan numunelerin mikroyapısal incelemeleri Leica M 1750 optik mikroskop ve Jeol JSM-6060LV markalı taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu ölçümü ve mikroyapısal değerlendirmeler Image-J görüntü analiz yazılımı yardımıyla yapılmıştır. Sertlik ölçümleri Brinell sertlik modunda Bulut Makine marka DIGIROCK-RB model sertlik cihazı ile 2,5 mm çapında bilya ve 62.5 g yük uygulanarak ölçülmüştür. Ortalama brinell sertlik değerleri için bütün yüzey boyunca 5 mm aralıklarla ortalama 10 ölçüm alınarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada, kullanılan Etial 180 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimleri aşağıdaki Tablo 2’de verilmiştir. Alaşımın kimyasal bileşimini belirleme de, Türkiye Taş Kömürü Maden Makinaları Fabrikası’nda bulunan Oxford Foundry-Master marka spektral analiz cihazı kullanılmıştır.

Tablo 2. Etial 180 Kimyasal Bileşimi(%Ağ.)

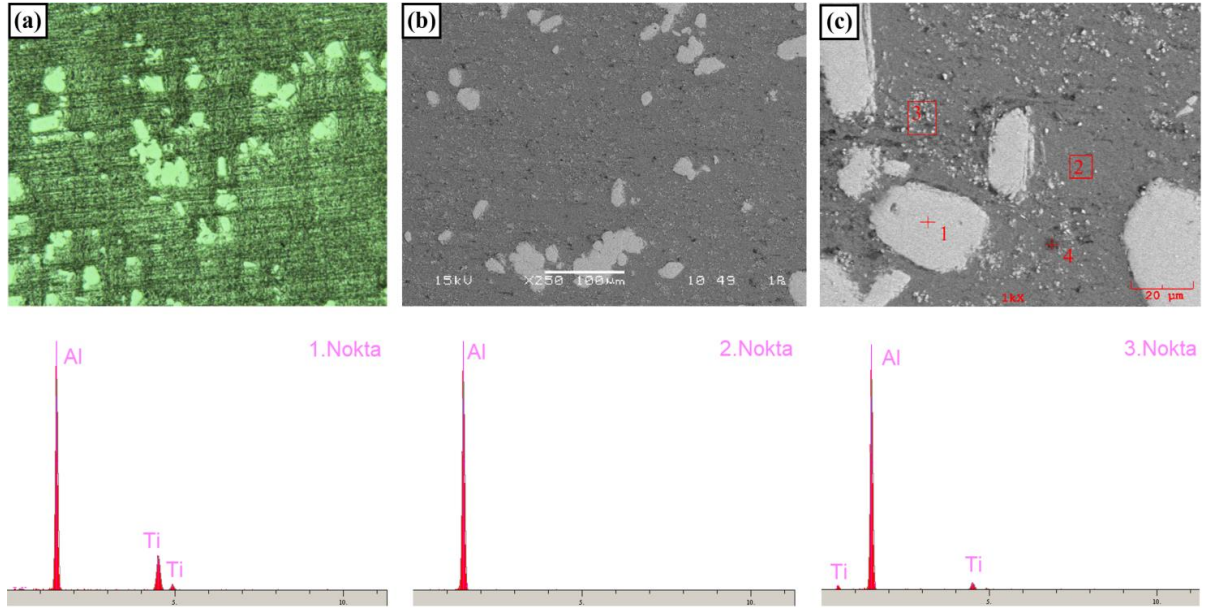
Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti	Al
%	9,95	0,994	2,37	0,160	0,274	2,28	0,010	0,107	0,036	Kalan

3. Bulgular Ve Tartışma

3.1. Tane İncelticilerin Analizi

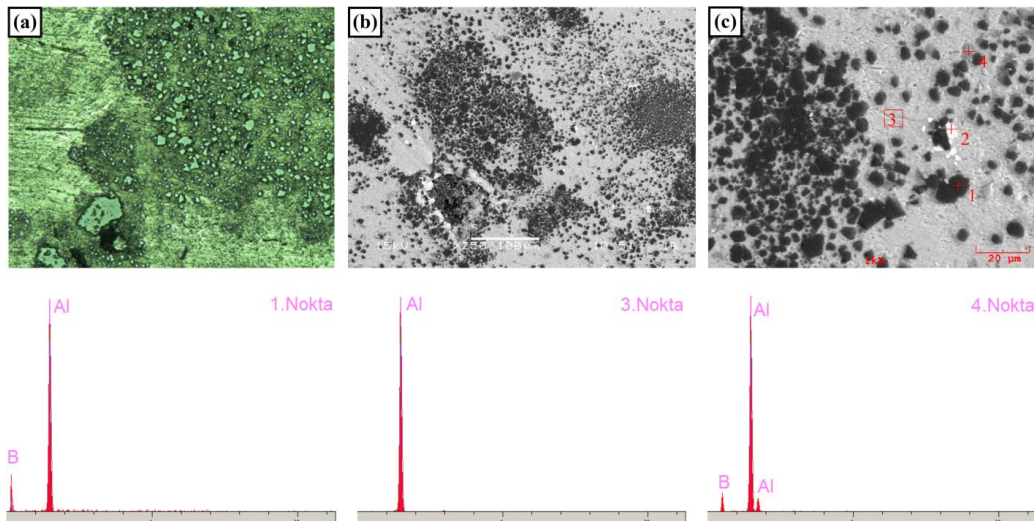
Günümüzde ticari alüminyum alaşımların dökümünde çok sayıda tane inceltici kullanılmakla birlikte en çok tercih edilen tane incelticiler Al5Ti1B ve Al8B master alaşımlardır. Çalışmanın genel hedeflerinden biri ticari olarak kullanılan tane incelticiye alternatif bir tane inceltici üretmektedir. Bu sebeple çalışmada ilk olarak ticari olarak kullanılan tane incelticiler ve mikroyapıları incelenmiştir.

Şekil 2-a'da ticari olarak kullanılan Al5Ti1B tane incelticinin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Ticari olarak kullanılan tane incelticilerin mikroyapı görüntülerinde blok yapıları partiküllerin yapı içerisinde bulunduğu görülmektedir. Matris faz içerisinde dağılan bu fazların $TiAl_3$ intermetalik fazları olması muhtemeldir. Bu partiküllerin yapı içerisindeki dağılımı genel olarak homojen olmayıp aynı zamanda boyutsal olarak da farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır. Şekil 2-b'de ticari Al5Ti1B master alaşımının SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmiştir. EDS analizinde bu partiküllerden alınan alüminyum ve titanyum sinyali bu partiküllerin $TiAl_3$ intermetalik yapıları olduğuna işaret etmektedir. Literatürde halojenür tuzlar kullanılarak yapılan veya toz başlangıç malzemeleri ile üretilen tane incelticilerde $TiAl_3$ intermetalik yapılarının baskın olarak bulunduğu rapor edilmiştir (Yücel Birol, 2008). Öte yandan blok yapıları arasında disperse olmuş ince küçük fazların bulunduğu görülmektedir. Bu noktalardan alınan EDS analizi sonucu Al, Ti ve B elementlerine ait pikler tespit edilmiştir. Bor elementinin EDS analizinde kantitatif olarak bir sayım vermediği fakat bor elementine ait sinyalleri gösterdiği bilinmektedir. Bu sebeple bu fazların yoğun olarak bulunduğu 3 numaralı EDS analizinde tespit edilen bor bu bölgelerde TiB_2 fazının olabileceğine işaret etmektedir. Yapılan benzer çalışmalarda TiB_2 fazının $TiAl_3$ ile birlikte çok küçük fazlar olarak katıldığı belirtilmiştir (Nagliç et al., 2008).



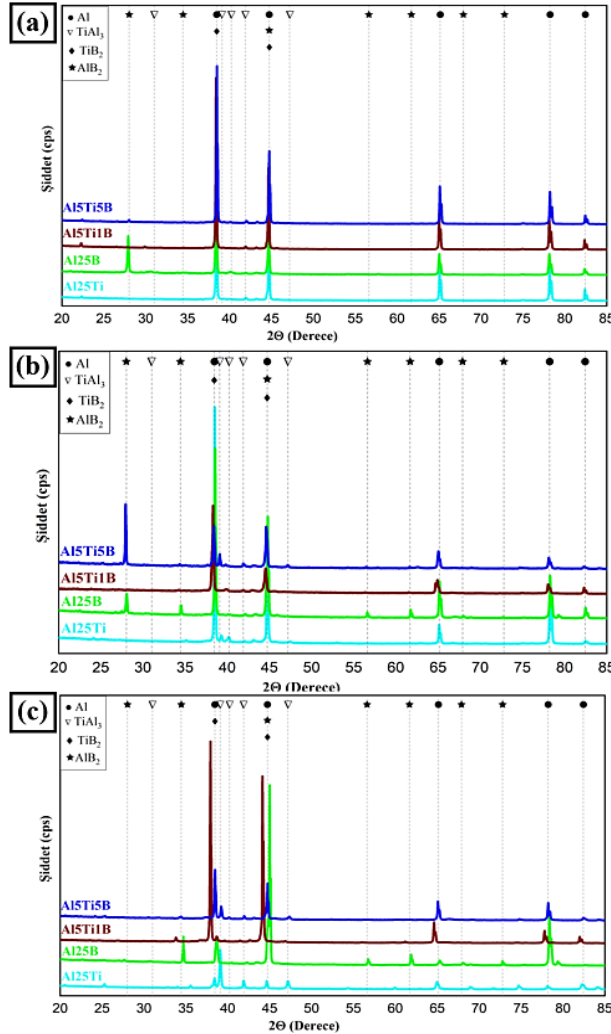
Şekil 2. Ticari Al5Ti1B a) OM görüntüsü b) SEM görüntüsü ve c) EDS analizi

Şekil 3'te Al8B tane incelticinin optik mikroskop görüntüsü SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmiştir. Mikroyapı görüntülerinde koyu renkli siyah blok yapıları fazlar olduğu görülmektedir. Ticari olarak kullanılan Al8B tane inceltici içerisinde AlB_2 ve eser miktarda AlB_{12} intermetalik yapılarının olduğu bilinmektedir (X. Wang, 2005). Literatürde yapılan çeşitli çalışmalarda B_2O_3 başlangıç malzemesi kullanılarak üretilen Al-B master alaşımında, mikroyapıda oluşan AlB_2 intermetalik yapılarının şeklinin soğuma hızı ve alaşım elementi ilavesine bağlı olarak değiştiği rapor edilmiştir (Ö Savaş et al., 2012; Ömer Savaş & Kayıkcı, 2013).



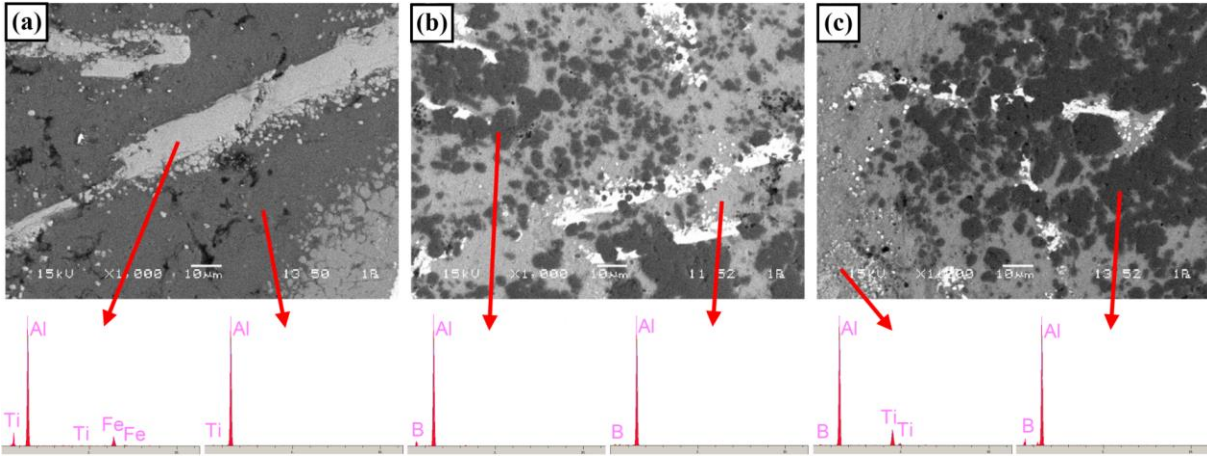
Şekil 3. Al8B Tane İncelticinin a) OM Görüntüsü b) SEM Görüntüsü ve c) EDS Analizi.

Şekil 4’te toz metalürjisi yöntemi ile üretilen ve farklı sıcaklıklarda sinterlenen tane incelticilere ait XRD analiz sonuçları verilmiştir. XRD analizine göre farklı oranlarda Al-Ti-B tozları kullanılarak üretilen numunelerde, numune bileşime bağlı olarak $TiAl_3$, TiB_2 ve AlB_2 fazları tespit edilmiştir. Şekil 4-a’da çalışmadaki en düşük sinterleme sıcaklığı olan 600 °C sıcaklıkta sinterlenen numunenin XRD analizi görülmektedir. XRD analizine göre en yüksek yoğunluğa sahip sinyallerin alüminyum elementinden alındığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte 600 °C’de sinterlenen $Al_{12.5}Ti$ bileşimli numunede Al ve $TiAl_3$ piklerinin bulunduğu görülmektedir. Yani Al-Ti tozları ile hazırlanan numunelerde 600 °C’de gerçekleştirilen sinterleme sıcaklığı için intermetalik oluşumunun gerçekleştiği söylenebilir. Al-Ti sisteminde bileşimin oranına bağlı olarak Ti_3Al , $TiAl$, Ti_2Al_5 , $TiAl_2$ ve $TiAl_3$ gibi çeşitli intermetalik fazlar oluşabilmektedir (Batalu et al., 2006). Bu çalışmada $Al_{12.5}Ti$ bileşimine sahip numunenin XRD analizi sonucu $TiAl_3$ dışında başka bir intermetalik bileşiğine rastlanmamıştır. Batool ve arkadaşlarının yaptığı benzer bir çalışmada %5 ve %10 titanyum içeren Al-Ti tozlarının sinterlenmesi sonucu $TiAl_3$ intermetalik bileşimini elde etmiş ve artan titanyum oranı ile $TiAl_3$ oranının arttığını rapor etmişlerdir (Batool et al., 2019). 600 °C’de sinterlenen $Al_{12.5}B$ bileşimine sahip numunenin XRD analizi sonucu alüminyum sinyali ve AlB_2 intermetalik faza karşılık gelen pikler tespit edilmiştir. Yine benzer çalışmalarda alüminyum ve bor elementinin sinterlenmesi sonucu AlB_2 intermetalik fazının elde edildiği bildirilmiştir (Yuan et al., 2016). 600 °C’de sinterlenen $Al_{15}Ti_{11}B$ ve $Al_{15}Ti_{15}B$ bileşimine sahip numunelerde Al, AlB_2 , $TiAl_3$ ve TiB_2 fazlarına ait pikler tespit edilmiştir. Birol (Yücel Birol, 2009) K_2TiF_6 ve KBF_4 başlangıç malzemelerini kullanarak yaptığı çalışmada $TiAl_3$ oluşumunun 220 °C’de başladığını $TiAl_3$, AlB_2 ve TiB_2 intermetaliklerinin alüminyumun ergime sıcaklığının altında in-situ olarak oluşabileceğini rapor etmiştir. Birol’un yaptığı çalışmadan farklı olarak bu çalışmada saf titanyum ve bor tozunun kullanılması sebebiyle reaksiyon sıcaklıklarının değişebileceği söylenebilir. Öte yandan alüminyum içerisinde hem titanyumun hem de borun çözünürlüğü oldukça düşüktür (Yücel Birol, 2008; Khaliq, 2015). Bununla birlikte 600 °C’de gerçekleştirilen XRD analizi sonucu eser miktarda dönüşmeden kalan elementel titanyum veya bor pikine rastlanmıştır. Şekil 4-b’de ise 650 °C’de gerçekleştirilen sinterleme sonrası numunelerden alınan XRD analizi görülmektedir. Sinterleme sıcaklığının 50 °C artırılması ile intermetalik fazlara ait piklerin yoğunluğunda bir artış olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 4-c’de 700 °C’de sinterlenen numunelerin XRD analizinde intermetalik fazlara ait pik yoğunluklarının arttığı görülmektedir. Bu durum termodinamik açıdan artan sinterleme sıcaklıkları sonucu reaksiyon veriminin artmasından dolayı beklenen bir durumdur.



Şekil 4. Üretilen Tane İncelticilerin XRD Analizi a) 600 °c, b) 650 °c ve c) 700 °c.

Şekil 5'te toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilen tane incelticilerin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 5-a'da Al₂5Ti bileşimine sahip tane inceltici, Şekil 5-b'de Al₂5B bileşimine sahip tane inceltici ve Şekil 5-c'de Al₂5Ti₁B bileşimine sahip tane incelticiler görülmektedir. Görüntülerde TiAl₃ bileşiklerinin çubuksu formda olduğu anlaşılmaktadır. Literatürde gerçekleştirilen benzer çalışmalarda düşük sentezleme sıcaklıklarında TiAl₃ oluşumunun blok yapıları olduğu fakat artan sentezleme sıcaklıklarında çubuksu formda bir oluşma gözlemlendiği belirtilmiştir (Gezer et al., 2010; Li et al., 2003). Yapılan XRD analizinde TiB₂ fazlarına ait pikler tespit edilmiştir. Fakat mikroyapı incelemelerinde bu fazlara ait görüntüler net bir şekilde ayırt edilememiştir. Peeratatsuwan ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada (Peeratatsuwan & Chowwanonthapunya, 2020), ticari olarak kullanılan Al₂5Ti₁B tane incelticilerin içerisinde çok ince olarak TiAl₃ fazları ile birlikte bulunan TiB₂ fazlarının tespit edildiğini rapor edilmiştir. Bu sebeple TiB₂ fazlarının mikroyapı içerisinde ayırt edilmesi oldukça zordur.

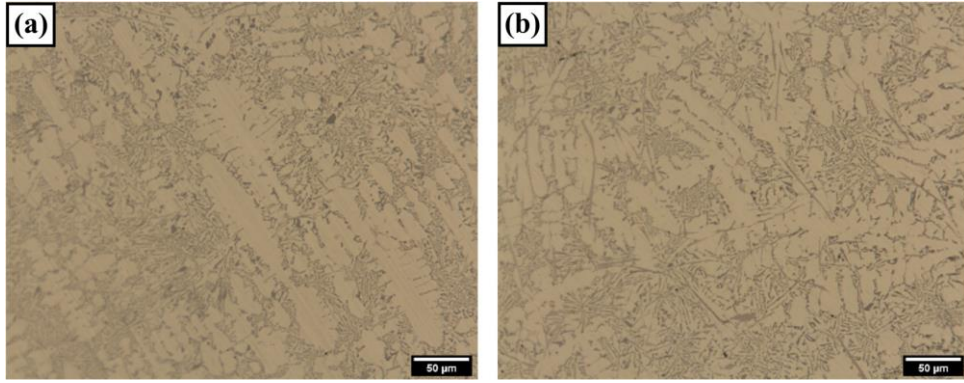
**Şekil 5.** Toz Metalürjisi Yöntemiyle Üretilen Tane İncelticilerin SEM Görüntüsü a) Al₂5Ti b) Al₂5B ve c) Al₂5Ti₁B.

Benzer şekilde TM yöntemi ile üretilen ve bor içeren tane incelticilerde siyah blok yapıları fazların olduğu görülmektedir. Öte yandan toz metalürjisi ile üretilen tane incelticilerde yer alan partiküllerin ticari olarak kullanılan Al₂8B tane incelticinin mikroyapısına benzer olduğu görülmektedir. Bu fazlar üzerinden alınan EDS sonuçlarında yoğun miktarda bor sinyali alındığı görülmektedir. Bu durum blok yapıları koyu renkli fazların XRD analizinde tespit edilen AlB₂ olduğuna işaret etmektedir. Literatürde benzer çalışmalar halojenür tuzların ve B₂O₃'ün çeşitli reaksiyonları sonucu AlB₂ oluşumu gözlenmiştir (Yücel Birol, 2007). TM yöntemi kullanılarak üretilen tane incelticilerin ticari olarak üretilen tane incelticinin mikroyapı görüntülerine benzer şekilde partiküllerin olduğu görülmektedir. Öte yandan yapılan EDS analizinde matris fazda alınan sinyaller, sinterleme sonrası mikroyapıda dönüşmeden kalan elementel tozların varlığını göstermektedir. Bu durum ticari olarak kullanılan tane incelticiye göre başlangıç malzemelerin farklı olmasından ve sinterleme sıcaklıklarının nispeten ticari olarak kullanılan tane incelticinin üretim yöntemine göre düşük olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

3.2. Mikroyapısal İncelemeler

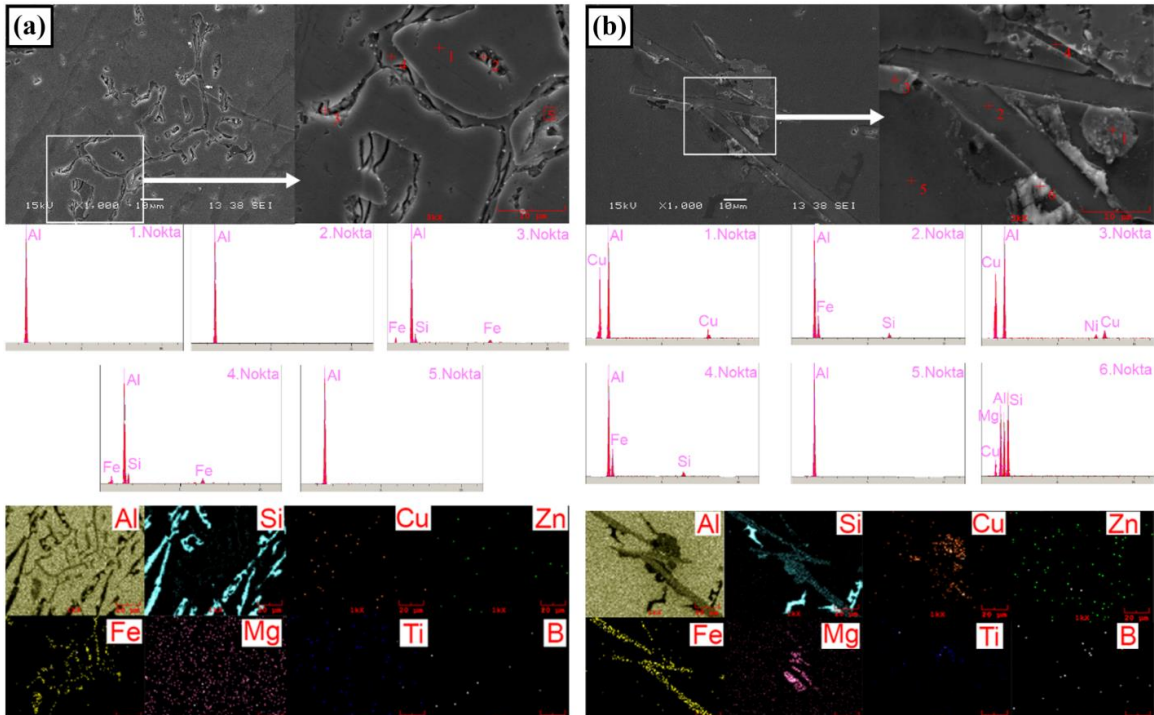
Şekil 6'da referans numunesi olan Etial 180 alaşımına ait optik mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Şekil 6-a'da verilen Etial 180 döküm yapısının dentritik bir katılma sergilediği ve mikroyapı içerisinde çubuksu formda ve blok formda çeşitli yapıların olduğu görülmektedir. Tablo 2'de verilen spektral analiz sonucuna göre alaşımın %9.95 oranında silisyum içerdiği görülmektedir. Ana alaşım elementi silisyum olan Etial180 alaşımında yan alaşım elementleri olarak Zn, Cu, Fe olduğu ve eser miktarda Mg ve Mn olduğu bulunmaktadır. Görüntüde matris faz α -Al+Si, ötektik öncesi silisyum partiküllerine benzer kaba silisyum partikülleri ve ötektik Al-Si olduğu düşünülen fazların bulunduğu görülmektedir. Normalde ağırlıkça %10 silisyum içeren Al-Si alaşımının ötektik öncesi primer silisyum partikülü içermesi beklenmez bununla birlikte katılma şartlarına bağlı bölgesel olarak bu fazlar görülebilmektedir (S. R. Wang et al., 2012). Ayrıca literatürde çin yazısı olarak bilinen ve demir içeren Al-Fe-Si intermetalik yapısı olduğu daha önce çeşitli çalışmalarda rapor edilen mikroyapı görüntülerinin var olduğu anlaşılmaktadır (Başaranel et al., 2015). Yine blok yapıları fazların ise çinko ve bakırın alüminyum ile oluşturduğu intermetalik yapıları olduğu düşünülmektedir. Şekil 7-a'da Etial 180 alaşımın döküm SEM görüntüsü ve aynı bölgenin MAP analizi verilmiştir. SEM görüntüsünde ince uzun çubuksu formdaki fazlardan yoğun silisyum içerdiği anlaşılmaktadır. Bu bölgelerin ötektik silisyum olduğu söylenebilir. Orta bölgede kalan çin yazısı şeklindeki yapıdan ise yoğun demir sinyali ve eser miktarda silisyum sinyali alındığı görülmektedir. Literatürde AlFeSi olarak tanımlanan çin yazısı şekilli intermetaliklerin içerisinde mangani çözebileceği ve eser miktarda mangan içerebileceği rapor edilmiştir (Başaranel et al., 2015). MAP analizinde bakır ve çinkoyu daha kaba partiküllerden aldığı ve bu intermetalik bileşiklerin mikroyapı içerisinde dağıldığı görülmektedir. Yine alaşımın spektral analiz sonucu bileşiminde bulunduğu anlaşılan eser miktardaki magnezyumun bütün mikroyapı içerisinde dağıldığı

görülmektedir. Literatürde Al-Si alaşımları içerisinde bulunan magnezyumun Mg_2Si bileşimini oluşturacağı bildirilmiştir (Başaranel & Saklakoğlu, 2012).



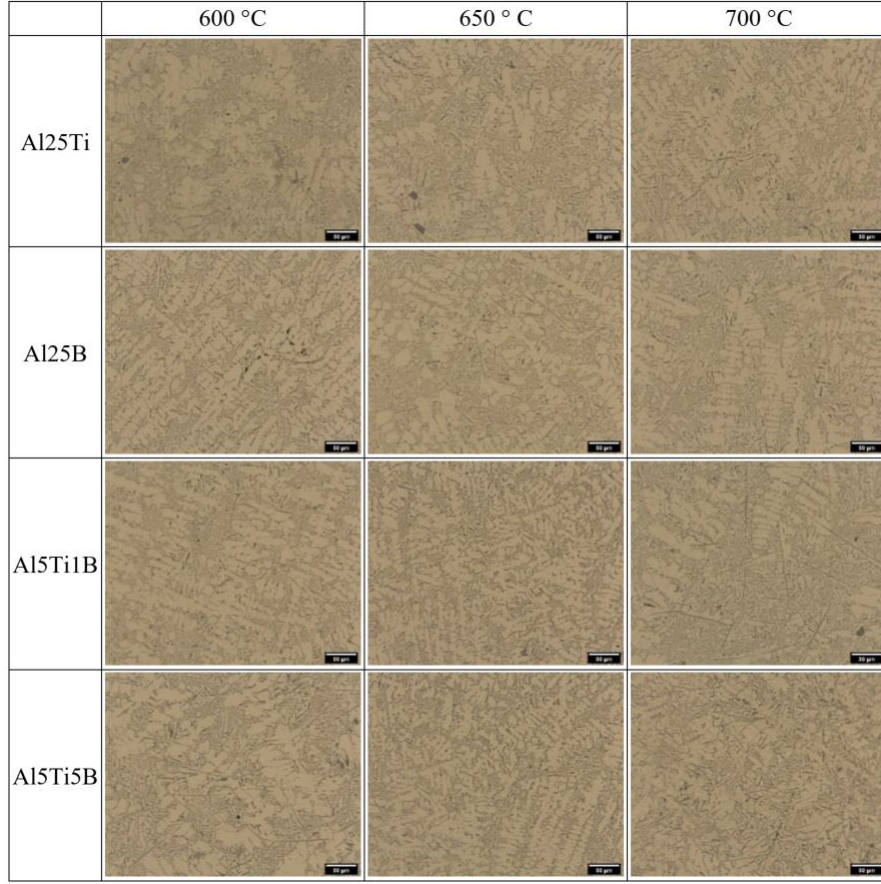
Şekil 6. a)Referans Etial 180 OM Görüntüsü b) Ticari Al5Ti1B İlaveli Numunenin OM Görüntüsü

Şekil 6-b'da Al5Ti1B bileşimine sahip ticari tane inceltici kullanılarak gerçekleştirilen Etial 180 alaşımının optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Tane inceltici ilave edilmeyen Etial 180 döküm mikroyapısına göre ticari olarak kullanılan Al5Ti1B tane incelticinin ilave edilmesi sonrası mikroyapının rafine bir hal aldığı tane boyutunun azaldığı ve aynı zamanda intermetalik yapıların rafine olarak incelendiği anlaşılmaktadır. Ayrıca bu fazların mikroyapı içerisinde dağılımının daha homojen bir görünüm sergilediği görüntüden anlaşılmaktadır. Şekil 7-b'de Al5Ti1B bileşimine sahip ticari tane inceltici kullanılarak gerçekleştiren numunenin SEM görüntüsü, EDS ve MAP analizi verilmiştir. Öte yandan mikroyapı görüntülerinde intermetalik ara fazlar olduğu düşünülen çeşitli morfolojide fazlar bulunmaktadır. Bu fazlar kimyasal bileşime bağlı olarak alüminyum içerisinde oluşması beklenen Al-Fe ve Al-Mg-Si sistemlerine ait intermetalik yapılar olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte tane inceltici ilavesi sonucu SEM görüntüsünde verilen mikroyapıdaki fazlarda önemli bir değişiklik olmadığı ve tane inceltici ilavesi sonucu yapıda çözünmeden kalan TiB_2 gibi fazlar tespit edilememiştir. Döküm mikroyapısında bu fazların ergiyük içerisinde ince boyutlu olarak dağılması bu duruma neden olduğu söylenebilir.



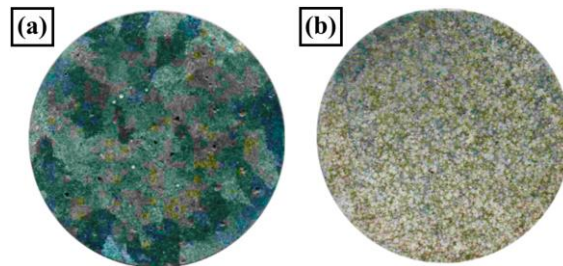
Şekil 7. a) Referans Etial 180 SEM Görüntüsü b) Al5Ti1B Ticari İlaveli SEM Görüntüsü

Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen tane incelticiler ile gerçekleştirilen döküm mikroyapı görüntüleri Şekil 8’de verilmiştir. Görüntülerde mikroyapıların referans numunenin mikroyapısına göre bir miktar daha ince ve daha homojen bir şekilde katlaştığı söylenebilir. Öte yandan mikroyapı görüntülerinde dentrit boylarında kısmi bir azalma ile birlikte dentritler arası ikincil kol mesafesinde bir azalma olduğu görülmektedir. Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen tane incelticiler ile gerçekleştirilen numunelere ait mikroyapı görüntülerinde sinterleme sıcaklığına bağlı olarak mikroyapıdaki fazların daha rafine ve homojen bir yapı oluşturduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 8. Toz metalürjisiyle üretilen tane incelticilerle gerçekleştirilen döküm OM görüntüsü

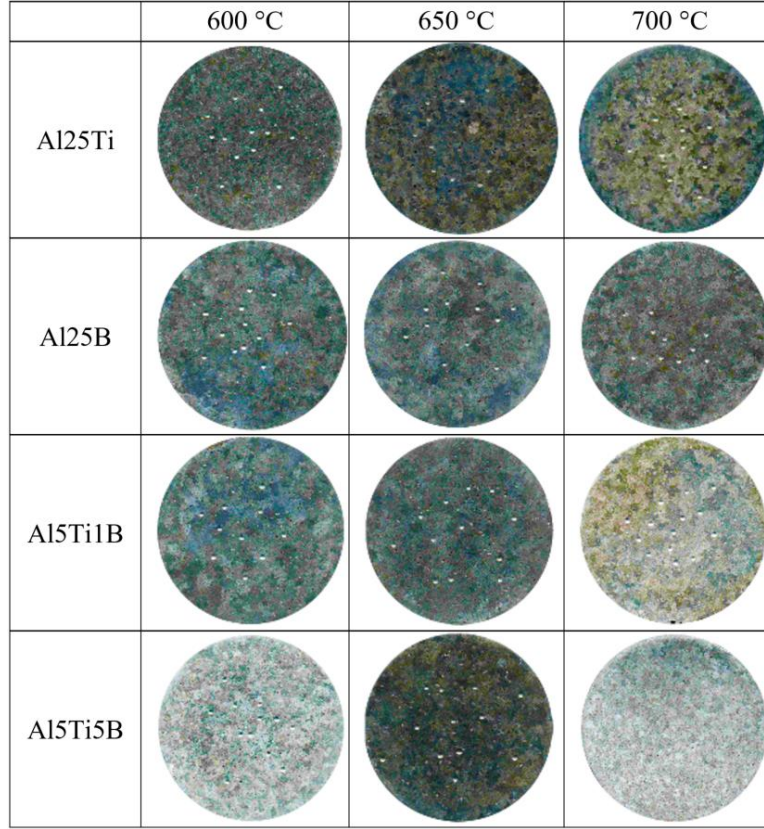
Şekil 9’da tane inceltici ilave edilmeyen referans numune ve ticari olarak kullanılan Al5Ti1B ilave edilmiş dökümlerin kesit tarama görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerdeki tanelerin ortaya çıkması için dağlama gerçekleştirilmiş ve sonrası imaj analiz yöntemi ile taneler renklendirilmiştir. Görüntülerde referans numunenin tane yapısının oldukça büyük olduğu ticari olarak kullanılan Al5Ti1B ilavesi sonrası tanelerin büyük oranda küçüldüğü görülmektedir.



Şekil 9.a) Etial 180 alaşımı mikroyapı görüntüsü **b)** Al5Ti1B ticari tane inceltici ilave edilmiş mikroyapı görünümü

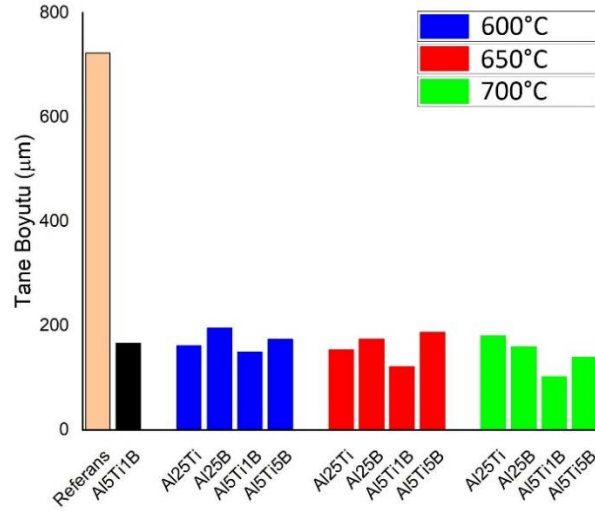
Şekil 10’da toz metalürjisi yöntemi ile üretilen tane incelticilerin döküm sonrası kesit tarama görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde toz metalürjisi yöntemi ile üretilen tane incelticilerin tane inceltme performansının oldukça iyi olduğu ve Şekil 9-a’da verilen referans numuneye ait tarama kesit görüntüsüne nazaran tane boyutunda önemli seviyede azalma olduğu anlaşılmaktadır. Ergiyik alaşım

içerisine tane inceltici ilavesi sonrası Tane incelticinin mikroyapısında bulunan $TiAl_3$, AlB_2 ve TiB_2 gibi intermetalik partiküller heterojen çekirdeklenme merkezi olarak davranarak alaşımın daha ince taneli olarak katılaşmasına neden olmaktadır (M. Çolak & Dışınar, 2017).



Şekil 10. Toz Metalürjisi Yöntemi İle Üretilen Tane İncelticilerin Döküm Sonrası Kesit Tarama Görüntüleri.

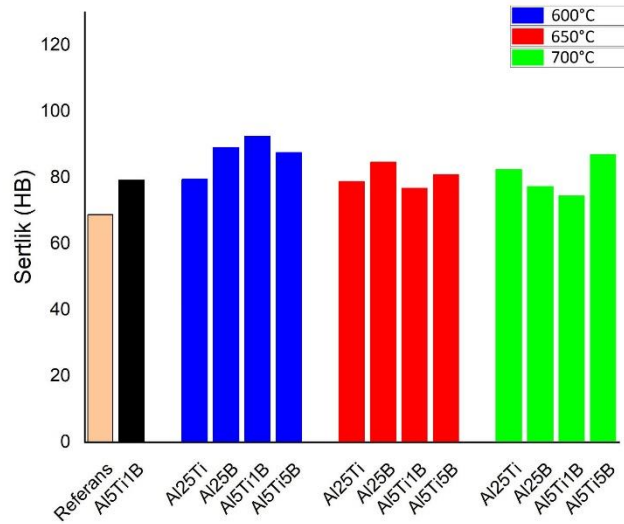
Şekil 11’de döküm parçalara gerçekleştirilen tane boyut ölçüm sonuçları verilmiştir. Referans numunenin tane boyutu ergiyik alaşıma ticari tane inceltici ilavesi sonrası yaklaşık ~%80 oranında azalmıştır. Toz metalürjisi ile üretilen numunelerin tane boyutu ise ticari olarak kullanılan Al5Ti1B tane incelticiye benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Çalışmada en düşük tane boyutu 700 °C’de sinterlenen Al5Ti1B bileşime sahip tane inceltici ile elde edilmiştir. Öte yandan sinterleme sıcaklığının tane inceltme üzerinde kısmen etkili olduğu ve artan sinterleme sıcaklığı ile tane inceltme performansının arttığı söylenebilir. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen tane incelticilerde Al25Ti bileşimine sahip tane incelticinin düşük sinterleme sıcaklıklarında tane inceltme performansının artan sinterleme sıcaklığında ise tane inceltme performansının nispeten azaldığı söylenebilir. Bu durum Al25Ti bileşimli tane incelticinin sinterlenmesi sonucu oluşan $TiAl_3$ bileşiklerinin sıvı metal içerisinde çözünebilir (Murat Çolak & Kayıkcı, 2009; McCartney, 1989) olmasından ileri geldiği ve yüksek sıcaklıklarda sinterlenen tane incelticilerin çözünmeye daha elverişli olabileceği şeklinde yorumlanabilir. Al25B bileşimli tane incelticilerin ise tane inceltme performansının daha zayıf olduğu görülmektedir. AlB_2 intermetalik fazı ergiyik içerisinde çözünmeyen kalmaktadır. Bununla birlikte artan sinterleme sıcaklığı ile tane incelticilerde bulunan AlB_2 fazı artmaktadır ve tane incelticide artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak tane boyutunda azalma olduğu anlaşılmıştır. AlB_2 ’nin özellikle silisyum içeren alaşımlarda SiB_6 adında bir ara tabaka oluşturarak çekirdeklenmeyi kolaylaştırdığı bilinmektedir (Yağcı et al., 2021). Çalışmada ki en düşük tane boyutu bütün sinterleme sıcaklıkları için Al5Ti1B esaslı tane inceltici ile elde edilmiştir. Bu durum Al5Ti1B esaslı tane incelticilerde rastlanan $TiAl_3$, AlB_2 ve TiB_2 intermetalik bileşiklerinin hepsinin tane inceltmede rol almasından ileri geldiği söylenebilir. Öte yandan Al5Ti5B bileşimli tane incelticilerde ise artan bor miktarı sonucu TiB_2 intermetalik bileşiğinin arttığı Şekil 4’te verilen XRD analizi sonucu anlaşılmaktadır. Bu durum TiB_2 ’nin tane inceltme performansının nispeten diğer intermetalik bileşiklere göre daha zayıf olduğuna işaret etmektedir. Ayrıca sıvı metal içerisinde çözünmeyen kalan TiB_2 intermetalik bileşiklerinin ergiyik içerisinde yüzebileceği bilinmektedir ve bu durum homojen olmayan bir tane inceltici dağılımına neden olabilecektir. Literatürde intermetalik fazların homojen bir şekilde dağılım göstermesi etkili bir tane inceltme sağlayacağı rapor edilmiştir (Arslan et al., 2019).



Şekil 11. Döküm Parçalara Gerçekleştirilen Tane Boyutu Ölçüm Sonuçları.

3.3. Sertlik İncelemeleri

Şekil 12’de döküm numunelerin kesitlerinden alınan Brinell sertlik ölçüm sonuçları görülmektedir. Sonuçlara toz metalürjisi ile üretilen tane incelticilerin sertlik değerini referans numune kadar artırdığı ve ticari olarak kullanılan Al5Ti1B ile benzer sertlik değerleri elde edildiğini göstermektedir. Sertlik sonucu döküm alaşımın hem tane boyutu hem de oluşan intermetalik faz yoğunluğu ile ilgilidir. Bu sebeple sertlik sonuçlarında doğrusal bir değişim elde edilememiştir. Bununla birlikte sıvı alaşım içerisinde çözülmemeyen AlB₂ tip intermetalik içeren tane incelticilerin döküm sonrası sertlik değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca Toz metalürjisi ile üretilen numunelerde AlB₂ intermetalik yoğunluğu fazla olan Al25B bileşimine sahip tane incelticilerin sertlik değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Cibula (Cibula, 1972) tane inceltici alaşımların kullanılması ergiyik alümiyum içerisinde intermetalik fazların oluştuğunu tespit etmiştir. Ergiyik içerisinde AlB₂, TiB₂ and TiAl₃ intermetalikleri sertlik değerini arttırdığını savunmuştur. Bu durum Şekil 11’de verilen nsertlik değerleri ile paralellik göstermekle birlikte çözünen veya yarı çözünen intermetalik bileşiklerin sertlik sonuçlarında dalgalanmalara sebep olabileceğine işaret etmektedir.



Şekil 12. Döküm Numunelerin Kesitlerinden Alınan Brinell Sertlik Ölçüm Sonuçları.

4. Sonuç

Çalışmada toz metalürjisi yöntemi ile farklı bileşimlere sahip tane incelticiler üretilmiş ve farklı sıcaklıklarda sinterlenmiştir. Etial180 alaşımı üzerindeki tane inceltme performansı incelenmiş ve ticari olarak kullanılan Al5Ti1B tane inceltici ile kıyaslanmıştır. Sonuçlar toz metalürjisi yöntemi ile tane incelticinin üretililebileceğini ve tane inceltmede etkili bir performans sergileyeceğini göstermiştir. Toz metalürjisi ile üretilen tane incelticilerin tane boyutunu alaşımın döküm durumuna göre yaklaşık ~%80 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Toz metalürjisi üretilen tane incelticilerin içerisinde en düşük tane boyutu 700 °C’de sinterlenen Al5Ti1B bileşimine sahip tane inceltici olduğu görülmüştür. Ölçülen bu tane boyutu değerlerinin, döküm alaşım içerisine ilave edilen ticari Al5Ti1B tane inceltici ile elde tane boyutu ile paralellik gösterdiği anlaşılmıştır. Ayrıca toz metalürjisi yöntemi ile üretilen tane incelticilerin döküm alaşımın sertliğini referans numuneye göre artırdığını ve ticari olarak kullanılan tane inceltici ile benzer sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir. Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen tane incelticiler içerisinde en yüksek sertlik değeri 700 °C’de sinterlenen Al5Ti1B bileşimine sahip tane incelticide ölçülmüştür.

5. Teşekkür Bölümü

Bu çalışmayı finansal olarak destekleyen Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü 2019-733386352019-73338635 nolu projesine teşekkürlerimizi sunarız.

Referanslar

- Arslan, İ., Gavgalı, E., & Çolak, M. (2019). Kum Kalıba Dökülen Farklı Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Al5Ti1B ve AL10SR İlavesinin Mikroyapı Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(2), 237–244. <https://doi.org/10.21541/apjes.424920>
- Bahadır, A. (2021). *Ötektik Alüminyum-Silisyum Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Titanyum-Bor İlavesinin Etkisi*. Karabük Üniversitesi.
- Başaranel, M., & Saklakoğlu, N. (2012). Eser Miktarda Mg ve Sn İlavesinin Etial 180 Alüminyum Alaşımına Etkilerinin İncelenmesi. *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 1(8), 61–65.
- Başaranel, M., Saklakoğlu, N., & İrizalp, S. G. (2015). Etial 180 Alüminyum Alaşımına İlave Edilen Mg ve Sn Elementlerinin İntermetalik Fazlara Etkisi - The Influence of Sn And Mg Contents on the Intermetallic Phases of Etial 180 Alloy. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 17–24. <http://dergipark.gov.tr/cbayarfb/issue/4056/53423>
- Batalu, D., Coşmeleață, G., & Aloman, A. (2006). Critical analysis of the Ti-Al phase diagrams. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, 68(4), 77–90.
- Batool, S. A., Wadood, A., & Rehman, M. A. U. (2019). Comparison of aluminum based alloys reinforced with intermetallic developed by powder metallurgy and arc melting routes. *Soldagem e Inspecao*, 24, 1–11. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.19>
- Birol, Yücel. (2009). Al–Ti–B grain refiners via powder metallurgy processing of Al/K2TiF6/KBF4 powder blends. *Journal of Alloys and Compounds*, 480(2), 311–314. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.01.091>
- Birol, Yücel. (2007). Production of Al–Ti–B grain refining master alloys from B2O3 and K2TiF6. *Journal of Alloys and Compounds*, 443(1), 94–98. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.10.009>
- Birol, Yücel. (2008). Production of Al-Ti-B grain refining master alloys from Na2B4O7 and K2TiF6. *Journal of Alloys and Compounds*, 458(1–2), 271–276. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.04.036>
- Bolzoni, L., & Hari Babu, N. (2020). On the grain refining efficacy of Ti-free hypoeutectic AlSi via AlTiB, AlB and AlNbB chemical inoculation. *Journal of Alloys and Compounds*, 817, 152807. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152807>
- Cibula, A. (1972). Discussion of “the mechanisms of grain refinement in dilute aluminum alloys”*. *Metallurgical Transactions*, 3(3), 751–753. <https://doi.org/10.1007/BF02642770>
- Çolak, M., & Dışpınar, D. (2017). Taguchi Approach for Optimization of Parameters that Effect Grain Size of Cast A357 Alloy. *Archives of Foundry Engineering*, 17(4), 35–42. <https://doi.org/10.1515/afe-2017-0127>
- Çolak, Murat. (2020). Tane İnceltici ve Modifiye Edici İlaveli Ötektik Al-Si Alaşımının Kum Kalıba Dökümünde Modelleme Teknikleri İle Kritik Katı Oranının Belirlenmesi. *TURAN : Stratejik Arastirmalar Merkezi*, 12(48), 541–548.

<https://doi.org/DOI:10.15189/1308-8041>

- Çolak, Murat, & Kayıkcı, R. (2009). Alüminyum Dökümlerinde Tane İnceltme. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1.Sayı), 11–17.
- Davies, I. G., Dennis, J. M., & Hellawell, A. (1970). The nucleation of aluminum grains in alloys of aluminum with titanium and boron. *Metallurgical Transactions*, 1(1), 275–280. <https://doi.org/10.1007/BF02819272>
- Eser, U. A. (2019). *Alümiyum ve Silisyum Alaşımlarında Bor İle Tane İnceltme*. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Gezer, B. T., Toptan, F., Daglılar, S., & Kerti, I. (2010). Production of Al–Ti–C grain refiners with the addition of elemental carbon. *Materials & Design*, 31, S30–S35. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.09.002>
- Gül, F. (2014). AlSi10Mg Döküm Alaşımlarının Bazı Mekanik Özellikleri Üzerine İkincil Yaşlandırma İşleminin Etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(1), 30–37.
- Kayıkcı, R., Colak, M., Sirin, S., Kocaman, E., & Akar, N. (2015). Determination of the critical fraction of solid during the solidification of a PM-cast aluminium alloy. *Materiali in Tehnologije*, 49(5), 797–800. <https://doi.org/10.17222/mit.2014.266>
- Khaliq, A. (2015). Analysis of Boron Treatment using AlB₂ and AlB₁₂-based Alloys. *Light Metals*, January.
- Li, P., Kandalova, E. G., Nikitin, V. I., Luts, A. R., Makarenko, A. G., & Zhang, Y. (2003). Effect of fluxes on structure formation of SHS Al–Ti–B grain refiner. *Materials Letters*, 57(22), 3694–3698. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00163-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00163-0)
- McCartney, D. G. (1989). Grain refining of aluminium and its alloys using inoculants. *International Materials Reviews*, 34(1), 247–260. <https://doi.org/10.1179/imr.1989.34.1.247>
- Murty, B. S., Kori, S. A., & Chakraborty, M. (2002). *Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying*. 1, 3–29.
- Naglič, I., Smolej, A., Doberšek, M., & Mrvar, P. (2008). The influence of TiB₂ particles on the effectiveness of Al–3Ti–0.15C grain refiner. *Materials Characterization*, 59(10), 1458–1465. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.01.008>
- Peeratatsuwana, C., & Chowwanonthapunya, T. (2020). Investigation of the grain refining performance of Al–5Ti–1B master alloy on the recycling process of A356 alloy. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 51(10), 1346–1352. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/mawe.201900210>
- Qiu, D., Taylor, J. A., Zhang, M. X., & Kelly, P. M. (2007). A mechanism for the poisoning effect of silicon on the grain refinement of Al–Si alloys. *Acta Materialia*, 55(4), 1447–1456. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.09.046>
- Quested, T. E., Dinsdale, A. T., & Greer, A. L. (2006). Thermodynamic evidence for a poisoning mechanism in the Al–Si–Ti system. *Materials Science and Technology*, 22(9), 1126–1134. <https://doi.org/10.1179/174328406X114234>
- Samuel, A. M., Mohamed, S. S., Doty, H. W., Valtierra, S., & Samuel, F. H. (2018). Effect of melt temperature on the effectiveness of the grain refining in Al–Si castings. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/7626219>
- Savaş, Ö., Kayıkcı, R., & Köksal, S. (2012). Application of Taguchi Method to Investigate the Effect of Some Factors on In-Situ Formed Flake Structures of AL/ALB₂ Composite. *Advanced Composites Letters*, 21(2), 096369351202100202. <https://doi.org/10.1177/096369351202100202>
- Savaş, Ömer, & Kayıkcı, R. (2013). A Taguchi optimisation for production of Al–B master alloys using boron oxide. *Journal of Alloys and Compounds*, 580, 232–238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.05.112>
- Şenel, L. (2004). *Al-Si döküm alaşımlarının sıkıştırma döküm yöntemi ile mikroyapı ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi*. Gazi Üniversitesi.
- Sigworth, G. K., & Kuhn, T. A. (2007). *Grain refinement of aluminum casting alloys*.
- Teke, Çolak, M., Taş, M., & İpek, M. (2019). Modeling of the impact of initial mold temperature, Al5Ti1B and Al10Sr additions on the critical fraction of solid in die casting of aluminum alloys using fuzzy expert system. *Acta Physica Polonica A*, 135(5), 1105–1107. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.135.1105>

Wang, S. R., Ma, R., Wang, Y. Z., Wang, Y., & Yang, L. Y. (2012). Growth mechanism of primary silicon in cast hypoeutectic Al-Si alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 22(6), 1264–1269. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61314-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61314-9)

Wang, X. (2005). The formation of AlB₂ in an Al–B master alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 403(1), 283–287. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.04.204>

Yağcı, T., Cöcen, Ü., Çulha, O., & Korkmaz, A. (2021). Alüminyum Döküm Alaşımlarına Dair Son Yillardaki Akademik ve Endüstriyel Gelişmelere Genel Bakış ve Değerlendirme. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 1191–1210. <https://doi.org/10.17482/uumfd.882586>

Yuan, L., Han, J., Liu, J., & Jiang, Z. (2016). Mechanical properties and tribological behavior of aluminum matrix composites reinforced with in-situ AlB₂ particles. *Tribology International*, 98, 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.01.046>



Yerli Borlama Ajanı ile Yüzeyi Sertleştirilen AISI 1020 Çeliğinin İç Yapı ve Sertlik Davranışlarının İncelenmesi

Investigation of Microstructure and Hardness Behaviors of AISI 1020 Steel Surface Hardened with Local Boronizing Agent

Büyüamin Yamanel¹ , Osman Bican^{1*} , S. Uğur Bayça² 

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

²Kırıkkale Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 13/09/2022

Kabul / Accepted: 05/10/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Bu çalışmada AISI 1020 çeliği 950 °C sıcaklıkta Baybora-2 borlama ajanı kullanılarak 2, 4 ve 6 saat sürelerde kutu borlama işlemine tabi tutulmuştur. Deney numunelerinin içyapıları optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Borlama neticesinde yüzeyde oluşan borür tabakasının kalınlık ve sertliği Mikrovickers sertlik ölçme cihazı yardımıyla tespit edilmiştir. AISI 1020 çeliğinin içyapısının ferrit ve perlit yapılarından oluştuğu tespit edilmiştir. Bor tabakasının kalınlığının artan borlama süresi ile arttığı belirlenmiştir. Yapılan borlama işlemi neticesinde sertlik değerlerinde yaklaşık 13 katlık bir artış meydana gelmiştir. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek sertlik değerleri 4 saatlik borlama neticesinde 2224 HV0,05 olarak ölçülmüştür. Ayrıca en fazla borür tabakası kalınlığı 6 saatlik borlama neticesinde 196,3µm olarak ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler

“AISI 1020, Borlama, Sertlik, İç Yapı, Optik”

Abstract

In this study, AISI 1020 steel was subjected to solid boronizing process at 950 °C using local Baybora -2 boronizing powder for 2, 4 and 6 hours. The internal structures of the samples were examined using an optical microscope. The thickness and hardness values of the boron layers formed on the surface as a result of boriding were determined by using Mikrovickers hardness measuring device. It has been determined that the internal structure of AISI 1020 steel consists of ferrite and pearlite structures. It was determined that the thickness of the boron layer increased with increasing boriding time. As a result of the applied boriding process, an increase of approximately 13 times has occurred in the hardness values. As a result of the experiments, the highest hardness values were measured as 2224 Hv0.05 after 4 hours of boriding. In addition, the largest boride layer was measured as 196.3µm after 6 hours of boriding.

Key Words

“AISI 1020, Boronizing, Hardness, Internal structure, Optical”

1.GİRİŞ

Makine parçalarında korozyon ve aşınmaya bağlı olarak önemli kayıplar meydana gelmektedir. Bu kayıpları engellemenin yolu malzeme yüzeylerinin iyileştirilmesidir. Yüzey işlemleri malzemelerin tribolojik özellikleri, oksidasyon, korozyon direnci ve yüksek sertlik kazanımıyla aşınmaya karşı korunmasında önemlidir (Castillejo FE vd. 2014). Sementasyon (Yada K vd. 2013) nitrürleme (Almeida EAS vd. 2015; Kumar A vd. 2014) ve borlama (Campos I vd. 2007; Piasecki A vd. 2016) yüzey iyileştirmek için en çok kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemlerden biri de borlama işlemidir (Meriç vd. 2006). Borlama işlemi borun yüksek sıcaklıkta malzeme yüzeyine difüzyonu şeklinde gerçekleşen termokimyasal bir yüzey kaplama işlemidir. Borlama yöntemleri içerisinde daha çok tercih edilen yöntem maliyet ve ekipman kolaylığı nedeniyle kutu borlamadır (Atik vd.2003; Özbek vd.2004; Bejar ve Moreno 2006; Çelikyürek vd. 2006; Ozdemir vd. 2009). Kutu borlama ile yüzey sertleştirme endüstride oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Atik vd. 2003).

Borlama işleminde diğer sertleştirme yöntemlerinden sementasyon ve nitrürlemeye oranla daha yüksek sertlik elde edilir (Baştürk vd. 2006). Borlama ile ilgili yapılan bir çalışmada sertlik değerinin 2000HV' ye kadar çıktığı görülmüştür (Çelikyürek vd. 2006). Borlama ile yüksek aşınma ve korozyon direnci sağlanır. Karmaşık şekilli parçalara uygulanması ve elde edilen yüksek sertlik nedeniyle malzeme ömrünü artırır. Birçok malzeme çeşidine; demir ihtiva eden malzemelere, demir içermeyen malzemelere uygulanabilir. Genellikle 850-1050°C sıcaklıklarda ve 1-12 saat süreyle uygulanabilir (Sinha vd. 1991). Borlama işlemi neticesinde malzeme yüzeyinde oluşan borür tabakası malzemenin aşınma davranışını iyileştirir (Maragoudakis vd. 2002). Yüzeyde oluşan bu borür tabakasının özellikleri çok yüksek sertlik değerlerine (1400-5000°C) ve ergime noktasına (1450-1550°C) sahip olmasıdır (Sinha vd. 1991; Maragoudakis vd.2002). Borlama işlemi difüzyon mekanizmasına bağlı bir işlem olduğu için sıcaklıkla beraber yüzeyde oluşan borür fazları büyümektedir. Borlama neticesinde yüzeyde bor içeren tabaka meydana gelir. Ortaya çıkan bu tabaka içinde ya Fe_2B ya da Fe_2B+FeB fazları birlikte bulunabilir. Yapıda FeB fazı gevrek ve iç gerilmelere sebep olduğu için istenmemektedir (Selçuk vd,1995). FeB ve Fe_2B fazları basma ve çekme gerilmeleri uyguladığı için malzeme yüzeyinde çatlaklara sebep olmaktadır. Bu nedenle tek faz Fe_2B yapısı istenmektedir (Özbek, 1999;Karamış vd.1995). Borlama işlemi için kullanılan malzemenin yapısına bağlı olarak sertlik değeri değişebilir (Göy,1984; Reddy A. V., 2004). Düşük alaşıma sahip çelikler uygun maliyetleri, kolay bulunabilmeleri ve çok yönlü kullanımlarından dolayı büyük öneme sahiptir. Yüksek alaşımlı çelikler içerdikleri alaşımlar nedeniyle bu çeliklere oranla pahalıdır. Yüzey işlemleri sayesinde düşük alaşımlı çeliklerin yüzeyleri iyileştirilebilir (Beliardouh NE vd. 2014).

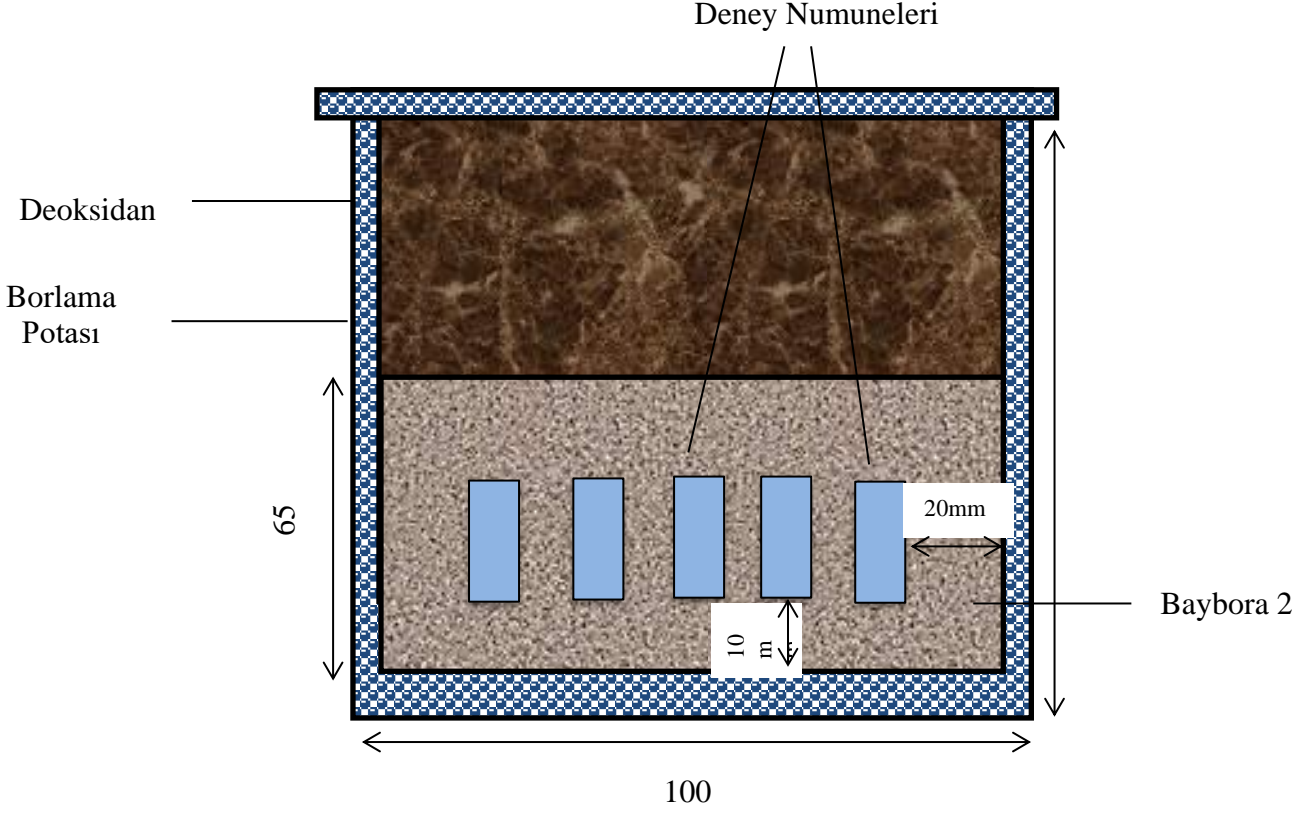
Bu çalışmada sertleştirilmemiş büyük kesitli takım tezgâhları ana milleri, orta sertlikte ve aşınmaya dayanıklı dişlilerde, sertleştirilmiş pimler ve zincirler başta olmak üzere piyasada çok yaygın olarak kullanılan AISI 1020 çeliği tercih edilmiştir. AISI 1020 çeliğine farklı sürelerde yerli borlama tozu kullanılarak katı borlama işlemi uygulanmış ve çeliğin yapısal ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.

2.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1.Kimyasal bileşim ve İyapı İncelemesi

Öncelikli olarak deney aşamalarında kullanılmak üzere piyasadaki AISI 1020 çeliği numuneler temin edilmiştir. Üniversal torna tezgahı yardımıyla silindirik şeklindeki numuneler $\phi 14 \times 20$ mm olacak şekilde işlenmiştir. Deney aşamaları için hazır hale getirilen numunelerin kimyasal bileşimini belirlemek için optik emisyon argon spektrometresi kullanılmıştır. Katı borlama işlemi 950°C sıcaklıkta ve 2, 4 ve 6 saatlik üç farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Katı borlama prosesi için Şekil 1 de şematik resmi verilen paslanmaz çelikten imal edilen pota kullanılmıştır. Bu çalışmada, yerli ve patentli Baybora-2 (Bayça, 2020) borlama tozu kullanılmıştır.

Borlama deneyinde, 6 adet deney numunesi 400 gr Baybora-2 tozu ile kapatılmıştır. Pota içerisinde kalan kısım ekrit malzeme ile doldurularak potanın ağız sıkı şekilde kapatılmıştır. 4,3 kW güce sahip bir ısıtma işlemi fırını kullanılarak katı borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Fırın sıcaklığı 950 °C sıcaklığa ulaştıktan sonra 2, 4 ve 6 saat sürelerde beklenerek borlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemi tamamlandıktan sonra borlama potası ısıtma fırınından çıkartılarak durgun havada soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan pota içerisinden numunelere Tablo 1 de gösterilen kodlar verilmiştir. Deney numuneleri kesme cihazı yardımıyla kesilmiş ve bakalit alma cihazı yardımıyla bakalite alınmıştır. Sonrasında numuneler sırayla 240, 400, 600, 800 ve 1000 mesh aşındırıcı kağıtlar ile zımparalanmıştır. Yüzey parlatma işlemi 9 μm , 6 μm , 3 μm ve 1 μm luk solüsyonlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemi % 2'lik nital çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dağlama sonrasında numuneler etil alkol yardımıyla temizlenip Nikon Eclipse MA 100 Markalı mikroskop kullanılarak iyapı incelemeleri yapılmıştır.



Şekil 1. Borlama Potası

Tablo 1. Borlama grubu

NUMUNE KODU	MALZEME	İŞLEM SICAKLIĞI(°C)	İŞLEM SÜRESİ(Saat)
B-2		950	2
B-4	AISI 1020	950	4
B-6		950	6

2.2.Mekanik Testler

950°C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerde kutu borlama işlemine tabi tutulmuş AISI 1020 çeliğinin sertlik ölçümleri yüzey altı boyunca incelenmiştir. Sertlik ölçümlerinde K.Ü Mühendislik – Mimarlık fakültesi metalografi laboratuvarında bulunan Durometria markalı sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Ölçümler en dış kısımdan başlayarak 50 µm'lik aralıklarla 50 gr yük altında uygulanmıştır. Her bir deney numunesi için 5 ölçüm yapıp ortalamaları alınmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışma

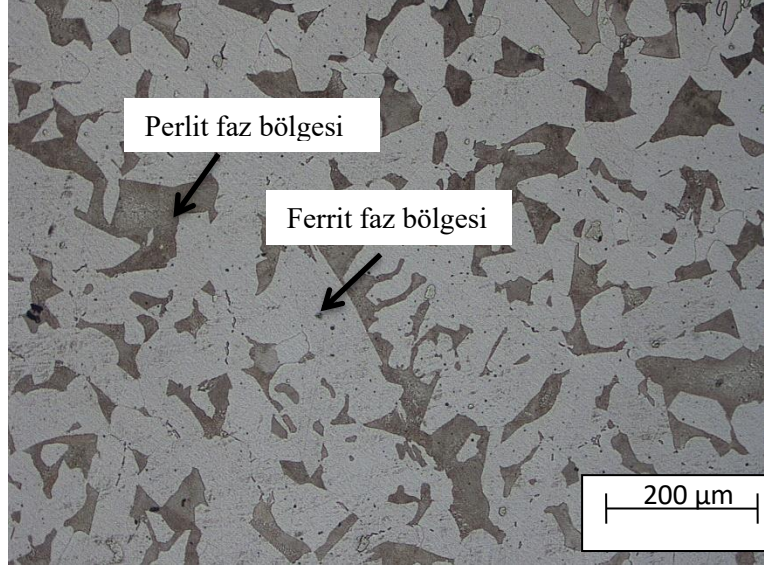
Tablo 2' de deneylerde kullanılan AISI 1020 çeliğinin kimyasal bileşim verilmiştir. AISI 1020 çeliğinin kimyasal bileşimi deney aşamalarından önce argon optik emisyon spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir.

Tablo 2. AISI 1020 Çeliğine Ait Kimyasal Bileşim

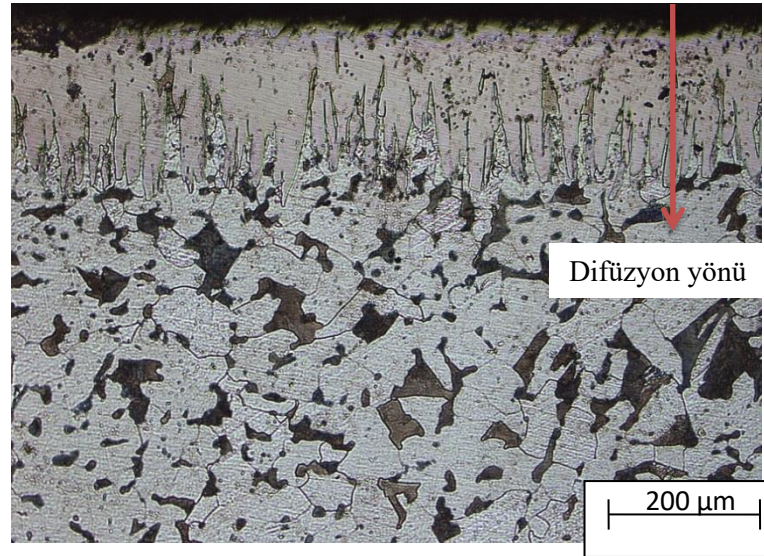
%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Fe
0,215	0,45	0,045	0,045	0,4	-	98,845

3.1. İç Yapı İncelemeleri

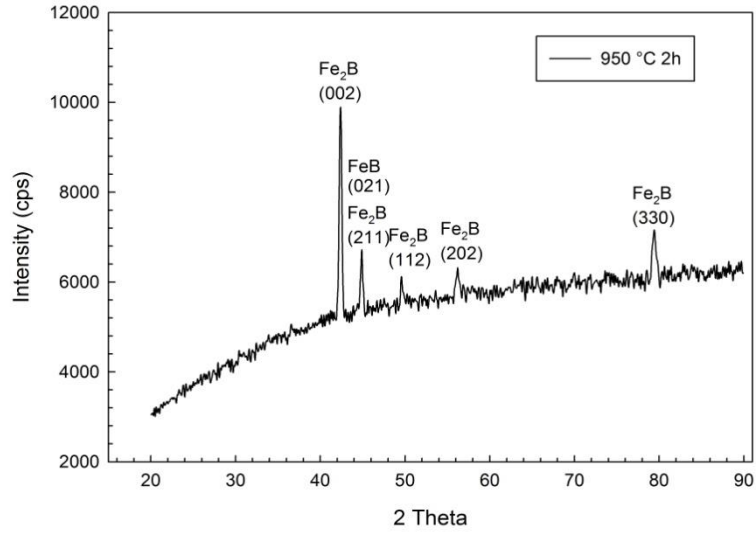
Borlama işlemine tabi tutulmamış dökülmüş durumda bulunan AISI 1020 çeliğine ait içyapı görüntüsü optik mikroskop kullanılarak elde edilmiştir. İçyapının perlit ve ferrit faz bölgelerinden oluştuğu belirlenmiştir.



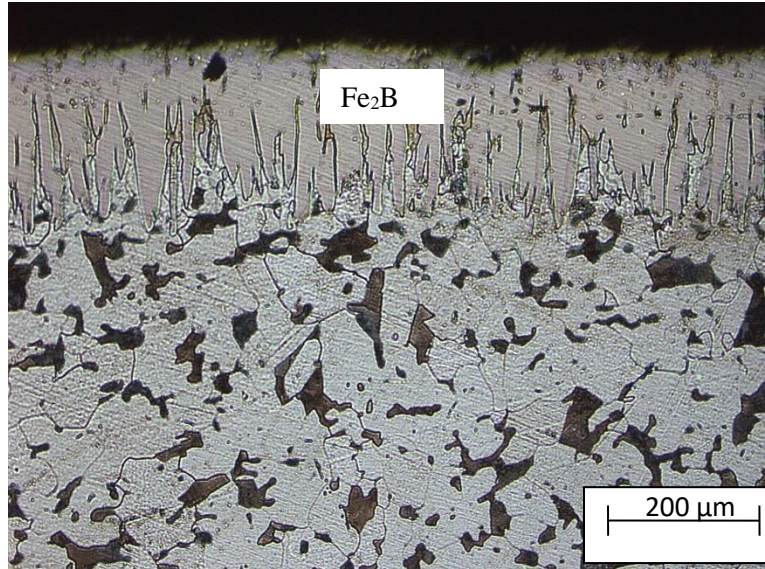
Şekil 2. İşlem görmemiş AISI 1020 çeliğinin optik görüntüsü



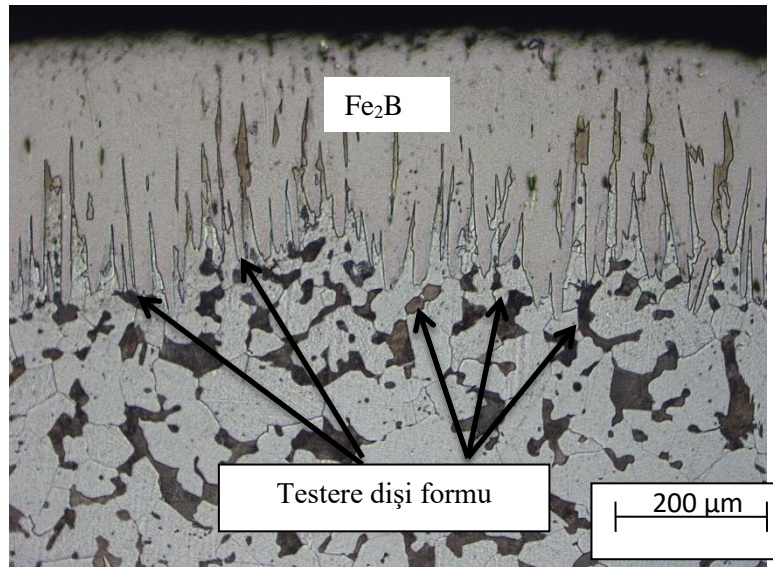
Şekil 3a. B2 Numunesine Ait Optik Görüntü



Şekil 3b. B2 Numunesine Ait XRD analizi



Şekil 4. B4 Numunesine Ait Optik Görüntü



Şekil 5. B6 Numunesine Ait Optik Görüntü

950 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat yerli borlama tozu ile borlanmış AISI 1020 çeliğine ait numunelerin optik görüntüleri ve XRD analizi Şekil 3a-b, Şekil 4 ve Şekil 5' de verilmiştir. Numunelerin iç yapılarının ferrit(beyaz bölgeler), perlit(koyu bölgeler) ve yüzeyde meydana gelen borür tabakalarından oluştuğu gözlenmiştir. Borlama işlemi difüzyon mekanizmasıyla gerçekleşen bir termokimyasal işlemidir. Yüzeyde sıcaklık yardımıyla ilk borür çekirdeğinin oluşumu ile başlar. Oluşan borür çekirdeğinin numune yüzeyinden içeri doğru hareket etmesi sayesinde yüzeyde borür tabakası meydana gelmektedir. Oluşan borür tabaka kalınlığını sıcaklık ve süre parametreleri etkilemektedir. Artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak malzemenin yüzey kısmından içeri doğru olan difüzyon miktarı artmaktadır. Difüzyon miktarının artışına bağlı olarak yüzeyde meydana gelen borür tabakası kalınlığı artmaktadır. Bu çalışmada artan borlama süresine bağlı olarak yüzeyde meydana gelen borür tabaka kalınlığı artmıştır. Meydana gelen bu borür tabakası testere dişi formunda ya da düz bir formda olabilir. Çelik içerisinde alaşım miktarı arttıkça borür tabakası testere dişi formundan düz forma geçmektedir. Borür tabakası içerisinde farklı ısıl genişleme katsayılarına sahip FeB ve Fe₂B fazları oluşmaktadır. İlk oluşan faz bor elementi ile bileşik oluşturma eğilimi fazla olan Fe₂B fazı sonra ise ortamda bor elementinin olması durumunda oluşan FeB fazıdır. Bunlardan sertlik değeri daha fazla olan ama daha kırılmalı olan yapı FeB fazı iken aşınmaya dayanıklı olan daha mukavim olan faz ise Fe₂B'dir. İkisinin birlikte borür tabakasında olması aşınma direncini azaltacağı için tek fazlı Fe₂B fazı istenmektedir. Bu çalışmada katı borlama neticesinde yüzeyde oluşan borür tabakası testere dişi formunda oluşmuştur. Bu durumun kullanılan çeliğin düşük karbonlu ve alaşımsız çelik olmasından dolayı oluştuğu söylenebilir. Borür tabakasında Fe₂B tek fazlı yapı oluşmuştur. Artan borlama süresi ile beraber meydana gelen testere dişleri büyümüş ve ana matrise yapışmıştır.

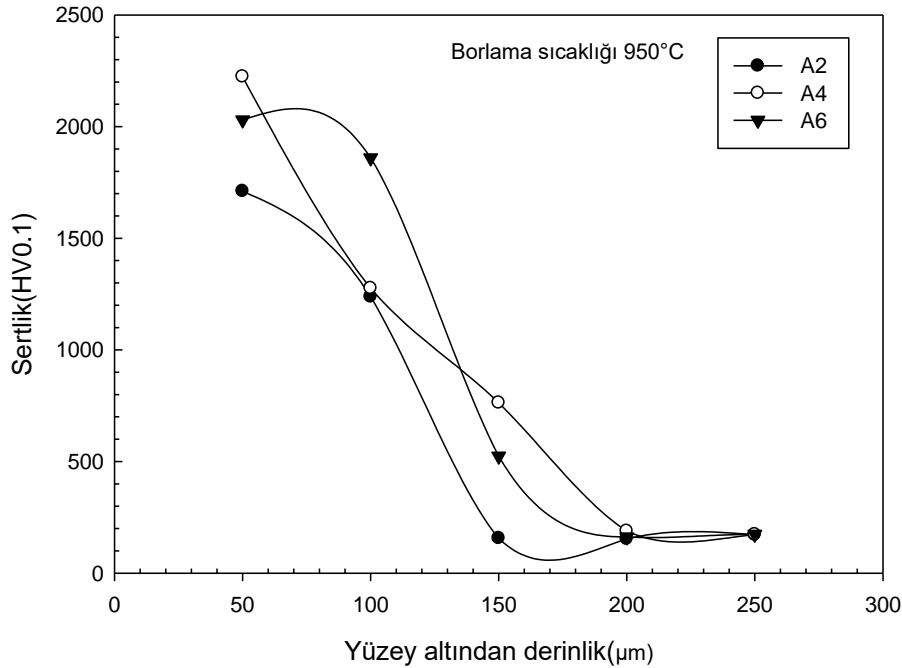
3.2.Mekanik Testler

Yerli Baybora-2 tozu ile 950°C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat kutu borlama işlemine tabi tutulmuş AISI 1020 çeliğine ait numunelere ait yüzey altında meydana gelen sertliğin yüzey kısmından içeri doğru değişimleri Şekil 6' da verilmiştir.

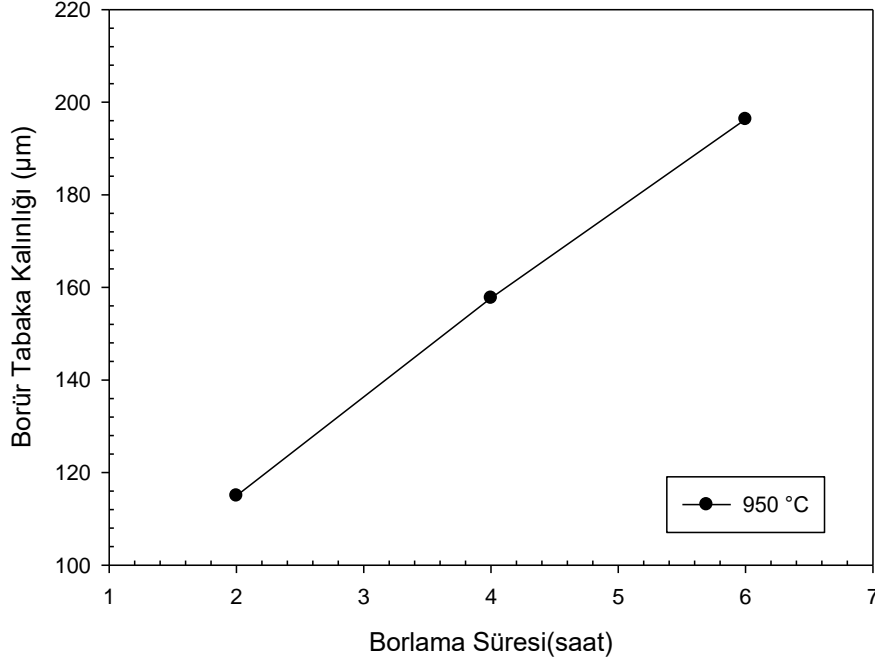
AISI 1020 çeliğinin sertliği 170 HV0,05 olarak ölçülmüştür. Borlama işlemine tabi tutulmuş AISI 1020 çeliği numunelerin sertliği işlem uygulanmamış numunelerle karşılaştırıldığında sertlikte yaklaşık 13 katlık bir artış meydana gelmiştir. En yüksek sertlik değeri 4 saatlik borlama neticesinde 2224 HV0,05 olarak ölçülmüştür. Borlanmış bütün numunelerin sertlik değerlerinde yüksek miktarlarda artış meydana gelmiştir. 6 saatlik borlama neticesinde yüzeyde yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Borlanmış numuneler arasında en düşük sertlik değerleri ise 2 saatlik borlama neticesinde olduğu belirlenmiştir.

Borlanmış çeliğin sertliğinin yüzey altı mesafesine göre değişimi incelendiğinde üç bölge belirlenmiştir. Borlama neticesinde oluşan sertliğin çok yüksek olduğu borür tabakası, sertliğin azalmaya başladığı geçiş bölgesi ve çeliğin kendi sertliğinin ölçüldüğü ana matristir. Geçiş bölgesinde sertlik değerleri düşmeye başlamıştır. Bu bölgede kısmen borür tabakası olduğu için borür tabakasındaki kadar yüksek sertlik değerleri ölçülmemiştir. Yüzeyde oluşan borür tabakalarında yüksek sertlik değerleri ölçülmüştür.

Ayrıca mikrosertlik ölçme cihazı kullanılarak numunelerin yüzeyinde meydana gelen borür tabakalarının kalınlığı ölçülmüştür. Borlama sıcaklığı yüzeyde oluşan borür tabakası kalınlığı Şekil 7' de verilmiştir.



Şekil 6. 950°C sıcaklıkta borlanmış çeliğin sertliğinin yüzey altı mesafesine göre değişimi



Şekil 7. 950°C sıcaklıkta borlama süresine bağlı olarak borür tabakası kalınlığı değişimi

Katı borlama işlemi difüzyon mekanizmasına bağlı termokimyasal bir işlemdir. Yüzeyde sıcaklıkla beraber ilk borür çekirdeği oluşur ve zamanla büyümeye başlar. Sıcaklık ve süreye bağlı olarak çeliğin yüzeyinden içeri doğru difüze olmaya devam eder. Literatür incelendiğinde difüzyon mekanizmasında en etkili iki faktör sıcaklık ve süredir. Sıcaklık ve sürenin artışı difüzyon miktarını artırmakta ve malzeme yüzeyinde meydana gelen borür tabakası kalınlığı artmaktadır. Bu çalışmada Şekil 7 incelendiğinde sabit sıcaklıkta artan süre ile beraber yüzeyde meydana gelen borür tabakasının arttığı görülmektedir. 2 saatlik katı borlama neticesinde yüzeyde meydana gelen borür tabaka kalınlığı 115µm olarak tespit edilmiştir. 4 saatlik borlama neticesinde 157,7µm olarak ölçülmüş olup 6 saatlik borlama neticesinde borür tabaka kalınlığı 196,3 µm olarak ölçülmüştür. Artan sıcaklıkla beraber yüzeyde meydana gelen borür tabaka kalınlığı artmıştır. En yüksek borlama kalınlığı 6 saatlik borlama sonucunda elde edilmiştir.

4.Sonuçlar

Bu çalışmada piyasada büyük kesitli takım tezgâhlarının ana millerinde, orta sertlikte ve aşınmaya dayanıklı dişlilerde, sertleştirilmiş pimler ve zincirlerde ve daha birçok alanda kullanılan düşük karbonlu sınıfta yer alan AISI 1020 çeliğine katı borlama işlemi yapılmıştır. Katı borlama işlemi 950°C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerde Baybora-2 yerli borlama tozu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm bu işlemler sonucunda çeliğin içyapı, sertlik ve bazı mekanik özellikleri analiz edilmiştir. Katı borlama işlemi sonucunda yüzeyde oluşan borür tabakasının artan sıcaklıkla beraber arttığı en yüksek borür tabakasının 6 saatlik borlama neticesi sonucunda oluştuğu tespit edilmiştir. Sertlik ölçümleri neticesinde en yüksek sertlik değerleri borlanmış numunelerden elde edilmiştir. Borlama işlemine tabi tutulmuş AISI 1020 çeliği numunelerin sertliği işlem uygulanmamış numunelerle karşılaştırıldığında sertlikte yaklaşık 13 katlık bir artış meydana gelmiştir. En yüksek sertlik değerinin 4 saatlik borlama neticesinde oluştuğu belirlenmiştir. Yüzey altı sertlik grafiği incelendiğinde grafikte üç bölgenin oluştuğu görülmüştür. Bunlar en yüksek sertlik değerlerinin elde edildiği borür tabakası, sertliğin düşmeye başladığı geçiş bölgesi ve ana matristir. İçyapı incelemeleri neticesinde AISI 1020 çeliğinin içyapısının ferrit, perlit ve borür tabakalarından oluştuğu belirlenmiştir. Yüzeyde oluşan borür tabakasının testere dişi formunda oluştuğu ve yüzeye yapıştığı tespit edilmiştir. Baybora-2 yerli borlama tozu ile yapılan borlama neticesinde ithal borlama tozlarıyla yapılan çalışmalarla eşdeğer sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir.

Referanslar

Atık E, Yunker U, Meric C, 2003 “The effects of conventional heat treatment and boronizing on abrasive wear and corrosion of SAE 1010, SAE 1040, D2 and 304 steels”,

Almeida EAS, Milan JCG, da Costa CE. Acquired properties comparison of solid nitriding, gas nitriding and plasma nitriding in tool steels. Mater Res 2015;18:27–35. <http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.255513>.

Baştürk S., Erten M., Borlama ile yüzey sertleştirme çalışmaları, Mühendis ve Makine, 47 (563), Aralık 2006.

Bayça S.U., Powder boronizing agent for coating a metal with a metal boride layer, Patent no:PCT/TR2020/050185.

B'ejar M.A, Moreno E, 2006 Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels, Journal of Materials Processing Technology 173 352–358.

Beliardouh NE, Nouveau C, Walock MJ, Jacquet P. A study of the wear performance of duplex treated commercial low-alloy steel against alumina and WC balls. Surf Coat Technol 2014;259:483–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.10.042>.

Campos I, Farah M, Lopez N, Bermudez G, Rodriguez G, Villavelazquez C. Evaluation of the tool life and fracture toughness of cutting tools boronized by the paste boriding process. Appl Surf Sci 2008;254:2967–74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.10.038>.

Castillejo FE, Marulanda DM, Olaya JJ, Alfonso JE. Wear and corrosion resistance of niobium-chromium carbide coatings on AISI D2 produced through TRD. Surf Coat Technol 2014;254:104–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.05.069>.

C. Meric, S. Sahin, B. Backir, N.S. Koksall, 2006. “Investigation of the boronizing effect on the abrasive wear behavior in cast irons” Materials and Design. 27 . 751-757.

Celikyurek I, Baksan B, Torun O, Gurler R, 2006 “Boronizing of iron aluminide Fe72Al28” Intermetallics. 14 136–141.

Göy, Z., Borlama, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1984.

Karamış, B.M., Nair ,F., Selçuk., “ Borlanmış Malzemelerin Tribolojik Özellikleri.” 6.Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı , sayfa 446-454, Denizli, 12-14 Nisan 1995

Kumar A, Bhushan B. Nanomechanical, nanotribological and macrotribological characterization of hard coatings and surface treatment of H-13 steel. Tribol Int 2015;81:149–58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2014.08.010>.

Maragoudakis N. E., Stergioudis G., Omar H., Pavlidou E., Tsiapas D.N., Boro-nitriding of steel US 37- 1, Materials Letters, 57, 949-953,2002.

Ozbek I, Bindal C,2011, 86(4), Kinetics of borided AISI M2 highspeed steel, Vacuum, 391-397. 2004

Ozdemir O, Omar M.A, Usta M, Zeytin S, Bindal C, Ucisik A.H, 2009 “An investigation on boriding kinetics of AISI 316 stainless steel”, Vacuum 83 175–179

Özbek,İ., “ Borlama Yöntemiyle AISI M50, AISI M2 Yüksek Hız Çeliklerinin ve AISI W1 Çeliğinin Yüzey Performansının Geliştirilmesi.” Doktora Tezi, SAÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya,1999

Piasecki A, Kulka M, Kotkowiak M. Wear resistance improvement of 100CrMnSi6-4 bearing steel by laser boriding using CaF2 self-lubricating addition. Tribol Int 2016;97:173–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2016.01.028>.

Reddy A. V., Investigation of aeronautical and engineering component failures, CRC Press, p.57, 2004.

Selçuk,B., Ipek, M.B., “ AISI 5155 ve AISI 1020 Çeliklerinin Çekme Özelliklerine Borlamanın Etkisi.” 6.Denizli Malzeme Sempozyumu Bildirileri Kitabı, sayfa 60-69, Denizli, 12-14 Nisan 1995

Sinha A. K., Boriding (Boronizing), ASM Handbook, Vol 4, Heat treating, Materials Park, OH:ASM International, 1991.

Yada K, Watanabe O. Reactive flow simulation of vacuum carburizing by acetylene gas. Comput Fluids 2013;79:65–76.



Determination of The Static Friction Coefficient of Some Materials Used for Anti-slip Safety with ANOVA

Murat Diker¹ , Bulent Cakmak² , Engin Ergul^{3*} 

¹Yasar University, Vocational School, Department of Property Protection and Security, 35100, Izmir, TURKEY

²Ege University, Faculty of Agriculture, Department of Agricultural Machinery and Technologies Engineering, 35100, Izmir, TURKEY

³Dokuz Eylul University, Izmir Vocational School, Department of Machinery and Metal Technologies, 35380, Izmir, TURKEY

Başvuru/Received: 01/10/2022

Kabul / Accepted: 18/12/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Abstract

The surface conditions of ground surface coatings, which are widely used in working environments exposed to various pollutants, were evaluated from a safety perspective. In this work, static friction coefficient of some floor coverings exposed to different pollutants for various reasons and some shoe sole materials that are widely used in working environments were determined. The interaction between soil, floor, and surface contaminations were evaluated statistically. In particular, the ground surface contaminated with contaminants such as water and surface cleaners, which significantly reduce the security of the floor is studied. ANOVA results showed that the floor covering, shoe sole samples, and floor contaminants were significant for each variable of the friction coefficient (μ) ($p < 0.05$). It was determined that the correlation between two factors and three factors between a floor covering, shoe sole samples, and floor surface contaminant conditions significantly affects the friction coefficient (μ). Seven floor samples used in the study were evaluated in terms of safety classification and the results ranking from the highest to the lowest were "Granite ceramic with a glossy surface", "PVC linoleum coating", "Laminated wood parquet", "Matte surface ceramic", "Rough surfaced ceramic", "Matte, rough, non-slip, fireproof ceramic", "Natural granite stone (processed)". When the effect of floor samples on the static friction coefficient is examined, safe ones according to the DIN 51097 standards for all working areas; it has been determined that "PVC linoleum coating" ($\bar{X} = 0.52$), "Laminated wooden parquet" ($\bar{X} = 0.48$), "Granite ceramic with a glossy surface" ($\bar{X} = 0.46$).

Key Words

"Fall injuries, fall prevention, occupational health and safety, industrial ergonomics"

1. Introduction

Slip, trips, and falls cause a significant portion of injuries in the workplace. Slipping is considered a major factor leading to falls and injuries. The primary risk factor for slip accidents is undoubtedly reduced friction between shoes and underfoot surfaces. Secondary risk factors are, for example, poor postural control, aging, diabetes, alcohol intake, and use of anxiety medication drugs (Grönqvist & Hirvonen, 1995). Many factors contribute to the mechanism of a slip, including surface conditions like dry versus wet, ice, grease, particulates, etc. floor surface characteristics, shoes, and biomechanics of gait. Feasible corrective actions include changing the work environment, eliminating hazardous conditions, and providing protective devices. Slip resistance is usually determined by the coefficient of friction between interacting surfaces (McVay & Redfern b, 1994). There are numerous machines and methods for measuring the coefficient of friction between shoes and upholstery. However, there is little agreement on how to accurately measure friction with a machine, as the parameters governing walking are constantly changing as the pedestrian moves, and some workers prefer to evaluate friction or pedestrian slip resistance. Several German tests using this principle are based on an inclined ramp. DIN 51097 is a test for evaluating the suitability of flooring materials for use in wet-footed areas and DIN 51130 is a similar test for evaluating flooring materials for use in work environments heavily contaminated with oil (James, 1999).

The friction properties of shoe heels and soles are central to preventing slips and falls (Leclercq, 1999). ANOVA, (Ergul & Kurt, 2021; Kurt, Oduncuoglu, et al., 2018; Kurt, Yilmaz, et al., 2018; Kurt & Oduncuoglu, 2015) is a nice way to measure significant degree. In recent studies, most efforts in preventing slips and falls have centered on work surfaces. The purposes of Chang et al., (2001) are to summarize our understanding of friction measurement related to slipperiness assessment of shoe and floor interfaces and to define test conditions based on biomechanical observations. They said that the test conditions should satisfy some conditions, depending on the test methods. The normal force was built up at least 10 kN s^{-1} for the whole-shoe testing devices. The normal pressure and sliding velocity at the interface were between 0.2 and 1.0 MPa, and between zero and 1.0 m s^{-1} , respectively. The times of contact before and during the coefficient of friction (COF) computations were between zero and 600 ms. Gao and Abeysekera, (2002) emphasized that in addition to thermal insulation in the development of shoes for use in cold climates, the prevention of slipping and falling danger by improving the anti-slip feature and wearability should be priorities. McGorry et al., (2007) report on the development and evaluation of a measure of slip distance based on variables derived from the signal of a heel-mounted accelerometer. In their work twenty-one participants walked on a laboratory runway under several surface slipperiness conditions. Their analysis of variance showed significant effects on slip distance (no-slip, micro-slip, and slide), and walking speed (1.52, 1.78, and 2.13 m/s). Regression analysis indicated a reasonably strong relationship, $R^2 = 0.511$, between slip distance and deceleration time. The analysis of the heel-mounted accelerometer output has demonstrated the potential of this approach as an adjunct human-centered measure in the evaluation of surface slipperiness. Liu et al., (2010) reported that the floors with grooves perpendicular to the friction measurement direction had the highest friction coefficients among the floor conditions in both the wet and glycerol-contaminated conditions except for the wet/flat sole/ 10° condition. The differences among fingertip, palm, and foot in the perceived floor slipperiness were not statistically different. The regression analysis results of Li, Yu and Zhang, (2011) Li indicated that the floor roughness parameter Ra is a better predictor in predicting both the perceived floor roughness and perceived floor slipperiness than the COF of the floor. Li, Meng, and Zhang (2014) stated that on wet surfaces, solid particles diminish the squeeze film effects between the footwear pad and the floor and the hardness of the footwear pad has a lesser impact on the COF. Since the COF values of natural stones decrease in a wet environment, the risk of slipping is high, especially on polished surfaces. Çoşkun et al., (2019) have determined that it is safer to use on aged surfaces in areas where one can walk barefoot in a wet environment. Footwear with better slip resistance can dramatically reduce the risk of fall-related injuries in the winter (Bagheri et al., 2021).

This study provides the determination of static COF for some floor coverings exposed to different pollutants for various reasons and some shoe sole materials that are widely used in working environments. Most of this work is about occupational accidents or prevention.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

Different materials are used as coating materials on floors where employees walk around and perform business activities in open and closed working environments. In this study, seven different types of floor covering materials with different structural features, which are widely used in the working environment in the market, are used. The letter (Z) is used to indicate that the variable belongs to the "floor covering". In Table 1, these materials are coded randomly from Z1 to Z7.

Table 1. Coding of floor covering materials

Code	Floor
Z1	Rough-surfaced ceramic
Z2	Matt surface ceramic
Z3	Laminated wood parquet
Z4	PVC linoleum coating
Z5	Matte, rough, non-slip, fireproof ceramic
Z6	Bright surface granite ceramic
Z7	Natural granite stone (processed)

Shoe sole samples with 5 different structural features, which are widely used in the market, were used. The letter (T) is used to indicate that the variable belongs to the "shoe sole". In Table 2, these examples are coded randomly from T1 to T5.

Table 2. Coding of sole materials

Code	Sole
T1	Leather sole
T2	Symmetrical knurled rubber sole
T3	Thick rubber sole with asymmetric relief surface
T4	Serrated asymmetrical rubber soles
T5	Polished surface rubber sole

In the study, dry ground and two different pollutants frequently encountered in working environments were used. The letter (K) is used to express the pollutant variable. In Table 3, these examples are coded randomly from T1 to T5. The K0 code is used in the expression of dry ground. Tap water K1 was chosen as the first pollutant, and K2 was a chemical surface cleaner. The chemical surface cleaning material contains deionized water, 5%-15% nonionic active substance, <5% anionic active substance, <5% sodium hydroxide, preservative, and perfume.

Table 3. Coding of pollutants

Code	Description
K0	Dry floor
K1	Wet ground (tap water)
K2	Surface cleaner materials

In Figure 1, a mechanical contact system between the ground and the sole has been created using pollutants.

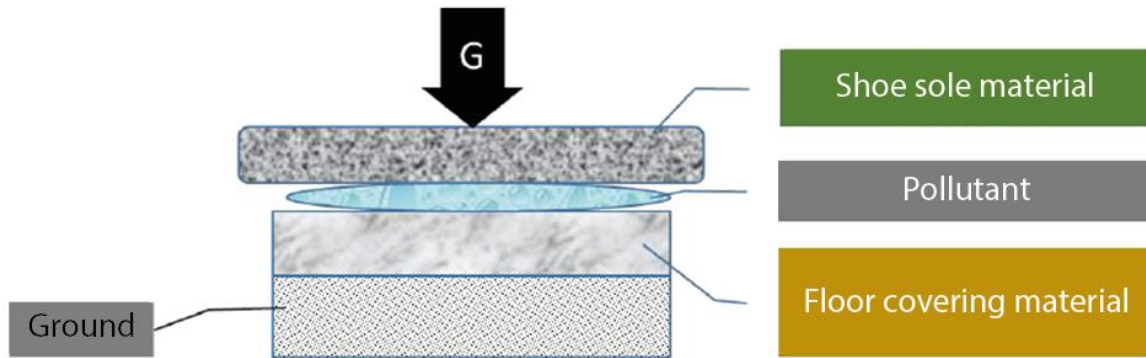


Figure 1. A system consisting of a base, pollutant, and ground independent variables

2.2. Test Methods for Determining the Coefficient of Friction

An experimental setup was used to determine the static friction coefficient (Figure 2). The assembly consists of an actuator operating with adjustable DC current between 0-24 V and a moving platform. In the preliminary trials, the platform on which the friction system is located was moved at a forward speed corresponding to 10 V voltage. The platform works with three functions (forward-stop-backward). In the study, the floor covering material was fixed on the platform and the base material was placed on the metal cylindrical platform. The metal cylinder was connected to the dynamometer with a string and the string tension was reduced between the dynamometer and the cylinder before the movement. During the movement of the platform, the friction force was measured instantly and recorded on a dynamometer connected to the base material.

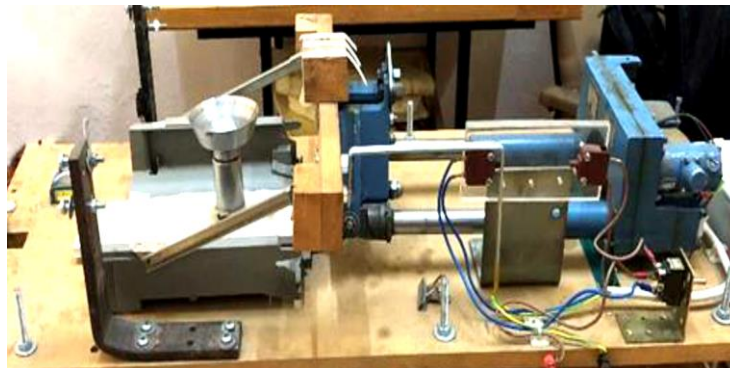


Figure 2. A view of the test methods for determining coefficient of friction

In the friction test, the average normal walking speed was predicted as 0.3 m/s for humans. During this process, the friction resistance on the sole placed in the test system was measured instantly in N (Newton) with a digital dynamometer. Each system combination was performed in a laboratory at a room temperature of 24 °C.

2.3. Statistical Analysis with ANOVA

In this study, measurements were made to measure the friction force in the horizontal plane in the prepared setup. In these statistical studies, reference values determined by international standards published in this field were used to determine which floor will be considered a safe working surface and which floor will be considered an unsafe working surface. For this study, the static friction coefficient (μ) = 0.45 was taken as the reference value, which is considered safe with low slip risk, specified in the DIN 51097 standards. The analysis of variance (ANOVA) method was used to determine how the floor, sole, and pollutant samples affect the static friction coefficient individually and together. The confidence level in this statistical analysis study (95%), and the probability error margin outside the mentioned security level (Alpha) (5%) were evaluated and the data was significant $p < 0.05$.

3. Results

As a dependent variable, static friction coefficient (μ), five different bases, and floors contaminated with contaminants (dry floor, wet floor, and surface cleaner) were determined as independent variables. Error-variance equality analysis was performed separately. In the evaluations made, it was observed that the effects of the data on the dependent variables were significant.

In this study, the safe static friction coefficient ($\mu = 0.45$), which is accepted for floor anti-slip in the DIN 51097 Standard, is taken as the reference. The friction coefficients between the soil and base samples used in the study were compared with the reference value of the relevant standard. Variance analysis results according to the static friction coefficient dependent variable of the soil, bottom, and pollutant samples are shown in Table 4. In determining the static friction coefficient; the independent variables (floor), (sole), and (pollutant) first each individually, then in groups of two (floor * sole), (floor * pollutant), (sole * pollutant) and finally all three variables when the interaction between (floor * sole * pollutant) is evaluated; It has been observed that these interactions have a significant effect on the static friction coefficient values.

Table 4. Variance analysis results according to the static friction coefficient dependent variable of the soil, bottom, and pollutant samples

Source of variance	KT	sd	KO	F	(p)
Floor	1.722	6	.287	212.576	.000
Sole	.428	4	.107	79.294	.000
Pollutant	3.116	2	1.558	1154.139	.000
Floor * sole	1.537	24	.064	47.423	.000
Floor * pollutant	4.189	12	.349	258.554	.000
Sole * pollutant	2.791	8	.349	258.449	.000
Floor * sole * pollutant	1.944	48	.040	29.996	.000
Error	.567	420	.001		
Total	112.401	525			

Alpha =.05

ANOVA analysis was interpreted for the static friction coefficient data. According to these values, the effect of each independent variable on the static friction coefficient alone is important. In the results, it can be said that the results are similar between (floor * pollutant) and (sole * pollutant), and there is no significant difference between these pairs. A graphic showing the effect of soils and their bases on the static friction coefficients is given in Figure 3.

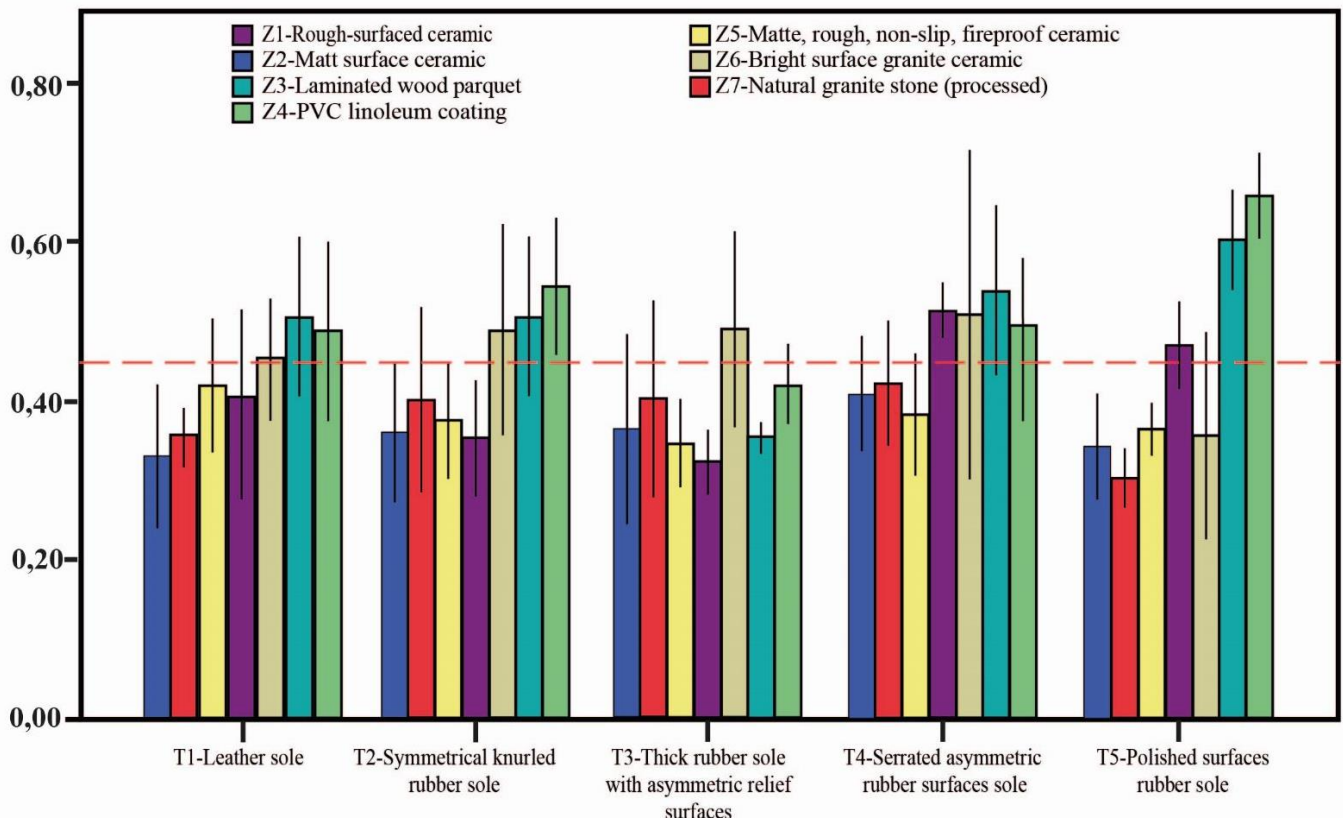


Figure 3. The effect of soils and their bases on the static friction coefficients

When the data obtained from the measurements are examined from the graph in Figure 3, each group is listed below from the low static friction coefficient value to the highest according to ($\mu = 0.45$).

- The power of the "leather floor" sample on the "laminated wooden parquet", "PVC linoleum coating" and "glossy granite ceramic" samples,
- The power of the "rubber base with symmetrical serrated surface" sample on the "PVC linoleum coating" and "glossy surface granite ceramic" samples,
- The power of the "thick rubber sole with asymmetric relief surface" sample on the "glossy surface granite ceramic" samples,
- The power of the "serrated asymmetrical rubber sole" sample on "laminated wooden parquet", "rough surface ceramic", "glossy surface granite ceramic" and "PVC linoleum coating" samples,
- The power of the "glossy rubber sole" sample on the "PVC linoleum coating", "laminated wooden parquet" and "rough surface ceramic" samples.

It was found that each floor had a significant difference in the static friction coefficient (Table 4). Since there are seven floor samples, it was determined that they should be grouped into five different sub-clusters by evaluating them according to the multiple comparison "Duncan" results to determine their effect on the static friction coefficient separately. Table 5 shows the results of the "Duncan" test made to determine which groups the average static friction coefficient dependent variable differs according to the soil variable. According to these results, "PVC linoleum coating", "Laminated wooden parquet" and "glossy surface granite ceramic" were determined as safe floors.

Table 5. The results of the “Duncan” test were conducted to determine among which groups the average static friction coefficient dependent variable differs according to the floor variable.

Static μ	Subset					
Floor (Z)	1	2	3	4	5	6
Z2	0.36					
Z7		0.38				
Z5		0.38				
Z1			0.41			
Z6				0.46		
Z3					0.48	
Z4						0.52

Alpha =.05

It was found that each sole differed significantly in the static friction coefficient alone in Table 4. According to these results, it was observed that the "serrated asymmetrical rubber sole" has the highest static friction coefficient and can be used safely. It was determined that other floors were below the limit value accepted as safe (Table 6).

Table 6. The results of the “Duncan” test were conducted to determine among which groups the average static friction coefficient dependent variable differs according to the sole variable.

Static μ	Subset			
Sole (T)	1	2	3	4
T3	0.38			
T2		0.42		
T1		0.42		
T5			0.44	
T4				0.47

Alpha =.05

Pollutants differ significantly in the static friction coefficient in Table 4. Since the number of pollutant samples is 3, it was determined that they should be grouped into three different sub-clusters by evaluating them according to the multiple comparison "Duncan" results to determine their effect on the static friction coefficient separately. According to these results, it was determined that the "Surface cleaner" variable on the static friction coefficient was unsafe, the "wet floor" independent variable was partly safer, and the "dry floor" independent variable was the safest among these three pollutants (Table 7).

Table 7. The results of the "Duncan" test were conducted to determine among which groups the average static friction coefficient dependent variable differs according to the pollutant variable.

Static μ	Subset		
Pollutant (K)	1	2	3
K2	0.32		
K1		0.47	
K0			0.50

Alpha =.05

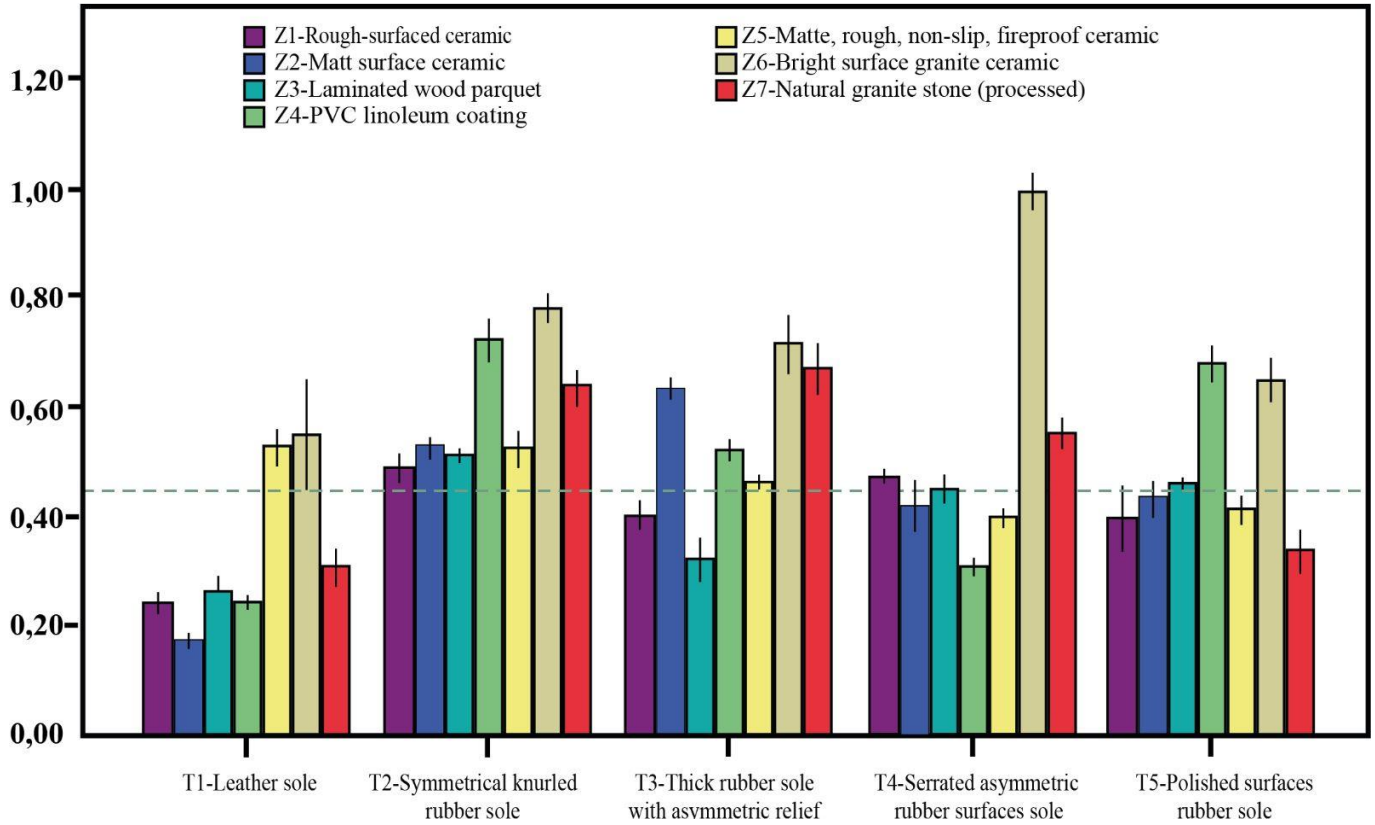


Figure 4. The effect of the interaction of dry floors and sole on the static friction coefficient

When the data obtained from the measurements are examined from the graph in Figure 4, each group is listed below from the low static friction coefficient value to the highest according to ($\mu = 0.45$).

- The power of the "leather floor" sample on the "glossy surface granite ceramic", "matte, rough, non-slip, fireproof ceramic" samples,
- The power of the "rubber base with symmetrical serrated surface" sample on the "glossy surface granite ceramic", "PVC linoleum coating", "natural granite stone (processed)", "rough surface ceramic", "matte, rough, non-slip, fireproof ceramic", "laminated wooden parquet" and "rough surface ceramic" samples,
- The power of the "thick rubber sole with asymmetric relief surface" sample on the "glossy surface granite ceramic", "natural granite stone (processed)", "rough surface ceramic", "PVC linoleum coating" and "matte, rough, non-slip, fireproof ceramic" samples,
- The power of the "serrated asymmetrical rubber sole" sample on "glossy surface granite ceramic", "natural granite stone (processed)", "rough surface ceramic" and "laminated wooden parquet" samples,
- The power of the "glossy rubber sole" sample on the "PVC linoleum coating", "glossy surface granite ceramic" and "laminated wooden parquet" samples.

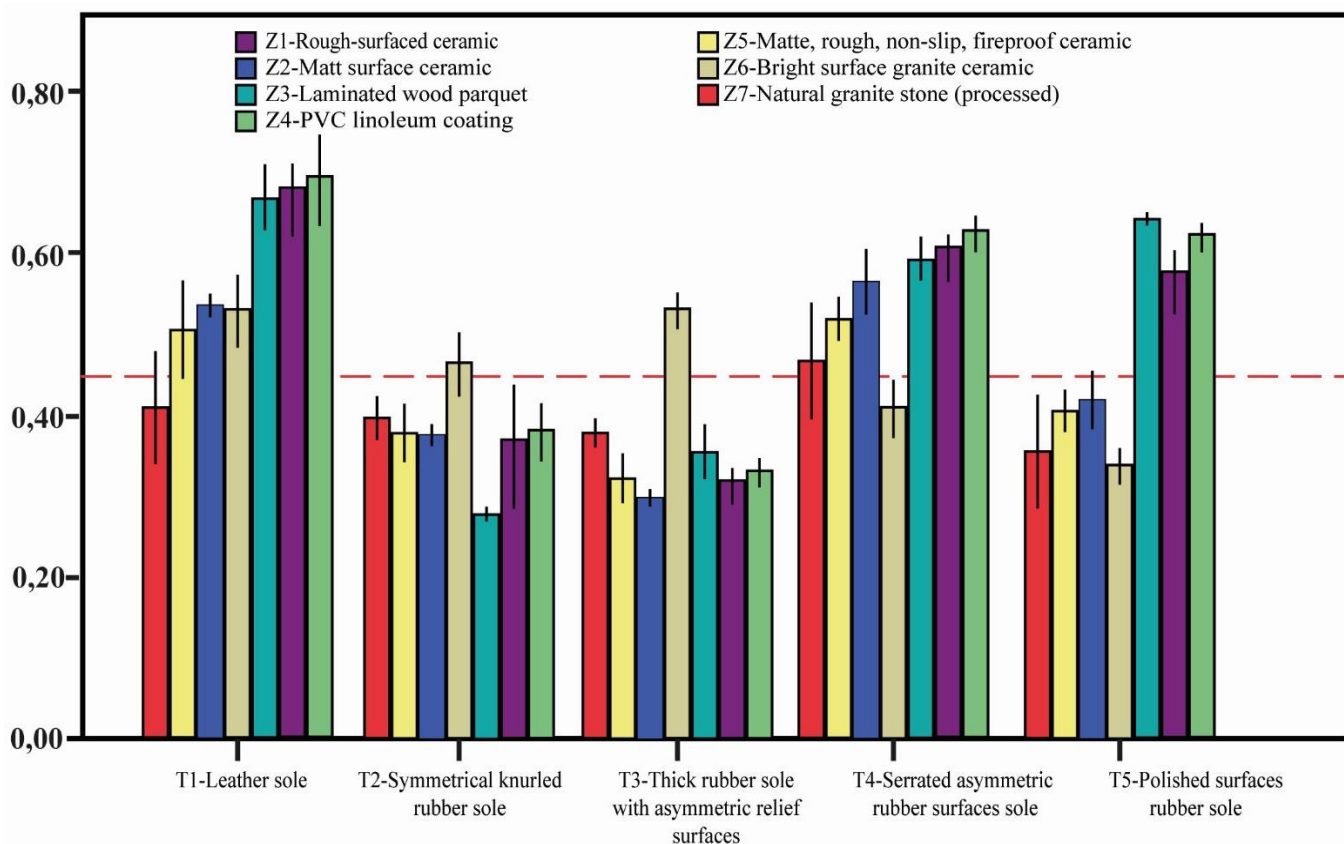


Figure 5. The effect of the interaction of wet floors and sole on the static friction coefficient

When the data obtained from the measurements are examined from the graph in Figure 5, each group is listed below from the low static friction coefficient value to the highest according to ($\mu = 0.45$).

- The power of the "leather floor" sample on the "PVC linoleum coating", "rough surface ceramic", "laminated wooden parquet", "matte surface ceramic", "glossy surface granite ceramic" and "matte, rough, non-slip, fireproof ceramic" samples,
- The power of the "rubber base with symmetrical serrated surface" sample on the "glossy surface granite ceramic" samples,
- The power of the "thick rubber sole with asymmetric relief surface" sample on the "glossy surface granite ceramic" samples,
- The power of the "serrated asymmetrical rubber sole" sample on "PVC linoleum coating", "rough surface ceramic", "laminated wooden parquet", "matte surface ceramic", "matte, rough, non-slip, fireproof ceramic" and "natural granite stone (processed)" samples,
- The power of the "glossy rubber sole" sample on the "laminated wooden parquet", "PVC linoleum coating" and "rough surface ceramic" samples.

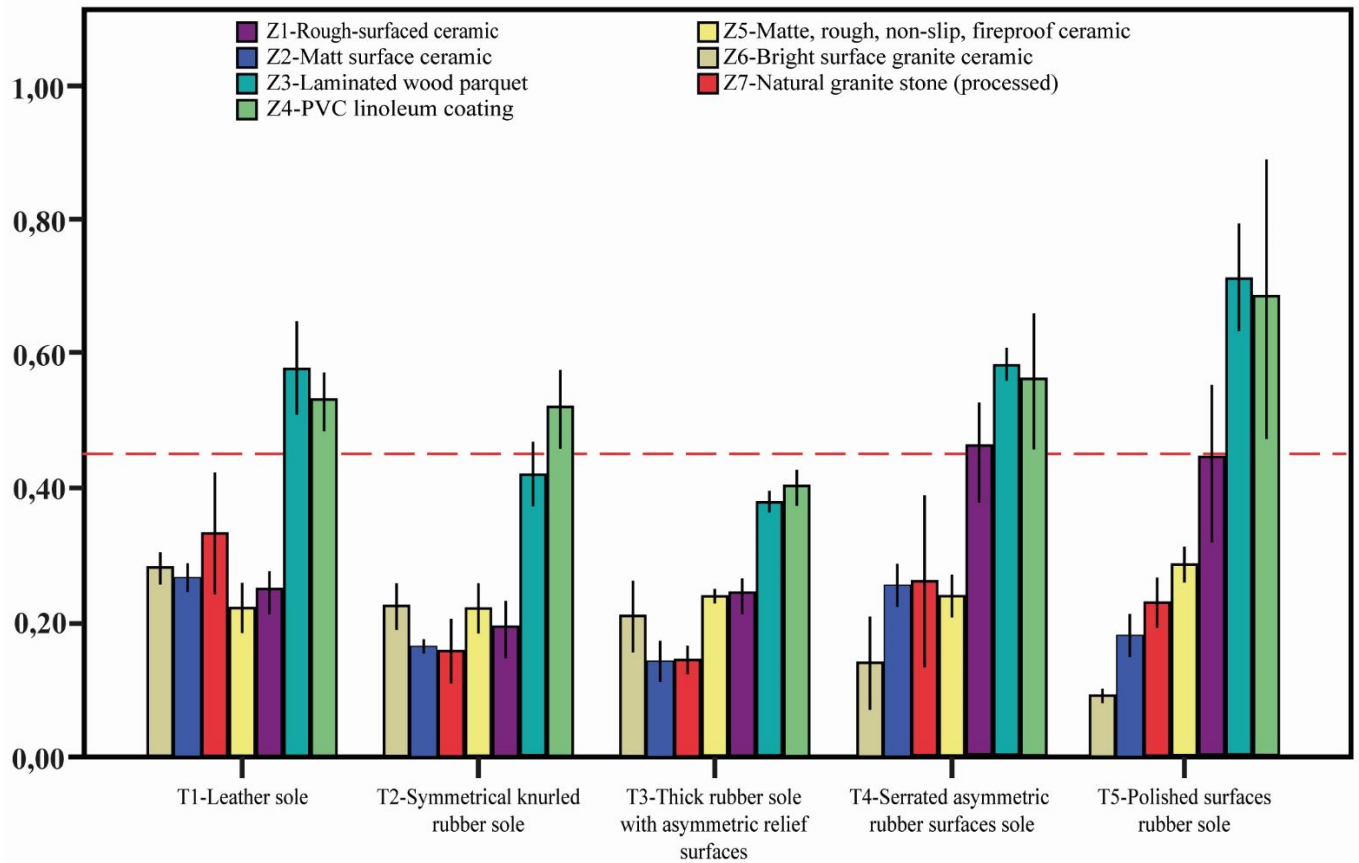


Figure 6. The effect of the interaction of the polluted floor and sole on the static friction coefficient

When the data obtained from the measurements are examined from the graph in Figure 6, each group is listed below from the low static friction coefficient value to the highest according to ($\mu = 0.45$).

- The power of the "leather floor" sample on the "laminated wooden parquet" and "PVC linoleum coating" samples,
- The power of the "rubber base with symmetrical serrated surface" sample on the "PVC linoleum coating" samples,
- The "thick rubber sole with an asymmetric relief surface" does not affect the polluted floor
- The power of the "serrated asymmetrical rubber sole" sample on "laminated wooden parquet", "PVC linoleum coating" and "rough surface ceramic" samples,
- The power of the "glossy rubber sole" sample on the "laminated wooden parquet", "PVC linoleum coating" and "rough surface ceramic" samples.

4. Discussion

When the data of sole materials were evaluated statistically, it was determined that shoe soles differ according to their physical and structural properties. As the reason for this difference, it has been observed that the physical shape of the soles is also important in addition to the structural properties of the material from which the shoe sole is produced. According to the results obtained from the measurements, it was determined that shoes with a highly embossed asymmetric pattern in the selection of shoe soles have less adhesion on flat and smooth surfaces. The static friction (Basyigit, 2020; Gur et al., 2014; Hekimoğlu &

Haciosmanoğlu, 2019; Pul & pul, 2019), coefficients for floor coverings were in the range of 0.36–0.52 (

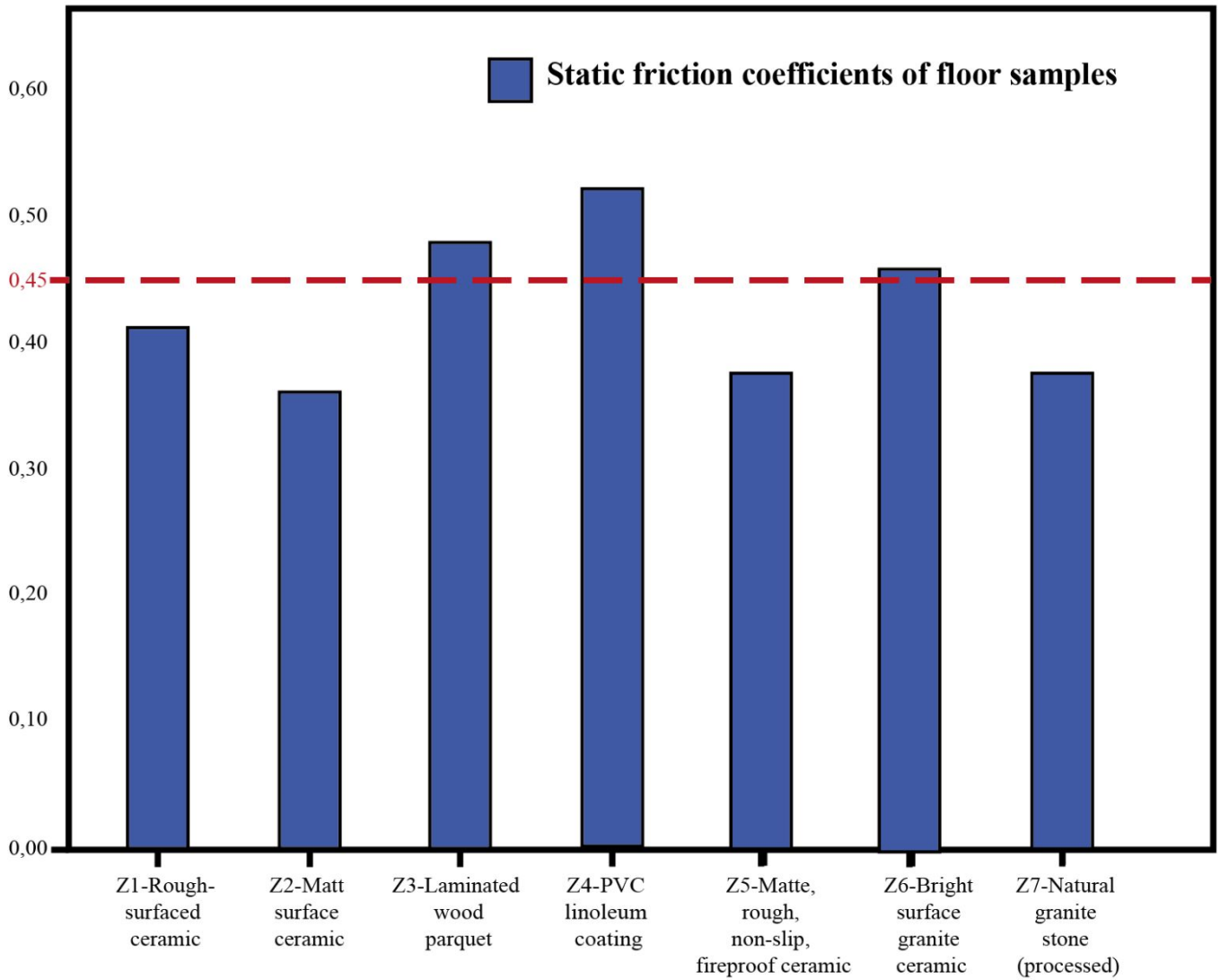


Figure 7). These values were found to be in the range of 0.17–0.60 in the study conducted by (Yu & Li, 2012).

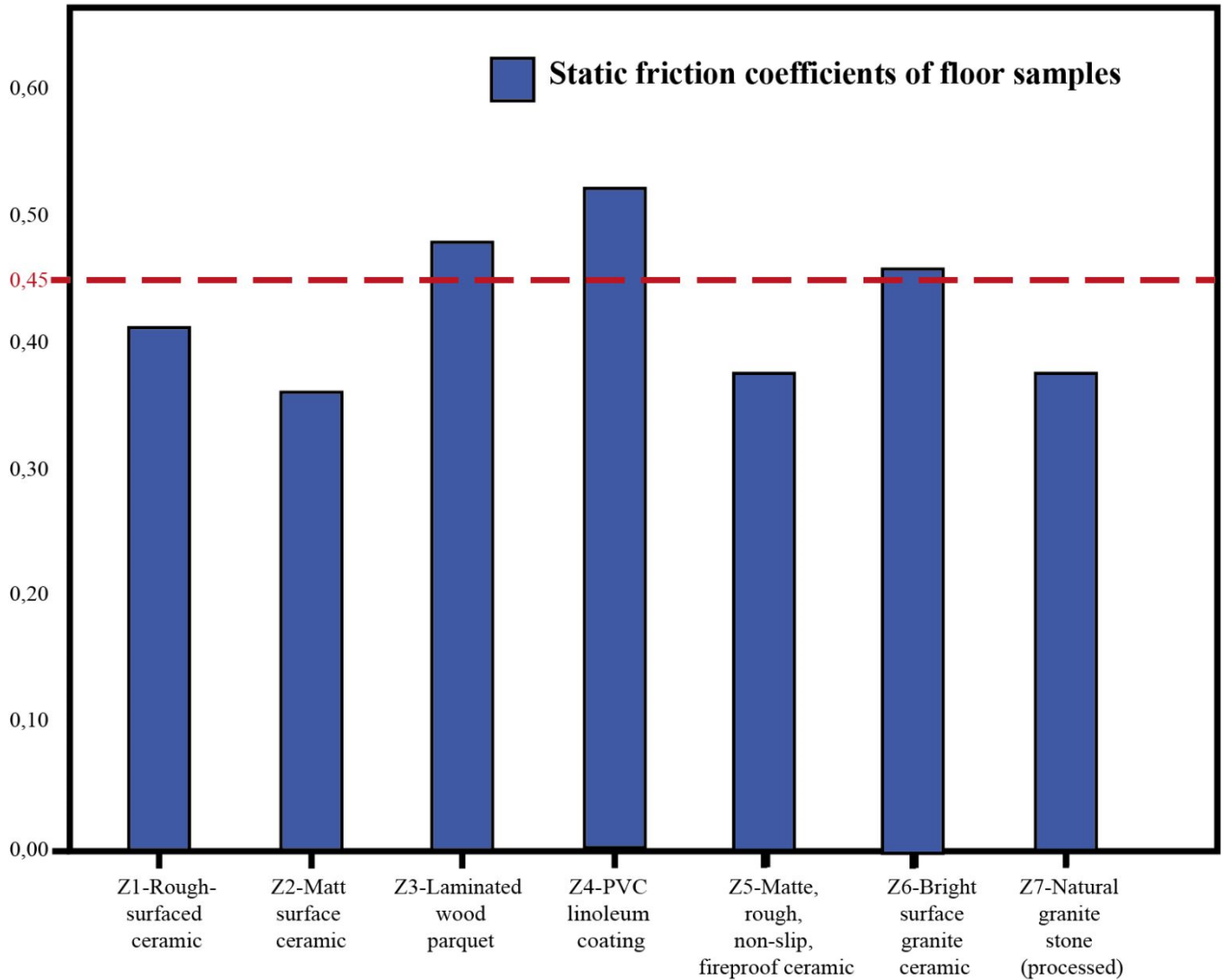


Figure 7. Evaluation of the static friction coefficients of the floor samples according to the reference value

(Mai et al., 2016) used a specially designed measuring device for friction coefficient measurements. In a similar study; they determined that a dry floor has higher friction coefficients than a wet floor and the wet floor has higher friction coefficients than the conditions that are contaminated with surface cleaning material. According to the static friction coefficient values, it has been determined that the dry ground has the lowest slip risk (Çoşkun & Sarıışık, 2017).

Finally, it was observed that only the floor covering material, shoe sole and pollutants are not factors in the occurrence of accidents in slip, stumbling, and falls events. In this study, the correlation between the main intended floor covering material, shoe sole, and pollutants were investigated.

5. Conclusion

In this study, we investigated the correlation between the shoe sole samples with various physical and structural features worn by the workers in the floor samples commonly used in working environments, when they are exposed to two different contaminants with dry ground. ANOVA results showed that the floor covering, shoe sole samples, and floor contaminants were significant for each variable of the friction coefficient (μ) ($p < 0.05$). It was determined that the correlation between two factors and three factors between the floor covering, shoe sole samples, and floor surface contaminant conditions significantly affects the friction coefficient (μ). According to DIN 51097 and DIN 51130, the low-slip risk value is set as $0.42 \leq \mu$ and above. The safe slip risk level according to ASTM and UL is between $0.50 \leq \mu < 0.60$ and the highly safe slip risk level is $0.60 \leq \mu$. It is predicted that the selection of flooring materials to be used in working environments is important to prevent injuries, disabilities, and deaths that may occur due to accidents caused by slipping, stumbling, and falling.

Seven floor samples used in the study were evaluated in terms of safety classification and the results ranking from the highest to the lowest were "Granite ceramic with a glossy surface", "PVC linoleum coating", "Laminated wood parquet", "Matte surface ceramic", "Rough surfaced ceramic", "Matte, rough, non-slip, fireproof ceramic", "Natural granite stone (processed)".

When the effect of floor samples on the static friction coefficient is examined, safe ones according to the DIN 51097 standards for all working areas; it has been determined that "PVC linoleum coating" ($\bar{X} = 0.52$), "Laminated wooden parquet" ($\bar{X} = 0.48$), "Granite ceramic with a glossy surface" ($\bar{X} = 0.46$).

Acknowledgment

This research was produced from Higher Education Council National Thesis Center (YOKTEZ) the thesis number 539470 named as "Determination of the anti-slip safety of some materials to be used on the floor in the working environment".

References

- Bagheri, Z. S., Beltran, J. D., Holyoke, P., & Dutta, T. (2021). Reducing fall risk for home care workers with slip resistant winter footwear. *Applied Ergonomics*, 90, 103230. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103230>
- Basyigit, A. B. (2020). Investigating the Mechanical and Microstructural properties of Aluminium based Alloy Wheel Rims after TIG Welding. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, 12(2), 388–395. <https://doi.org/10.29137/umagd.686466>
- Chang, W.-R., Grönqvist, R., Leclercq, S., Brungraber, R. J., Mattke, U., Strandberg, L., Thorpe, S. C., Myung, R., Makkonen, L., Courtney, T. K., Chang, W.-R., Grönqvist, R., Leclercq, S., Brungraber, R. J., Mattke, U., Strandberg, L., Thorpe, S. C., Myung, R., Makkonen, L., & Courtney, T. K. (2001). The role of friction in the measurement of slipperiness, Part 2: Survey of friction measurement devices. *ERGONOMICS*, 44(13), 1233–1261. <https://doi.org/10.1080/00140130110085583>
- Çoşkun, G., & Sarıışık, G. (2017). Slip Safety Risk Analysis of Surface Properties by Determining Coefficients of Friction (COF) of Natural Stones. *Cumhuriyet Science Journal*, 38(2), 219–219. <https://doi.org/10.17776/cumusci.285917>
- Çoşkun, G., Sarıışık, G., & Sarıışık, A. (2019). Slip safety risk analysis of surface properties using the coefficients of friction of rocks. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 25(3), 443–457. <https://doi.org/10.1080/10803548.2017.1395594>
- Ergul, E., & Kurt, H. I. (2021). AI Matrisli Kompozitlere ANFIS, ANN ve Taguchi Yaklaşımları Uygulanarak Özelliklerin Karşılaştırılması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(2), 406–416. <https://doi.org/10.29137/UMAGD.833300>
- Gao, C., & Abeysekera, J. (2002). The assessment of the integration of slip resistance, thermal insulation and wearability of footwear on icy surfaces. *Safety Science*, 40(7–8), 613–624. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(01\)00062-5](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(01)00062-5)
- Grönqvist, R., & Hirvonen, M. (1995). Slipperiness of footwear and mechanisms of walking friction on icy surfaces. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 16(3), 191–200. [https://doi.org/10.1016/0169-8141\(94\)00095-K](https://doi.org/10.1016/0169-8141(94)00095-K)
- Gur, A. K., Ozay, C., Orhan, A., Buytoz, S., Caligulu, U., & Yigitturk, N. (2014). Wear properties of Fe-Cr-C and B4C powder coating on AISI 316 stainless steel analyzed by the Taguchi method. *Materialpruefung/Materials Testing*, 56(5), 393–398. <https://doi.org/10.3139/120.110578/MACHINEREADABLECITATION/RIS>
- Hekimoğlu, A. P., & Haciosmanoğlu, M. (2019). Effect of Copper and Magnesium Additions on the Structural, Mechanical and Tribological Properties of the Al-17Si Alloy. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, 11(2), 685–694. <https://doi.org/10.29137/umagd.546562>

- James, D. I. (1999). The theory behind the DIN ramp tests. *Polymer Testing*, 18(1), 3–10.
[https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(98\)00061-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(98)00061-0)
- Kurt, H. I., & Oduncuoglu, M. (2015). Application of a Neural Network Model for Prediction of Wear Properties of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Composites. *International Journal of Polymer Science*, 2015.
<https://doi.org/10.1155/2015/315710>
- Kurt, H. I., Oduncuoglu, M., Yilmaz, N. F., Ergul, E., & Asmatulu, R. (2018). A comparative study on the effect of welding parameters of austenitic stainless steels using artificial neural network and taguchi approaches with ANOVA analysis. *Metals*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/met8050326>
- Kurt, H. I., Yilmaz, N. F., & Oduncuoglu, M. (2018). ANN in estimation shear modulus of laminate composite. *The International Journal of Materials and Engineering Technology*, 1(1), 1–5.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/tijmet/issue/38623/439035>
- Leclercq, S. (1999). The prevention of slipping accidents: A review and discussion of work related to the methodology of measuring slip resistance. In *Safety Science* (Vol. 31, Issue 2, pp. 95–125). Elsevier Sci Ltd.
[https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(98\)00064-2](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(98)00064-2)
- Li, K. W., Meng, F., & Zhang, W. (2014). Friction between footwear and floor covered with solid particles under dry and wet conditions. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 20(1), 43–53.
<https://doi.org/10.1080/10803548.2014.11077027>
- Li, K. W., Yu, R., & Zhang, W. (2011). Roughness and slipperiness of floor surface: Tactile sensation and perception. *Safety Science*, 49(3), 508–512. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.11.010>
- Liu, L., Li, K. W., Lee, Y. H., Chen, C. C., & Chen, C. Y. (2010). Friction measurements on ‘anti-slip’ floors under shoe sole, contamination, and inclination conditions. *Safety Science*, 48(10), 1321–1326.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.04.014>
- Mai, W. T., Li, K. W., & Chen, C. C. (2016). An analysis of floor roughness & slip resistance of floors. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2016-January*, 329–332.
<https://doi.org/10.1109/IEEM.2015.7385662>
- McGorry, R. W., DiDomenico, A., & Chang, C. C. (2007). The use of a heel-mounted accelerometer as an adjunct measure of slip distance. *Applied Ergonomics*, 38(3), 369–376. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2006.03.013>
- McVay, E. J., & Redfern, M. S. (1994). Rampway safety: Foot forces as a function of rampway angle. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 55(7), 626–634. <https://doi.org/10.1080/15428119491018718>
- Pul, M., & pul, muharrem. (2019). Karbon Nanotüp (CNT) Ve Nano Grafen (G) Takviyeli Al 2024 Kompozitlerin Vorteks Yöntemiyle Üretilerek Aşınma Ve İşlenebilme Özelliklerinin İncelenmesi. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, 11(1), 370–382. <https://doi.org/10.29137/umagd.493868>
- Yu, R., & Li, K. W. (2012). *International Journal of Injury Control and Safety Promotion A field assessment of floor slipperiness in a student cafeteria A field assessment of floor slipperiness in a student cafeteria*.
<https://doi.org/10.1080/17457300.2012.686920>



Hidrofobik Kaplamanın Kanat Profillerinin Aerodinamik Parametrelerine Etkisinin Deneysel İncelenmesi

Experimental Investigation Of The Effect Of Hydrophobic Coating On Aerodynamic Parameters Of Airfoils

Fevzi Şahin^{1*}, İsmayil İsmailov¹, Hakan Özcan¹

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun/TÜRKİYE

Başvuru/Received: 27/10/2022

Kabul / Accepted: 04/01/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Bu çalışmada NACA 4418 kanat profili üzerinde deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Kanat profili spray kaplama yöntemi ile iki farklı malzeme ile kaplanmış, ıslanırılık derecesi (su damlasının yüzey ile temas açısı, θ) belirlenmiştir. Normal ($\theta=59^\circ < 90^\circ$: hidrofilik), hidrofobik ($\theta=93^\circ > 90^\circ$) ve süperhidrofobik ($\theta=154^\circ > 150^\circ$) olmak üzere üç farklı kanat profile yüzeyi elde edilmiştir. Bu üç farklı durum için, kaldırma ve sürüklenme katsayıları, 15 m/s ($Re=253.196$) serbest akım hızında ve 6 farklı hücum açısında ($-10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$) rüzgar tüneline deneysel olarak belirlenerek birbiriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, normal (hidrofilik) kanat profiline, hidrofobik ve süperhidrofobik özellik kazandırılmasının kanat profilinin kaldırma katsayılarını tüm hücum açıları dikkate alındığında sırasıyla ortalama %15 ve %23 oranında iyileştirdiğini göstermiştir. Ayrıca normal (hidrofilik) kanat profiline, hidrofobik ve süperhidrofobik özellik kazandırılması kanat profilinin sürüklenme katsayılarını tüm hücum açıları dikkate alındığında sırasıyla ortalama %12 ve %20 oranında düşürmüştür.

Anahtar Kelimeler

“Kanat Profili, Sprey Kaplama, Hidrofobik, Süperhidrofobik, Kaldırma Katsayısı, Sürüklenme Katsayısı”

Abstract

In this study, an experimental study was carried out on NACA 4418 wing profile. The airfoil was covered with two different materials by spray coating method, the degrees of wetting (water droplet contact angle with the surface, θ) were determined. The three different surfaces that are as normal ($\theta = 59^\circ < 90^\circ$: hydrophilic), hydrophobic ($\theta = 93^\circ > 90^\circ$) and superhydrophobic ($\theta = 154^\circ > 150^\circ$) were obtained. For these three different situations, the lift and drag coefficients were determined experimentally in the wind tunnel at a free flow velocity of 15 m / s ($Re = 253.196$) and 6 different angle of attack ($-10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$) and compared with each other. The results showed that when the hydrophobic and superhydrophobic properties to the normal (hydrophilic) airfoil were introduced, the lift coefficients of airfoil increased by an average of 15% and 23%, respectively for all the studied attack angles. In addition, adding hydrophobic and super hydrophobic properties to the normal (hydrophilic) airfoil decreased the drag coefficients of the airfoil by 12% and 20%, respectively for all the studied attack angles.

Key Words

“Spray Coating, Hydrophobic, Superhydrophobic, Lift Coefficient, Drag Coefficient”

1. Giriş

Bir uçağın aerodinamik yapısının en önemli elemanı olan kanat profilleri, Wright kardeşler tarafından insanlı ve motorlu bir uçağın ilk defa uçurulduğu tarihten bu yana olağanüstü bir hızla gelişen havacılık endüstrisinde üzerine en fazla çalışma yapılan alanlardan birisi olmuştur. Kanat profillerinin aerodinamiği ile ilgili çalışmalar 19. Yüzyıl sonlarında rüzgâr tünellerinin geliştirilmesi ile başlamıştır. Uçakların kullanım amaçlarına göre uçak kanat profili geometrilerinde çok büyük farklılıklar görülmektedir. Günümüzde çeşitli ülkelerde geliştirilmiş yüzlerce kanat profili şekli bulunmaktadır. Bu profillerin büyük bir çoğunluğu 2.Dünya savaşı öncesinde ve savaş sırasındaki yıllarda Amerika'da NACA(National Advisory Committee for Aeronautics) tarafından ve bir kısmı da İngiltere, Almanya, Rusya gibi bazı ülkelerde üretilmiş olan profillerden hareketle geliştirilmiştir. Kanat profillerinin aerodinamik performansı, genellikle farklı hücum açısı ve serbest akım hızlarında karşılaştırılır. Performans parametresi olarak sürüklenme katsayısı, taşıma katsayısı en önemli olanlarıdır (Güzelbey et al., 2018). Aerodinamik performansın artırılmasında bahsedildiğinde, kanat profili etrafında oluşan kaldırma kuvvetinin artırılması ve sürüklenme kuvvetini azaltılması anlaşılmaktadır. Kaldırma kuvvetini arttırmak kanat profili etrafındaki basınç dağılımını artırmakla sağlanabildiği gibi aynı zamanda profil etrafındaki sınır tabaka kalınlığının düşürülmesi veya türbülanslı sınır tabakanın firar kenarı civarına taşınması ile sağlanabilir. Ayrıca aerodinamik performansı arttırmak için; hücum açısı artırılabilir, kanat profiline kamburluk verilebilir veya yüksek kaldırma aygıtları kullanılabilir (Genç et al., 2008).

Literatürde ayrıca farklı aerodinamik yapılar üzerindeki yağmur ve buz birikiminin etkisinin, bu sistemlerin güvenli çalışmalarına ve performanslarına etkileri üzerine çalışmalar yapılmıştır (Campbell et al., 1989; Wu et al., 2015). Rüzgâr tüneli testi ile uçak aerodinamiği üzerindeki yağmur etkilerinin araştırıldığı ilk çalışmalardan olan Rhode (1941) tarafından gerçekleştirilmiştir. Hava aracının yaklaşık 50 g/m^3 su içeriğine sahip yağmur bulutuyla karşılaşmasında hava hızında % 18 bir azalma olduğunu kaydetmiştir (Rhode, 1941). Farklı aerodinamik yapılarda su itici özelliklere sahip süperhidrofobik yüzeyler kullanılması ile buzlanmanın önlenmesi ve/veya yağmur koruması sağlanmasının ana fikri, korozyonu önlemek, aerodinamiği geliştirmek veya malzemeye kendi kendini temizleme özellikleri kazandırılması olarak ifade edilebilir. Uçak kanatlarında buz birikmesinin, kaldırma kuvveti kaybına ve sürtünmenin artmasına neden olabildiği gösterilmiştir (Okulova et al., 2018). Buzlanmanın önlenmesi ve kanat profillerindeki böcek kalıntılarının temizlenmesi için kanat profil yüzeylerinin hidrofobik/süperhidrofobik özellik kazandırılmasının üzerine yapılan bir çok çalışma vardır (De Pauw et al., 2017; Krishnan et al., 2017). Soğuk koşullarda çalışan uçaklar, önemli ölçüde uçak kanat yapılarını bozan buzlanma riski altındadır, bu da uçuş performansı ve güvenlik için tehlike oluşturabilir (Jung et al., 2011). Mevcut buz çözme sistemlerinin çoğu, kaynak ve enerji yoğun olan ve aynı zamanda çevreyi kirleten buzun fiziksel veya kimyasal olarak uzaklaştırılmasını içerir. İlk buz oluşumunu önlemek için daha arzu edilen bir yaklaşım yüksek dereceli süperhidrofobik malzemeler kullanmaktır (Cao et al., 2009; Liu et al., 2008). Son zamanlarda, süperhidrofobik yüzeyler buzlanma önleyici olarak önerilmiştir. Bu uygulamaların kanat profillerinin aerodinamik özelliklerine etkisi ise sınırlı düzeyde araştırılmıştır. Mahmoodi ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada kanat profillerinin performansını arttırmak için süperhidrofobik yüzeyler kullanımının potansiyelini incelemişleridir (Mahmoodi et al., 2017). Bunun için NACA 4412, 4418 ve 4424 kanat profilleri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları, küçük hücum açılarında ($<5^\circ$) süperhidrofobik yüzeyler için kaldırma kuvvetinde % 66'ya kadar bir artış ve sürüklenme kuvvetinde ise %45 varan bir düşüşe neden olduğunu göstermiştir. Sonuçlar ayrıca daha büyük hücum açılarında ($>5^\circ$) ise süperhidrofobik kanat profili için kaldırma kuvvetindeki artış ve sürüklenme kuvvetindeki azalmaya daha sınırlı düzeyde gerçekleşmiştir.

Kaldırma kuvvetini arttırmak ve sürüklenme kuvvetini azaltmak, daha iyi kanat profilleri tasarlamının iki temel amacıdır. Bu nedenle, süperhidrofobik kanatların kullanılması, daha verimli kanat profilleri tasarlamada potansiyel olarak yeni bir yol açabilir. Dolayısıyla bu çalışmada seçilen NACA 4418 kanat profili yüzeyi hidrofobik/süperhidrofobik hale getirilerek, bu uygulamaların kanat profiline kaldırma ve sürüklenme katsayıları gibi aerodinamik performanslarına etkilerini farklı hücum açılarında araştırılarak, bu konuda literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır.

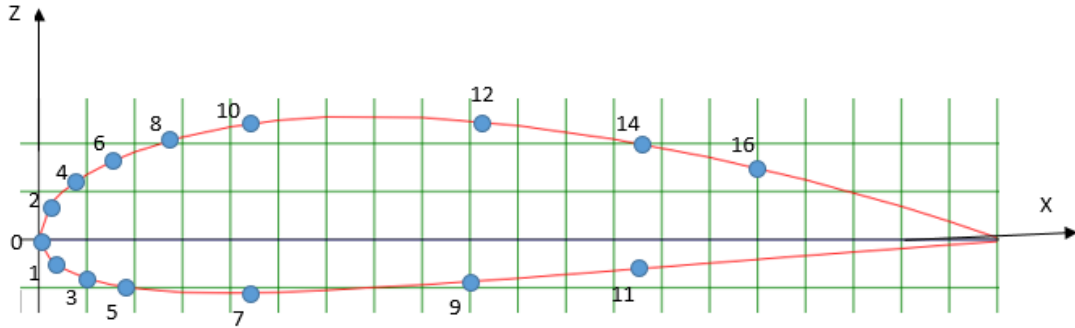
2. Materyal ve Metot

Deneylerde kullanılmak üzere NACA 4418 kanat profili seçilmiştir. Bu kanat profili düşük hızlar ve düşük Re sayıları için NACA tarafından geliştirilmiştir. Bu kanat profilleri yaygın olarak çok hafif insanlı uçaklarda, rüzgâr türbin kanatçıklarında kullanılmaktadır. Aerodinamik performans deneyleri GDJ. INC. Marka FLOTEK 1440 model, maksimum 40 m/s rüzgâr hızı üretebilen, emmeli tip, 30X30 cm deney haznesine sahip rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de kanat profiline Rüzgâr tüneli test alanındaki görünüşü verilmiştir.



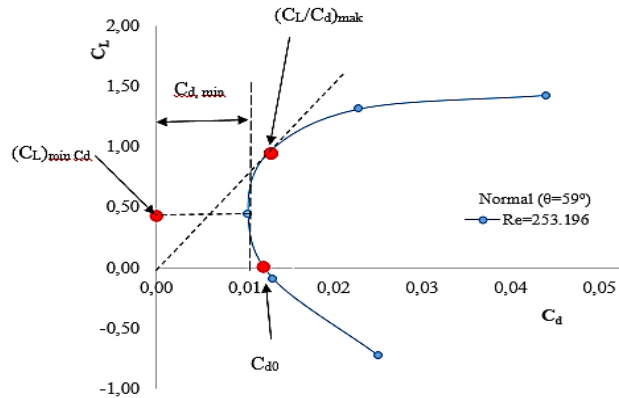
Şekil 1. Deneysel olarak kullanılan kanat profilinin rüzgâr tüneli test alanındaki görünüşü.

Kaldırma ve sürüklenme katsayılarının hesaplanmasında şekil 2’de gösterildiği gibi kanat profilinin üst kısmında 8, alt kısmında 7 olmak üzere toplam 15 noktadaki basınç istasyonlarından ölçülen basınç ölçüm değerleri kullanılmıştır. Ölçüm istasyonları deneylerden önce manometre kullanılarak kalibre edilmiştir. Rüzgâr tüneli içerisinde serbest akım hızı bir anemometre aracılığıyla ölçülmüştür. Ayrıca statik pitot tüpü ile ölçülerek kontrol edilmiştir. Deneyler sırasında laboratuvar sıcaklığının $15\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve nem oranının ise $70\% \pm 10\%$ aralığında olduğu ölçülmüştür.



Şekil 2. Basınç Ölçüm İstasyonları.

Kanat üzerindeki basınç dağılımının uyguladığı toplam kuvvet, toplam yüzey integrali olarak ifade edilebilir. Ölçüm istasyonları belirli aralıklar yerleştirildiğinden sürekli bir basınç dağılımı olmadığından kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri sayısal bir toplamla hesaplanmıştır. Şekil 3’te, kaldırma katsayısının sürüklenme katsayısı ile değişimini gösteren bir grafik verilmiştir. Bu grafik üzerinde minimum sürüklenme katsayısı ($C_{d, \min}$), minimum sürüklenme katsayısında kaldırma katsayısı ($C_{L, \min C_d}$), sıfır kaldırmadaki sürüklenme katsayısı (C_{d0}) ve kaldırma katsayısının sürüklenme katsayısına oranının maksimum değeri $(C_L/C_d)_{\max}$ değerleri gösterilmiştir. Deney sonuçları kullanılarak yukarıda sıralanan değerler bulunmuş ve ileri ki bölümde Tablo 1’de sunulmuştur.



Şekil 3. Kaldırma Katsayısının Sürüklenme Katsayısı İle Değişimini Ve Bazı Özel Katsayıların Hesaplanması.

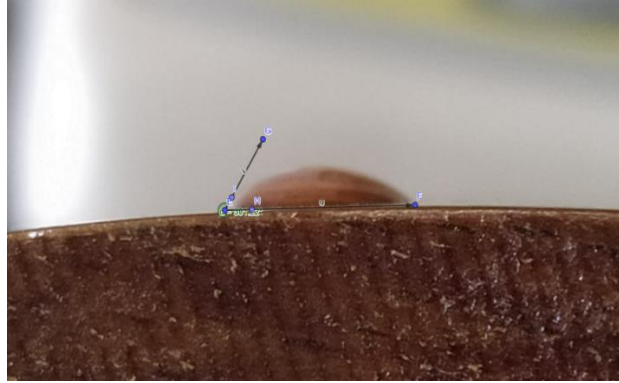
Islanıklık niteliklerinin belirlenmesi için sıvı damlasının yüzeyde temas açısıyla ilgili genel olarak üç farklı durumu belirlenmiştir. Temas açısı 90° ’den az ise ıslanır (hidrofilik), 90° ve 150° arasında ise ıslanmaz (hidrofobik), 150° ’den çok ise süper ıslanmaz

(süperhidrofobik) yüzey olarak adlandırılmaktadır. Hidrofobik yüzeylerin sağlanmasında sprej, kaplama, mikro yüzey işlenmesi ve düzenli yüzey fabrikasyonu gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada kanat profil yüzeylerine hidrofobiklik kazandırmak için sprej kaplama metodu kullanılmıştır. Başlangıç deneyleri olan imal edilen kanat profilinin aerodinamik performansının belirlenmesi ile ilişkili deneyler tamamlandıktan sonra profil test alanından çıkarılarak temizlenmiş ve üzerine ticari hidrofobik solüsyon olan "Vodasel" marka şeffaf sprej sıkılarak bekletilmeye bırakılmıştır. Spreyin yüzeyi tam olarak kaplaması için 4 saat sonra ikinci defa sıkılmış ve 1 gün bekletilmiştir. Hidrofobik yüzeyle yapılan deneylerin ardından kanat yüzeyinin süperhidrofobikleştirilmesi aşamasına geçilmiştir. Bunun için sprej kaplama yöntemi seçilmiş ve Mertech İleri Teknoloji Malzemeleri A.Ş tarafından modifiye edilen Mertech-Sol hidrofobik floropolimer esaslı malzeme kullanılmıştır. Bu solüsyon uygulanmadan önce kanat profili yüzeyi iyice temizlenmiştir. Solüsyon profil yüzeyine uygulandıktan sonra 1 gün bekletilmeye bırakılmış ve yüzeyle efektif bir şekilde etkileşimi için ısı işlem uygulanmıştır. Hidrofobiklik derecesinin ölçülmesi için, yüksek çözünürlüklü kamera kullanılarak yüzeyin yakın mesafeden fotoğrafları çekilmiştir. Yüzeyin hidrofobiklik derecesinin belirlenmesine "GeoGebra Classic" yazılımının derece ölçme fonksiyonundan yararlanılmış, yüzeyin yakın mesafeden çekilen fotoğrafları kullanılmıştır. Deneysel çalışmada rastgele hatayı azaltmak basınç ölçümleri için en az 10 ve hız ölçümü için ise en az 3 ölçüm sonucu alınarak bu verilerin ortalama değeri hesaplamalarda kullanılmıştır. Ayrıca deney sonuçlarındaki toplam belirsizlik hesaplanmıştır (Kline ve McClintock, 1953). Basınç ölçümlerinde hata payı (w_p) \pm %0.25 ve serbest akım hız ölçümlerinde hata payı ise (w_v) ise \pm %1'dir. Hesaplanan parametrelerdeki toplam belirsizlik miktarı Denklem 1'de verilmiştir. Toplam belirsizlik Denklem 1'den, 1.03 olarak hesaplanmıştır.

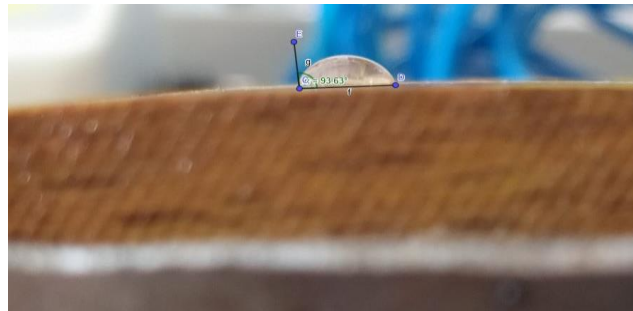
$$W_{toplam} = \sqrt{(w_p)^2 + (w_v)^2} \quad (1)$$

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada sprej kaplama yöntemi kullanılarak NACA 4418 kanat profilinin alt ve üst kanat yüzeylerinde iki farklı hidrofobiklik derecesine sahip yüzey elde edilmiştir. Hidrofilik (Normal), hidrofobik ve süperhidrofobik yüzeyler olmak üzere üç farklı durum için, kaldırma ve sürüklenme katsayıları, 15 m/s (Re = serbest akım hızında ve 6 farklı hücum açısında (-10°, -5°, 0°, 5°, 10°, 15°) rüzgâr tüneline deneysel olarak belirlenerek birbiriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da normal ve sprej kaplama yöntemi kullanılarak yüzeyleri su itici malzeme ile kaplanan kanat profillerinin yüzeylerinin su ile temas açılarının ölçümleri verilmiştir.



Şekil 4. Su Damlasının Normal Kanat Profili Üzerinde Yüzeyle Temas Açısının Belirlenmesi ($\Theta=59^\circ < 90^\circ$: Hidrofilik).

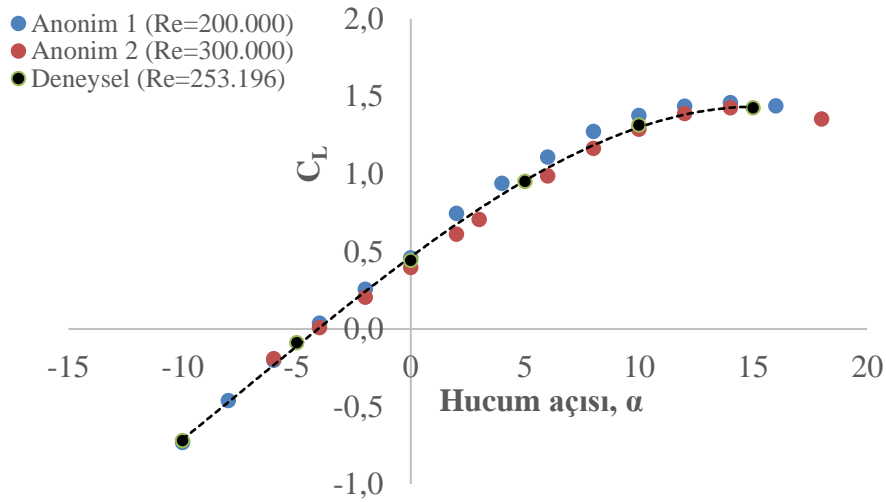


Şekil 5. Ticari Hidrofobik Solüsyon Uygulanan Kanat Profilinde Su Damlasının Yüzeyle Temas Açısının Belirlenmesi ($\Theta=93^\circ > 90^\circ$: Hidrofobik).

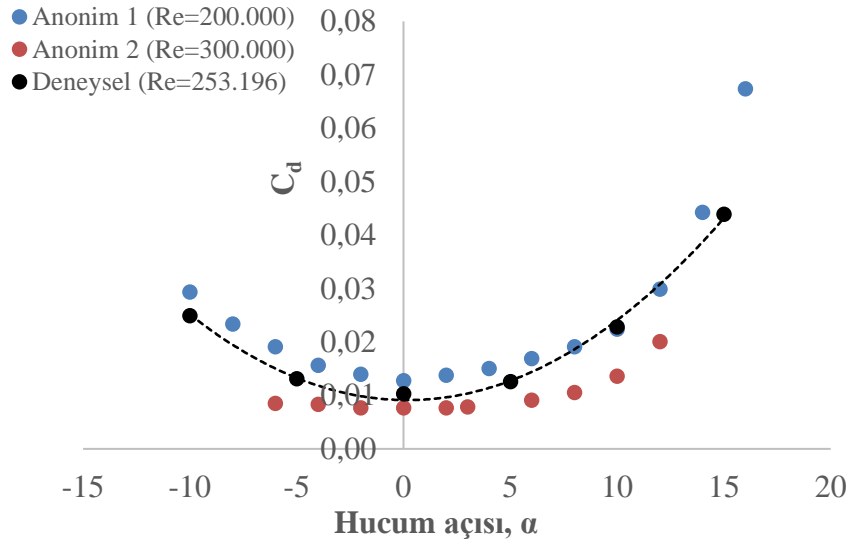


Şekil 6. Floropolimer Esaslı Malzeme İle Kaplanmış Kanat Profilinde Su Damlasının Yüzeyle Temas Açısının Belirlenmesi ($\Theta=154^\circ > 150^\circ$: Süperhidrofobik).

Normal yüzey için temas açısı 59° , ticari hidrofobik solüsyon uygulanan kanat profile için 93° ve floropolimer esaslı malzeme ile kaplanmış kanat profile için ise 154° olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre normal kanat profil yüzeyi hidrofilik bir karaktere sahip iken, uygulanan kaplamalardan sonra kanat profilinde hidrofobik ve süperhidrofobik özelliğe sahip yüzeyler elde edilmiştir. Rüzgar tünelineki deneylerin ve hesaplamaların güvenilirliği kontrol etmek amacıyla elde edilen veriler Şekil 7 ve Şekil 8’de gösterildiği gibi literatür ile karşılaştırılmıştır (Anonim 1, *Airfoil Tools NACA 4418*, 2020; Anonim 2, Bijl et al., 2020). Şekil 7’de görüldüğü üzere, beklendiği gibi negatif hücum açılarında negatif kaldırma katsayısı elde edilmiş, hücum açısının pozitif değerlere doğru değiştirildiğinde kaldırma katsayısının arttığı ve pozitif değerlere ulaştığı görülmektedir. Şekil 8’de sürüklenme katsayısının hücum açısı ile değişimleri incelendiğinde negatif hücum açılarından pozitif hücum açılara doğru gidildikçe sürüklenme katsayısının azalarak minimum değerine ulaştığı sonra pozitif hücum açısına doğru hücum açısındaki artışla sürüklenme katsayısının artmaya devam ettiği görülmektedir. Deney verileri kullanılarak hesaplanan kaldırma ve sürüklenme katsayısı değerlerinin literatür verileri ile benzer eğilimlere sahip olduğu, ancak büyüklük olarak literatür değerlerinden bir miktar farklı olduğu görülmektedir. Bu fark ise %10’nun altındadır. Bu sonuçlar deney sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermektedir. Deney sonuçları ile literatürdeki sonuçların büyüklükleri arasındaki farkın sebebinin, hem bu çalışmada kullanılan kanat profilinin hem de karşılaştırılan literatürde kullanılan kanat profillerinin imalatındaki farklılıklar ile deney koşul ve hassasiyetlerinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

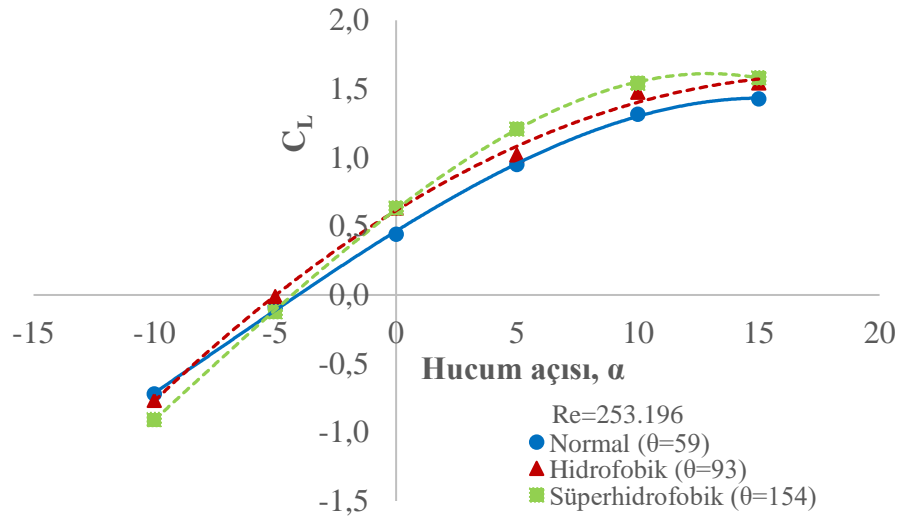


Şekil 7. Deneysel Verileri Kullanılarak Hesaplanan Kaldırma Katsayılarının Literatür İle Karşılaştırılması.



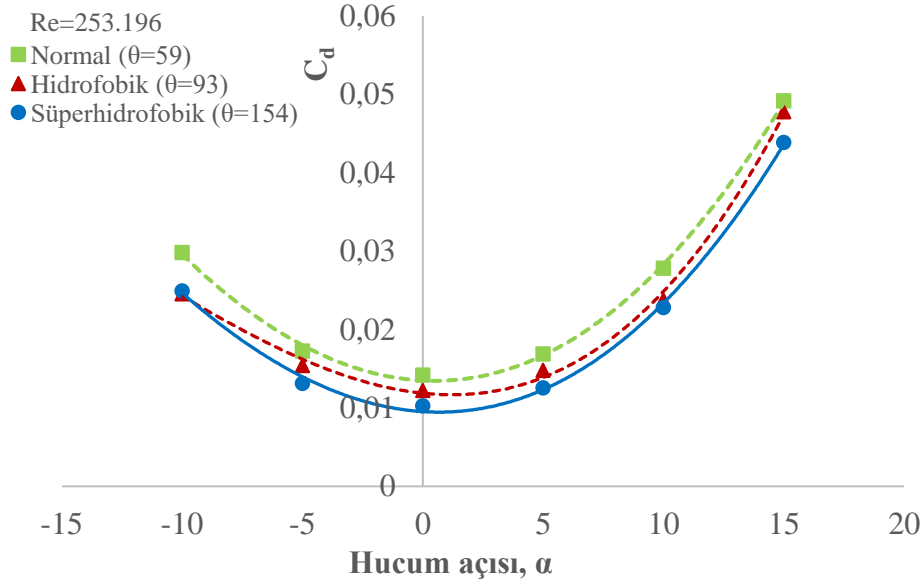
Şekil 8. Deneysel Verileri Kullanılarak Hesaplanan Sürüklenme Katsayılarının Literatür İle Karşılaştırılması.

Şekil 9'da üç durum için [normal orijinal ($\theta=59^\circ$); hidrofobik ($\theta=93^\circ$); süperhidrofobik ($\theta=154^\circ$)] kaldırma katsayılarının hücum açısı ile değişimi verilmiştir. Bu şekle bakıldığında negatif hücum açılarında kaldırma katsayısının negatif değerler aldığı görülmektedir. Hücum açısındaki artışla beraber kaldırma katsayısı da artarak yaklaşık -4° hücum açısında pozitif değere ulaşmaktadır. Daha sonra artan hücum açısı değerleri ile, kaldırma katsayısı artmaya devam etmekte ve 15° 'lik hücum açısı yakınlarında maksimum değerine ulaşmaktadır. Bu grafikteki sonuçlar hidrofobik ve süperhidrofobik uygulamaların kaldırma katsayısı üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığı aksine özellikle kaldırma katsayılarında bir miktar artışa neden olduğunu göstermektedir.



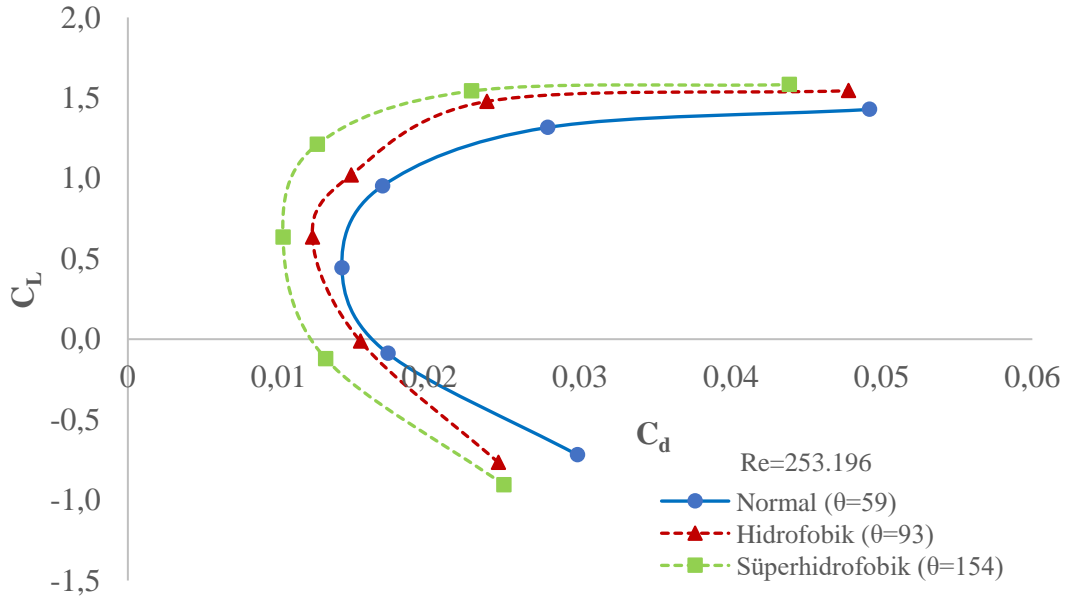
Şekil 9. Kaldırma Katsayısının Üç Farklı Durum İçin [Normal Orijinal ($\Theta=59^\circ$); Hidrofobik ($\Theta=93^\circ$); Süperhidrofobik ($\Theta=154^\circ$)] Hücum Açısı İle Değişimi (Re=253.196).

Şekil 10'da üç durum için [normal orijinal ($\theta=59^\circ$); hidrofobik ($\theta=93^\circ$); süperhidrofobik ($\theta=154^\circ$)] sürüklenme katsayılarının hücum açısı ile değişimi verilmiştir. Bu grafikteki sonuçlar hidrofobik ve süperhidrofobik uygulamaların sürüklenme kuvvetini azaltarak sürüklenme katsayısı düşürdüğünü göstermektedir.



Şekil 10. Sürüklenme Katsayısının Üç Farklı Durum İçin [Normal ($\Theta=59^\circ$); Hidrofobik ($\Theta=93^\circ$); Süperhidrofobik ($\Theta=154^\circ$)] Hücüm Açısı İle Değişimi (Re=253.196).

Şekil 9 ve şekil 10'daki sonuçları bakıldığında, özetle hidrofobik ve süperhidrofobik kanat profillerinde, normal kanat profiline göre kaldırma katsayılarında iyileşme eğilimi görünürken, sürüklenme katsayılarında ise düşüş eğilimleri dikkati çekmektedir. Özellikle kanat profili üzerinde kaldırma kuvvetinin oluşumunu sağlayan, kanat alt ve üst yüzeylerinde basınç farkının oluşmasıdır, bu basınç farkının yaratılmasında ise sınır tabakası önemli bir görev üstlenmektedir. Hidrofobik ve süperhidrofobik uygulamanın sınır tabakanın yüzeyden ayrılmasının geciktirdiği bu yüzden de kaldırma katsayılarında arttığı değerlendirilmiştir. Direnç katsayısındaki azalma ise büyük oranda sınır tabakanın uzun bir süre yüzeye tutunmuş olarak kalması ve bu nedenle basınç direncinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca bilindiği üzere sürtünme direnci viskoziteye önemli ölçüde bağlıdır ve viskozitenin artması ile artar. Hidrofobik ve süperhidrofobik uygulamaların kanat profil yüzeyinde pozitif bir viskozite gradyanı oluşturarak, sürüklenme katsayısındaki düşüşlerde etkili olduğu da değerlendirilmiştir. Şekil 11'de üç durum için [normal orijinal ($\theta=59^\circ$); hidrofobik ($\theta=93^\circ$); süperhidrofobik ($\theta=154^\circ$)] kaldırma katsayısının sürüklenme katsayısı ile değişimi verilmiştir.



Şekil 11. Kaldırma Katsayısının Üç Farklı Durum İçin [Normal ($\Theta=59^\circ$); Hidrofobik ($\Theta=93^\circ$); Süperhidrofobik ($\Theta=154^\circ$)] Sürüklenme Katsayısı İle Değişimi (Re=253.196).

Bu grafik kullanılarak $C_{d, \min}$, $C_{L, \min}$, C_{d0} ve $(C_L/C_d)_{\max}$ hesaplanarak Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kanat Profillerinin Bazı Özel Durumlar İçin Karşılaştırılması

	$\theta=59^\circ$	$\theta=93^\circ$	$\theta=154^\circ$
$(C_L/C_d)_{\text{mak}}$	59.06	72.93	100.5
$C_{d, \text{min}}$	0,0141	0,0122	0,0102
$C_{L, \text{min } C_d}$	0,4435	0,6562	0,6181
C_{d0}	0,0161	0,0152	0,0119

Şekil 11 ve Tablo 1’de verilen sonuçlara bakıldığında $(C_L/C_d)_{\text{mak}}$ değerinin normal yüzey için, hidrofobik ve süperhidrofobik yüzeyden daha büyük olduğu, süperhidrofobik yüzeyin değerinin ise hidrofobik yüzeyinkinden daha büyük olduğu görülmektedir. C_L/C_d oranı airfoilin verimliliğini gösterir. Yüksek C_L/C_d oranlı airfoilin, düşük C_L/C_d oranlı airfoilden daha verimlidir. Yüzeylere spray yöntemi ile kaplanması ve yüzeylere hidrofobik ve süperhidrofobik özellik kazandırılması kanat profillerinin verimlerini artırmıştır. C_{d0} , sürtünme ve basınç dağılımları ile ilişkilidir. Ayrıca, C_{d0} genellikle bir hava aracının aerodinamik temizliğinin bir göstergesi olarak kullanılır. C_{d0} değerleri karşılaştırıldığında normal kanat profilinin en yüksek, süperhidrofobik kanat profilinin ise en düşük değere sahip olduğu görülmektedir. C_{d0} değerlerindeki değişimlerin, ıslanan alanın (dış hava akışıyla temas eden alan) kanat alanına oranındaki önemli bir farktan kaynaklandığı değerlendirilmiş, hidrofobik ve süperhidrofobik kanat profillerinin aerodinamik iyileşmesinin bir göstergesi olarak yorumlanmıştır. $C_{d, \text{min}}$ ve $C_{L, \text{min } C_d}$ kanat profili seçiminde oldukça önemli parametrelerdir. Sonuçlar $C_{d, \text{min}}$, en düşük değerini süperhidrofobik kanat profili için alırken en yüksek değerini ise normal kanat profili için almaktadır. $C_{d, \text{min}}$ değerinin küçük olması istenir. Bu değer düşük olması, kanat profilinin daha düşük dirençle çevredeki viskoz havada hareket etmesi anlamına gelmektedir. $C_{L, \text{min } C_d}$ değeri normal kanat profili için en düşük, süperhidrofobik kanat profili için en yüksek değere sahiptir. Buda hidrofobik ve süperhidrofobik kanat profilinin, normal kanat profiline göre daha düşük dirençle çevredeki viskoz havada hareket ettiğinde daha fazla kaldırma kuvveti meydana getirebildiğini göstermektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Normal (hidrofilik), hidrofobik ve süperhidrofobik yüzey özelliğine sahip kanat profilinin 15 m/s ($Re=253.196$) serbest akım hızında 6 farklı hücum açısında (-10° , -5° , 0° , 5° , 10° , 15°) kaldırma ve sürüklenme katsayıları deneysel olarak belirlenerek birbiriyle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Normal (hidrofilik) kanat profiline, hidrofobik ve süperhidrofobik özellik kazandırılması kanat profilinin kaldırma katsayılarını tüm hücum açıları dikkate alındığında sırasıyla ortalama %15 ve %23 oranında iyileştirmiştir.
- Normal (hidrofilik) kanat profiline, hidrofobik ve süperhidrofobik özellik kazandırılması kanat profilinin sürüklenme katsayılarını tüm hücum açıları dikkate alındığında sırasıyla ortalama %12 ve %20 oranında düşürmüştür.
- Normal (hidrofilik) kanat profiline, hidrofobik ve süperhidrofobik özellik kazandırılması kanat profilinin $C_{d, \text{min}}$, $C_{L, \text{min } C_d}$, C_{d0} ve $(C_L/C_d)_{\text{mak}}$ değerlerini olumlu yönde değiştirmiştir.

Bu çalışmada, kanat profili üretim kusurları ve pürüzlülük açısından detaylı bir inceleme yapılmamış, tüm iyileşmeler yüzeyin hidrofobiklik/süperhidrofobik özellik kazandırılmasıyla ilişkilendirilmiştir. İleriki çalışmalarda farklı kanat profilleri için farklı hız ve hücum açılarında hidrofobik ve süperhidrofobik yüzey uygulamalarının kaldırma ve sürüklenme katsayıları gibi kanat profilinin aerodinamik performansları incelenebilir, bu incelemelerde kanat profillerinin kusurları da dikkate alınabilir. Ayrıca iklimsel rüzgar tünelleri yani uçuş (gerçekçi) koşullarında hidrofobik/süperhidrofobik yüzeye sahip kanat profillerinin aerodinamik performansları araştırılması daha gerçekçi sonuçlara ulaşılmasını sağlayabilir. Tüm kanat profili yüzeyinin hidrofobik/süperhidrofobik olması mutlaka en iyi performansı vermeyebilir. Bu nedenle, profilin seçici hidrofobik/süperhidrofobikleştirilmesi bir sonraki adım olabilir. Yani, tüm yüzeyi süperhidrofobik yapmaktan ziyade yüzeyin kısmi hidrofobik/süperhidrofobikleştirilmesinin etkileri araştırılabilir.

Referanslar

- Anonim 1, Airfoil Tools NACA 4418. (2020). <http://airfoiltools.com/polar/details?polar=xf-naca4418-il-200000>, Erişim tarihi 10.04.2020
- Anonim 2, Bijl, H., and Timmer, N. (2020). Introduction to Aerospace Engineering Aerodynamics 9 & 10, Erişim tarihi 10.04.2020
- Campbell, B. A., and Bezos, G. M. (1989). Steady -State and Transitional Aerodynamic Characteristics of a Wing in Simulated Heavy Rain. NASA Technical Paper, 2932.
- Cao, L., Jones, A. K., Sikka, V. K., Wu, J., and Gao, D. (2009). Anti-Icing superhydrophobic coatings. *Langmuir*, 25(21), 12444–12448. <https://doi.org/10.1021/la902882b>

- De Pauw, D., and Dolatabadi, A. (2017). Effect of superhydrophobic coating on the anti-icing and deicing of an airfoil. *Journal of Aircraft*, 54(2), 490–499. <https://doi.org/10.2514/1.C033828>
- Genç, S., Özişik, G., and Kahraman, N. (2008). Düz Flapli Naca0012 Kanat Profilinin Aerodinamik Performansinin İncelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 28(1), 1–8.
- Güzelbey, İ. H., Eraslan, Y., and Doğru, M. H. (2018). Performansı Açısından XFLR5 Kullanılarak Nümerik Olarak İncelenmesi. *The Black Sea Journal of Sciences*, 8(1), 48–65. <https://doi.org/10.31466/kfbd.542566>
- Jung, S., Dorrestijn, M., Raps, D., Das, A., Megaridis, C. M., and Poulidakos, D. (2011). Are superhydrophobic surfaces best for icephobicity? *Langmuir*, 27(6), 3059–3066. <https://doi.org/10.1021/la104762g>
- Kline, S. J. and F. A. McClintock. (1953). "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, 3-8
- Krishnan, K. G., Milionis, A., Loth, E., Farrell, T. E., Crouch, J. D., and Berry, D. H. (2017). Influence of hydrophobic and superhydrophobic surfaces on reducing aerodynamic insect residues. *Applied Surface Science*, 392, 723–731. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.09.096>
- Liu, Z., Gou, Y., Wang, J., and Cheng, S. (2008). Frost formation on a super-hydrophobic surface under natural convection conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(25–26), 5975–5982. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.03.026>
- Mahmoodi, M., Nosratollahi, M., and Chini, S. F. (2017). The potential of using superhydrophobic surfaces on airfoils and hydrofoils: a numerical approach. *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering*, 7(1), 44. <https://doi.org/10.1504/ijcmsse.2017.088726>
- Okulova, N., Taboryski, R., Sørensen, J. N., Shtork, S. I., and Okulov, V. L. (2018). Aerodynamic effect of icing/rain impacts on superhydrophobic surfaces. *AIP Conference Proceedings*, 2027(November). <https://doi.org/10.1063/1.5065139>
- Rhode, R. V. (1941). Some effects of rainfall on flith of airplanes and on instrument indications. *NACA TN*, 803. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19930080785> 2020-06-14T10:52:32+00:00Z
- Wu, Z., and Cao, Y. (2015). Numerical simulation of flow over an airfoil in heavy rain via a two-way coupled Eulerian-Lagrangian approach. *International Journal of Multiphase Flow*, 69, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.11.006>



Tek Aşamalı Ortak Sinterleme Yapılarak Çeşitli Kalınlıklarda Üretilen Tek Odacıklı Anot Destekli Katı Oksit Yakıt Pillerinin Performansı

Performance of Anode Supported Single Chamber Solid Oxide Fuel Cells Produced in Various Thicknesses by Single-step Co-sintering

Yunus Sayan¹, Jung-Sik Kim², Houzheng Wu²

¹Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 13100, Bitlis, Türkiye

²School of Aeronautical, Automotive, Chemical and Materials Engineering, Loughborough University, LE11 3TU, Loughborough, United Kingdom

Başyuru/Received: 16/11/2022

Kabul / Accepted: 10/01/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Bu çalışmada, tek aşamalı ortak sinterleme yöntemiyle yapılan anot destekli, düzlemsel tek odacıklı katı oksit yakıt pilinin performansı test edilmiştir. Ek olarak, azaltılmış elektrolit kalınlığının ve artırılan anot kalınlığının (sinterleme sırasında düşük eğrilik elde edilmesinde faydalı olduğu kanıtlandığından dolayı) pil performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Tüm piller katot, elektrolit ve anot olarak: gadolinyum katkılı seryum-lantan stronsiyum kobaltit ferrit CGO-LSCF, gadolinyum katkılı seryum (CGO) ve nikel oksit- gadolinyum katkılı seryumdan (NiO-CGO) oluşmuştur. Her bir pil farklı kalınlıkta ve farklı kalınlık oranlarında gözenekli ve çok katmanlı yapılar halinde yapılmıştır. Bu pillerin performansları 600°C sıcaklıkta tek haznede metan-oksijen karışımlarında test edilmiştir. Bu çalışma kapsamında anot kalınlığı 800 µm, elektrolit kalınlığı 20 µm ve katot kalınlığı 40 µm olan nihai düzlemsel pilin maksimum güç yoğunluğu ve açık devre voltajı, metan-oksijen oranı (R)'nin 1 olduğu ortamda sırasıyla 30.69 mW cm⁻² ve 0.71 V olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

"Katı Oksit Yakıt Pili, Tek Odacıklı, Ortak Sinterleme, Pil İmalatı, Pil Performansı"

Abstract

In this study, the performance of an anode supported planar single-chamber solid oxide fuel cell prepared by single-step co-sintering method is tested. Additionally, the effects of reduced electrolyte thickness and increased anode thickness (proven beneficial in achieving low curvature during sintering) on cell performance were investigated. All cells are composed of gadolinium-doped cerium-lanthanum strontium cobaltite ferrite (CGO-LSCF), gadolinium-doped cerium (CGO) and nickel oxide-gadolinium-doped cerium (NiO-CGO) as cathode, electrolyte and anode. Each cell is made of porous multi-layer structures with different thickness and thickness ratios. The performances of these cells were tested in methane-oxygen mixtures in a single chamber at 600°C. The maximum power density and open circuit voltage of the final planar cell with a thickness of 800:20:40 µm, anode: electrolyte: cathode, were obtained as 30.69 mW cm⁻² and 0.71 V respectively, in an environment with a methane-oxygen ratio (R) of 1.

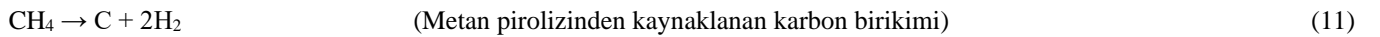
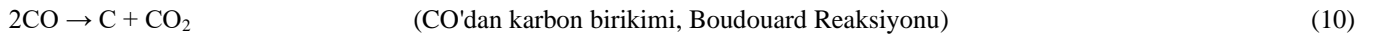
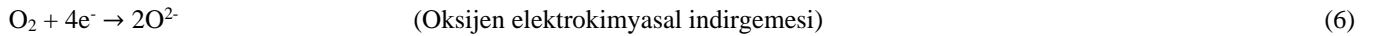
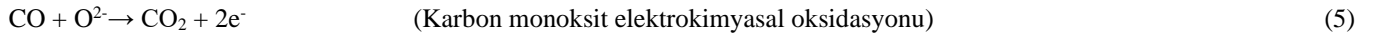
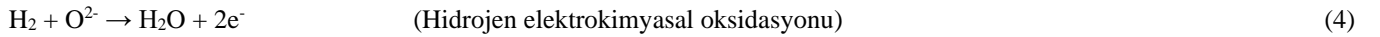
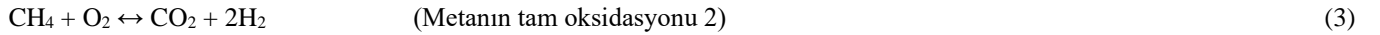
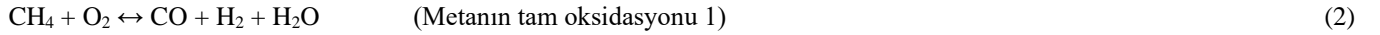
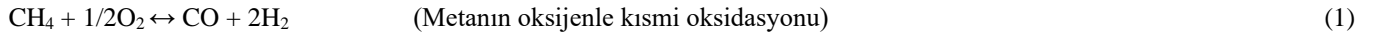
Key Words

"Solid Oxide Fuel Cell, Single Chamber, Co-Sintering, Cell Manufacturing, Cell Performance"

1. Giriş

Katı oksit yakıt pillerinin (KOYP) yeni bir konfigürasyonu olan tek odacıklı katı oksit yakıt pilleri (TO-KOYP), çift odacıklı KOYP'lerde (ÇO-KOYP) karşılaşılan gaz sızdırmazlık, karmaşık manifoldlama vb. gibi belirli sorunları azalttığı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (Kuhn & Napporn, 2010). Geleneksel KOYP'lerin aksine TO-KOYP'ler, yakıt ve oksitleyici gaz karışımını içeren sadece bir gaz bölmesinden oluşmaktadır (Hibino, Hashimoto, vd., 2000; Kuhn & Napporn, 2010; Suzuki, Jasinski, Petrovsky, Anderson, & Dogan, 2004; Yano, Tomita, Sano, & Hibino, 2007).

Bir TO-KOYP'nin çalışma prensibi geleneksel veya ÇO-KOYP'nin çalışma prensibinden farklıdır. Bir TO-KOYP'nin çalışması prensibinde anot ve katodun katalitik seçicilik özellikleri; yakıt-hava karışım oranına ve her bir gazın kısmi basıncına bağlıdır (Tian vd., 2013). Anot, reaksiyon (1)-(3) ile gösterildiği gibi, hidrokarbon bazlı yakıtların kısmi ve tam oksidasyonu sonucunda sentez gazı olarak CO, H₂ ve H₂O oluşur. Ayrıca, reaksiyon (4) ve (5) ile gösterildiği gibi, bu sentez gazlarının elektrokimyasal oksidasyonu için ideal olarak aktif olmalıdır. Bununla birlikte, oksijen elektrokimyasal indirgemesi düşük olmalıdır. Anotun aksine katot, reaksiyon (6)'da gösterildiği gibi oksijen indirgemesine aktif olmalı ve aynı zamanda yakıt oksidasyonu düşük olmalıdır (Tian vd., 2013; Viricelle, Udriou, Gadacz, Pijolat, & Pijolat, 2010; Zhu vd., 2010). Bir TO-KOYP'de, saf hidrojenin oksijen ile yüksek reaktivitesi nedeniyle yakıt olarak kullanılmasından kaçınılmalıdır. Bunun sebebi, hidrojen ve oksijenin belirli sıcaklık ve karışım oranlarında kendiliğinden tutuşmaya başlamasıdır. Bu nedenle metan, propan vb. hidrokarbonların TO-KOYP'lerde yakıt olarak kullanılması tercih edilmektedir. Bu yakıtların kısmi oksidasyonu yoluyla dahili olarak hidrojen oluşturulabilir (Briault, Rieu, Laucourmet, Morel, & Viricelle, 2014; Guo vd., 2013; Riess, 2008; Singhal & Kendall, 2003). Ancak hidrokarbon bazlı yakıt-hava karışımının yüksek sıcaklıktaki elektrokimyasal davranışı basit değildir. Meydana gelen reaksiyon sonucunda bileşenler ile kimyasal ürünler arasında birçok farklı kimyasal reaksiyonlar meydana gelebilmektedir. Örneğin: Denk. (7), (8) ve (9)'daki reaksiyonlar CO, H₂ ve H₂O gazlarının oluşumundan sonra anotta da oluşabilmektedir. Ek olarak; anot içinde karbon birikimini önlemek için (Reaksiyon (10) ve (11)) uygun akış hızları, sıcaklık ve gaz karışımı koşulları tanımlanmalıdır (Meunier, 2016).



TO-KOYP'ler, genellikle geleneksel KOYP'lerin faydaları ve zorluklarını içermektedirler. Bununla birlikte geleneksel KOYP'lere göre bazı avantaj ve dezavantajlara da sahiptirler. En büyük avantajlarından birisi ise, geleneksel KOYP'lere kıyasla TO-KOYP'lerin tek bir bölmede seyreltilmiş bir yakıt-hava gazı karışımında çalışması nedeniyle anot ve katot elektrotları arasında karmaşık manifoldlama ihtiyacı olmamasıdır. Bilindiği üzere ÇO-KOYP'lerde anot ve katoda gönderilen gazların birbirinden ayrılması gerektiğinden sızdırmazlık önlemleri alınmalıdır. Ancak TO-KOYP'lerde gaz sızdırmazlığı gerekmemektedir. Bu özellikler TO-KOYP'lerin karmaşık gaz manifoldu ve akış alanı yapıları gerektirmemesi sebebiyle basitleştirilmiş kompakt bir yapıya sahip olmalarını sağlamaktadır. Böylece geleneksel KOYP'lere kıyasla termal ve mekanik streslere karşı daha fazla dirençli olmaktadır. Bu da pilin daha kısa sürede başlatılması ve kapatılması ile sonuçlanmaktadır. TO-KOYP'nin bir diğer avantajı ise, yığın montajının geleneksel KOYP'lerden daha kolay olmasıdır (Kuhn & Napporn, 2010; M. Liu & Lü, 2013; Yin vd., 2015; Zhu vd., 2010). Bu basitleştirilmiş yapı aynı zamanda toplam sistem maliyetinde de önemli bir azalma sağlamaktadır. Bunlarında haricinde TO-KOYP'lerin aşağıda maddeler halinde verilen diğer faydalarından da söz edilebilmektedir.

1. Ekzotermik yakıt oksidasyon reaksiyonu sayesinde pilin sıcaklığı etkin bir şekilde yükseltilebilir, böylece elektrotların katalitik aktivitesinin yanı sıra iyonik iletkenlikleri de artmaktadır,

2. Gözenekli elektrolit uygulanabilmesinden dolayı çatlaklar ve mekanik kusurlar sistemde hava ve yakıt gazlarının karışmasını önlemeye gerek olmadığı için tolere edilebilmektedir.
3. Daha ucuz üretim yöntemlerinin kullanılmasına yol açmaktadır. Böylece üretim maliyetlerinin düşmesine neden olur.
4. CO veya CO₂ gazları oksijen gazının anotta C ile reaksiyonu sonucu meydana gelmektedir. Bunun sonucunda anotta daha az karbon koklaşması oluşur (Hao vd., 2006; Kuhn & Napporn, 2010; Yano vd., 2007).

Buna karşılık TO-KOYP'lerin verimliliği ve güç çıkışı aşağıda verilen nedenlerden dolayı geleneksel KOYP'lere kıyasla oldukça düşüktür:

1. Çok düşük yakıt kullanımı,
2. Katotta yakıtın kısmi oksidasyonu ve anotta oksijen indirgemesi gibi hem anot hem de katot taraflarındaki parazitik reaksiyon oluşumları,
3. Anot tarafından katot tarafına doğru sentez gazlarının (CO, H₂) çapraz difüzyonu.

Yukarıdaki maddelere istinaden düşük yakıt kullanımı, hem anot hem de katot elektrotlarının sırasıyla yakıt oksidasyonuna ve oksijen indirgemesine yönelik seçiciliğinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu elektrotlardaki yüksek akış hızları da düşük yakıt kullanımına sebep olmaktadır. Bunların yanı sıra bu pillerde, yüksek çalışma sıcaklığında yakıt-hava karışımı için yanma benzeri patlama riskleri meydana gelebilmektedir (Riess, 2008; T. S. Zhao & Ni, 2013).

TO-KOYP'lerin uygulanmasında ki temel sorun düşük pil verimliliğidir. Bu nedenle, bu pillerin potansiyel kullanım alanlarında uygulanabilmesi için yukarıda belirtilen özelliklerden faydalanılmalıdır (Kuhn & Napporn, 2010). TO-KOYP'ler; enerji hasat uygulamaları olarak kullanılabilirler. Örneğin, motorların egzoz gazından güç üretilmesi gibi. Bu nedenle, bu pillerin düşük verimliliği atık gazlardan elektrik enerjisi üretimi ile telafi edilebilmektedir. Bu tür bir enerji dönüştürme cihazı, yanmamış hidrokarbonları ve karbon monoksiti elektriğe dönüştürerek kirlenici emisyonu da azaltabilmektedir (Briault vd., 2014; Kuhn & Napporn, 2010; Nagao vd., 2008). Ayrıca çoklu gaz koşullarında veya gaz karışımlarının yüksek sıcaklıklarda olduğu zorlu endüstriyel ortamlarda sıcaklık, basınç ve gaz sensörü olarak da çalışabilmektedirler (Kuhn & Napporn, 2010; Tomita, Namekata, Nagao, & Hibino, 2007; Van Rij, Le, Van Landschoot, & Schoonman, 2001). TO-KOYP'ler, herhangi bir ambalaj tasarımına gerek kalmadan elektrotları doğrudan gaz karışımına maruz bırakılarak bir baca veya gaz tüpünün içine fabrikasyon formatlarında gömülebilirler. TO-KOYP, kojenerasyon sistemi olarak ÇO-KOYP ile birlikte kullanıldığında TO-KOYP'lerden salınan ısı, ÇO-KOYP'lerin gaz akışını önceden ısıtmak için kullanılabilir (Kuhn & Napporn, 2010; Morel, Roberge, Savoie, Napporn, & Meunier, 2007). İlave olarak, hidrokarbon reform sistemi olarak çift odacıklı KOYP'lerle birlikte kullanılabilirler. Daha fazla fizibilite sağlamak, basitleştirilmiş pil düzenlemesinin faydalarından yararlanmak ve düşük performansın üstesinden gelmek için uygun şekilde ekonomik ve verimli imalat yöntemlerinin dikkate alınması gerekmektedir.

Önceki çalışmamızda (Sayan, Venkatesan, Guk, Wu, & Kim, 2018) anot destekli düzlemsel bir TO-KOYP, tek aşamalı ortak sinterleme yoluyla sinterlenmiştir. Bu yöntem, özellikle gözenekli bir elektrolit toleransından dolayı TO-KOYP'lerin üretilmesinde iyi sonuçlara sebep olmuştur. Normal şartlarda iki veya daha fazla aşamada sinterlenen pilin, tek aşamada sinterlenmesine olanak sağlamıştır. Tek kademeli ortak sinterleme ile anot destekli düzlemsel bir TO-KOYP elde etmek için anot kalınlığı artırılmış ve elektrolit kalınlığı azaltılmıştır. Bu işlemler ise tek başına yeterli olmamıştır. Bunlara ek olarak uygun sıcak presleme ve sinterleme koşulları belirlenmiştir. Ayrıca pilin kenarında eğrilik oluşumunu önlemek için sinterleme sırasında gözenekli düz bir seramik plakası pil üzerine yerleştirilmiştir. Dahası farklı düzenlemeler yapılarak farklı sinterleme sıcaklıklarına sahip olan anot, katot ve elektrolitin aynı anda birlikte ve belirli bir sıcaklıkta sinterlenmesi sağlanmıştır. Daha detaylı bilgi referans (Sayan vd., 2018)'de mevcuttur. Bu çalışmanın amacı: tek aşamada ortak sinterlenmiş anot destekli düzlemsel bir TO-KOYP'nin performansını test etmek, anot ve elektrolit kalınlık değişikliklerinin pil performansı üzerindeki etkisini; CH₄ - O₂'nin çeşitli karışım oranlarında ve farklı akış hızlarında incelemektir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Elektrotlar ve elektrolit malzemeleri

Anot, elektrolit ve katot malzemesi olarak sırasıyla; nikel oksit- gadolinyum katkılı seryum (NiO-CGO), gadolinyum katkılı seryum (CGO) ve lantan stronsiyum kobaltit ferrit (LSCF) malzemeleri kullanılmıştır. Anot: Elektrolit: Katot (A:E:K) malzemeleri ayrı ayrı olarak şerit döküm yöntemi ile elde edilen şerit rulolar halinde satın alınmıştır ("Maryland Tape Casting, 2017"). Her bir şeridin ortalama kalınlığı 20 µm'dir. Bu şerit rulolar daha sonra anot destekli düzlemsel TO-KOYP'lerin elektrotları ve elektrolitini istenilen kalınlığı vermek ve kalınlık oranlarında oluşturmak için kullanılmıştır. Şeritleri oluşturan çeşitli bileşenlerin bilgileri tedarikçi firma tarafından verilmiştir (Sayan vd., 2018). Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, anot ve elektrolit şeritleri için parçacık boyutu 0,3 µm iken, aksine katot şeridinin parçacık boyutu 1 µm olarak seçilmiştir. Bunun sebebi: Anot ve elektrolite göre daha düşük sinterleme sıcaklığına sahip olan katodun sinterlenmesini geciktirerek, sinterleme sıcaklığını anot ve elektrolitin sinterleme sıcaklığına yaklaştırmaktır.

2.2. Pillerin hazırlanması

Pili oluşturmak için pilin her bir katmanı (anot, elektrolit ve katot) ayrı ayrı hazırlanmaktadır. Daha sonra bu katmanlar üst üste yerleştirilerek pil oluşturulur. İstenilen kalınlıkta anot elde etmek için, anot malzemesinden yapılan şerit arzu edilen boyutlarda anot

rulosundan kesilir. Fakat şerit rulonun ortalama kalınlığı 20 µm olduğundan, anota istenilen kalınlığı vermek için bu kesimlerden belirli sayılarda yapılmaktadır. Daha sonra kesilen her bir şerit üst üste konularak istenilen anot kalınlığı elde edilmektedir. Aynı işlemler elektrolit ve katot için de uygulanır. Arzu edilen kalınlıklarda anot, elektrolit ve katot oluşturulduktan sonra bu tabakalar üst üste sırası ile yerleştirilerek pil oluşturulur. Bu katmanlar daha sonra 60 °C sıcaklıkta ve 2 MPa basınçta sıcak preslenir (Carvel Heated Bench Top Hot Press, model: 3853CE-8, ABD). Bu tabakaların birleşmesi ve tam bir pil oluşturması için 5 dakika bekletilir (Sayan vd., 2018).

2.3. Farklı kalınlıklarda anot, elektrolit ve katot içeren TO-KOYP'lerin hazırlanması

Bir pildeki her bir bileşenin kalınlığı, ortak sinterleme yoluyla sinterlenmiş pilin performansı üzerinde doğrudan etkiye sahip olabilmektedir. Bu çalışma kapsamında söz konusu bu etkiyi değerlendirmek için Tablo 1'de listelendiği gibi farklı kalınlık kombinasyonlarına sahip 4 pil hazırlanmıştır. Tüm piller aynı koşullar altında sıcak preslenmiş, ardından bir ısıtma ve soğutma hızı profili altında 1 saatlik bekleme süresiyle 1200 °C'de şu şekilde sinterlenmiştir: Oda sıcaklığından 500 °C'ye 1 °C dak⁻¹, 500 °C'den 900 °C'ye 2 °C dak⁻¹, 900 °C'den 1200 °C'ye 1 °C dak⁻¹ ısıtma hızı; 1200 °C'den oda sıcaklığına kadar 3 °C dk⁻¹ soğutma hızı. Her pilin genişlik (G) ve uzunluğu (U) sırasıyla 40 mm x 40 mm'dir. Bu piller 50 mm × 50 mm GxU'ya sahip sıcak preslenmiş pillerden kesilmiştir.

İlk olarak pil 1, pil 2, pil 3 ve pil 4 başlangıçta herhangi bir kısıtlama olmaksızın sinterlenmiştir. Daha sonra pil 1, pil 2 ve pil 4 tekrar hazırlanarak bunların üzerlerine yerleştirilmiş 50 mm x 50 mm GxU'ya sahip (0.15 mm kalınlık; 1.28 g kütle) gözeneksiz alümina plakası ile sinterlenmesi yapılmıştır. Sonrasında Pil 4'den bir tane daha yapılarak üzerine bir önceki alümina ile aynı genişlik ve uzunluğa sahip gözenekli bir alümina plakası (%40 gözeneklilik) yerleştirilerek bu pilin sinterlenmesi yapılmıştır. Söz konusu bu gözenekli alüminanın kalınlığı 1 mm olup kütlesi ise 7.31 g'dir. Alümina plakasının amacı: Sinterleme sırasında pillerin kenarlarındaki eğrilik oluşumlarını bastırarak engellemektir.

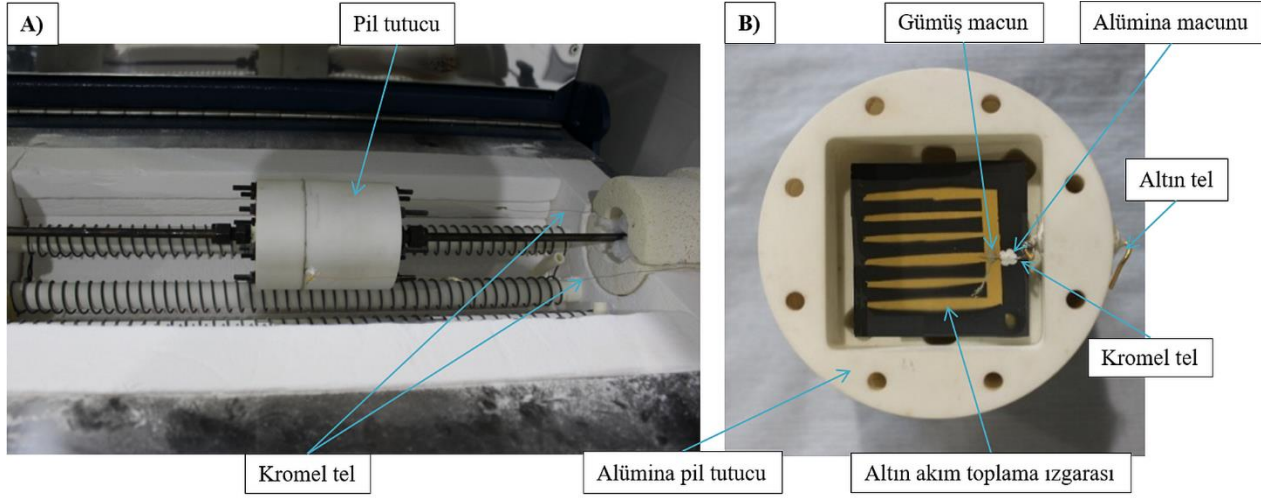
Tablo 1. Dört farklı düzlemsel anot destekli TO-KOYP, kalınlıkları ve kalınlık oranları

	Pil 1	Pil 2	Pil 3	Pil 4
Kalınlık Oranı A:E:K	10:2:2	20:2:2	20:1:2	40:1:2
Kalınlık (µm) A:E:K	200:40:40	400:40:40	400:20:40	800:20:40

2.4. Karakterizasyon ve performans test yöntemleri

Sinterlenmiş pillerin mikro yapısını karakterize edebilmek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope - SEM) ile enerji dağılımlı spektroskopisi (Energy Dispersive Spectroscopy - EDS) (Zeiss 1530-VP FEGSEM, Almanya) analizleri yapılmıştır. Ayrıca bu cihazlar ile Pil 4'ün kimyasal element haritalaması da yapılarak sinterleme sırasında herhangi bir yeni fazın oluşup oluşmadığı kontrol edilmiştir. Tüm görüntüler, 20 kV'lik bir hızlanma altında geri saçılan elektronlar (Back Scattered Electron -BSE) cihazı kullanılarak çekilmiştir. Görüntüleme sırasında elektronik şarjı önleyebilmek amacıyla, incelenen tüm yüzeylere bir Au-Pd alaşımı püskürtülmüştür. Tüm EDS spektrumları 20 kV'lik bir hızlanma voltajı uygulanarak elde edilmiştir. Sinterlenmiş bir pilin gözenek yapısını, tane boyutunu ve dağılımını doğru bir şekilde değerlendirebilmek amacıyla SEM ile görüntü almadan önce her bir pile özenle zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmıştır. Bu işlemler için yarı otomatik Struers LaboSystem (Almanya) cihazı kullanılmıştır. Numuneler, bakalite monte edildikten sonra zımparalama ve taşlama işlemine tabi tutulmuştur. Bakalit işlemi ise Struers CitoPress 5 (Almanya) cihazı kullanılarak yapılmıştır. SEM ile görüntüler alındıktan sonra pillerdeki gözenekli yapıyı analiz edebilmek için ImageJ programından faydalanılmıştır.

Açık devre voltajı (Open circuit voltage -OCV) ve pillerin polarizasyonu, CorrWare®/CorrView™ elektrokimyasal paketi (Scribner Associates Inc.) ile uyumlu bir potansiyostat (Solartron Analytical 1280C) kullanılarak ölçülmüştür. Ayrıca altın, Q150T S/E/ES Turbo-Pumped Sputter Coater kullanılarak akım toplayıcı olarak her iki elektrot üzerine püskürtülmüş ve kromel, (%90 Ni, %10 Cr) teli aşağıda Şekil 1'de gösterildiği gibi altın ızgaralarına gümüş macun kullanılarak bağlanmıştır. Ek olarak gümüş macun ile pile bağlanan kromel telin pil yüzeyinden bağlantısının kopmaması için kromel tel pil yüzeyine alümina macunu (AREMCO Ceramabond 552) kullanılarak sabitlenmiştir. Piller tek odacık koşulunda test edilmiş ve Şekil 1'de gösterildiği gibi akış yönüne dik bir alümina pil tutucusuna yerleştirilmiştir. Pilleri test edebilmek amacıyla anot elektrotları önce sırasıyla 0,01 l dk⁻¹ ve 0,19 l dk⁻¹ akış hızıyla akan bir hidrojen (H₂) ve nitrojen (N₂) gaz karışımında 600 °C'de 1 saat indirgenmiştir. Daha sonra bu piller metan (CH₄), oksijen (O₂) ve N₂ gazlarının belirli oranlarda oluşturduğu gaz karışımlarında 600°C'de farklı akış hızlarında test edilmiştir.



Şekil 1. (A) Deney tertibatı resmi (B) Yatay bir tüp fırına yerleştirilmiş numune tutucu

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Sinterleme sonuçları

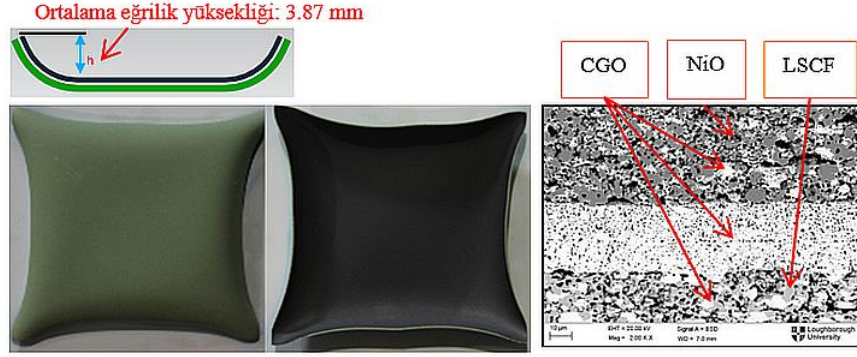
Anot destekli TO-KOYP'lerde anottan istenen özelliklerden bir tanesi, pile mekanik destek verecek şekilde yeterli kalınlığa sahip olmasıdır (Shimada vd., 2016; Shri Prakash, Senthil Kumar, & Aruna, 2014). Bu kalınlık aynı zamanda yakıt olarak metan kullanıldığı durumlarda CH_4 'ün reformuna ve bunun sonucunda oluşan reaksiyon gazları karbon monoksit (CO) ve H_2 'nin elektrokimyasal reaksiyonlarına izin verecek şekilde olmalıdır (Hao vd., 2006; Kuhn & Napporn, 2010). Yazarlar tarafından yürütülen önceki çalışmada (Sayan vd., 2018), uygun sıcak presleme koşullarının ve sinterleme profilinin tanımlanmasının tek aşamada tamamen düzlemsel anot destekli TO-KOYP'leri elde etmek için yeterli olmadığı deneysel sonuçlar ile gösterilmiştir. Sinterleme sırasında pildeki çatlama ve delaminasyon sorunlarının en aza indirilmesine veya ortadan kaldırılmasına rağmen pil kenarlarında eğrilik oluşumu önlenememiştir. Bu nedenle anot kalınlığının pil sinterlenebilirliği üzerindeki etkisinin yukarıda tanımlanan sinterleme koşullarında incelenebilmesi için kalınlığı 200 μm 'den 400 μm 'ye ve daha sonra 800 μm 'ye yükseltilmiştir. Benzer amaçlar için elektrolit kalınlığı 40 μm 'den 20 μm 'ye düşürülmüştür. Elektrolit kalınlığının düşürülmesinin bir diğer sebebi ise ohmik kayıplarını azaltmaktır.

Şeki 2; pil 1, pil 2, pil 3 ve pil 4'ün (herhangi bir kısıtlama olmaksızın) tek aşamadaki sinterleme sonuçlarını BSE SEM görüntüleri ile birlikte göstermektedir. Anot kalınlığının artırılması ve elektrolit kalınlığının azaltılmasının pildeki eğrilik oluşumunu önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Ortalama eğrilik yüksekliği 3,87 mm'den 1,42 mm'ye düşmüştür (Sayan vd., 2018). Kalınlığı çok fazla artırmanın pil performansı üzerine negatif etkileri olabilmektedir. Bunun sebebi: Yakıtın elektrokimyasal reaksiyon bölgesine gidişinin ve bu bölgede reaksiyon sonucu meydana gelen yan ürün gaz çıkışlarının zorlaşmasıdır (konsantrasyon polarizasyonu). Bu nedenle eğrilik oluşumunu ortadan kaldırmak amacıyla anot kalınlığını sürekli artırmanın dışında başka yöntemlerin araştırılması zorunludur.

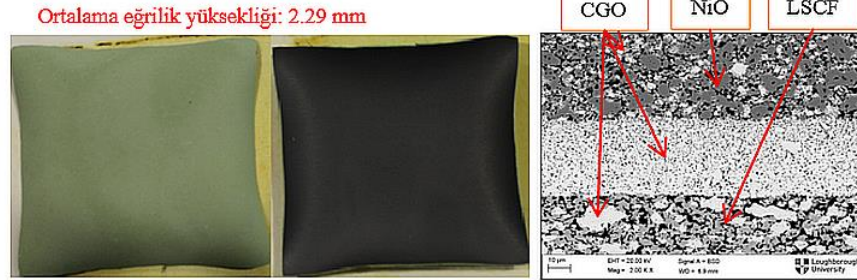
Bu nedenle sinterleme sırasında eğrilik oluşumunu fiziksel olarak sınırlamak için pil 1, pil 2 ve pil 4'ün üzerine 1.28 g kütlede gözeneksiz bir alümina seramik plaka (genişlik \times uzunluk \times kalınlık - 50 mm \times 50 mm \times 0.15 mm) yerleştirilerek pillerin sinterlenmesi yapılmıştır. Burada amaç: Alümina ağırlığından yararlanarak sinterleme işlemi sırasında eğrilik oluşumunu bastırmaktır. Bu sinterleme sonuçları Şekil 3'te görülmektedir. Şekilden görüleceği gibi anot destekli ince pilde (pil 1) önemli çatlaklar meydana gelmiştir. Aynı sinterleme koşulları altında pil 2, pil 1'e göre daha az çatlığa sahiptir. Bunun nedeni artan anot kalınlığının bir sonucu olarak çatlama karşı artan direnç olarak düşünülmektedir. Anot kalınlığı 800 μm 'ye (pil 4) artırıldığında ve pil gözeneksiz alümina ile sinterlendiğinde (bkz. Şekil 3), çatlak oluşumunun önlenmesi ve ortalama eğrilik yüksekliğinin alümina plakası yerleştirilmeden sinterlenmiş pil 4'e kıyasla (bkz. Şekil 2) 1.42 mm'den 0.88 mm'ye düştüğü gözlemlenmiştir. Ancak önceki çalışmalarda belirtildiği ve tartışıldığı gibi, katkı maddelerinin buharlaşması kolay ve homojen değilse sinterleme sırasındaki ayrıştırma işleminin stres oluşumuna bazı etkileri olmaktadır (Sayan vd., 2018). Bu nedenle pil sinterlenirken üstünde gözeneksiz bir alümina tabakası bulundurmamak, buharlaşan gazın salınımını engelleyebilmekte ve tek aşamalı ortak sinterleme işlemi sırasında ekstra stres oluşumuna sebep olabilmektedir. Bu nedenle sinterleme sırasında homojenliği iyileştirmek ve oluşabilecek eğrilik oluşumunu bastırmak için pil 4'ün üstüne bu defa 7.31 g ağırlığında ve %40 gözenekliliğe sahip bir alümina plakası yerleştirilip öyle sinterlenmiştir. Bu sinterleme sonucu Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3'e bakıldığında pil 4'teki ortalama eğrilik yüksekliğinin 0.26 mm'ye kadar düştüğü görülmektedir. Bu deneysel sonuçları göz önüne alındığında daha ağır gözenekli bir alümina plakanın kullanılması durumunda ortalama eğrilik yüksekliğinin daha da düşeceği ve hatta sıfırlanabileceği öngörülmektedir. Özetlemek gerekirse iyi tanımlanmış optimum kalınlık, kalınlık oranı, sıcak presleme koşulu ve sinterleme profili ile birlikte pilin üstüne gözenekli bir alümina plakası yerleştirildiğinde neredeyse eğrilik içermeyen anot destekli düzlemsel bir pil (pil 4) tek aşamalı sinterleme yöntemi kullanılarak başarıyla üretilebilmektedir.

Tek aşamada sinterlenmiş TO-KOYP'lerinin mikro yapısı hakkında bilgi sahibi olmak ilgi çekicidir. Şekil 2 ve Şekil 3'teki SEM görüntüleri incelendiğinde tüm pillerin anot katmanlarının benzer parçacık boyutu ve dağılımına sahip olduğu görülmektedir. Benzer şekilde bu pillerin elektrolitlerinin parçacık boyutu ve dağılımları da birbirine benzemektedir. Bu benzer ilişki, pillerin katot katmanları içinde geçerlidir (Sayan vd., 2018). Tüm pillerde, anot-elektrolit ve katot-elektrolit katmanları arasında sürekli olarak iyi bir adezyon vardır. Fakat hepsinin elektrolitleri gözenekli bir yapıya sahiptir. Bu gözenekli yapı TO-KOYP'lerde kabul edilebilir bir durumdur. Dahası tüm pillerdeki katotların anotlardan daha iri tanelere sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun katot tabakasının aşırı sinterlenmiş olmasından kaynaklandığına düşünülmektedir (LSCF katot sinterleme sıcaklığı yaklaşık 1000 °C). Tanecik boyutu arttıkça katotun gözenekliliği düşmekte, bu da elektrokimyasal reaksiyonların meydana geldiği aktif yüzey alanın azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum, genel olarak pil performansı için faydalı olabilir. Çünkü katodun yakıtı karşı reaktivitesi aktif yüzey alanı azaldıkça düşürülebilir (Kuhn & Napporn, 2010). Ayrıca bu pillerin SEM sonuçları, anot tarafında NiO fazının ve katot tarafında LSCF fazının iyi bir bağlantı/ağ oluşturduğunu göstermektedir. Ancak hem anot hem de katot tarafında CGO'nun devamlılığı tüm pillerde gerektiği kadar iyi değildir. Ek olarak üzerine gözenekli bir alümina plakası yerleştirilerek sinterlenmiş pil 4'ün anot, elektrolit ve katotunun tahmini gözenekliliği sırasıyla %29.98, %15.67 ve %26.92 olarak hesaplanmıştır (Sayan vd., 2018).

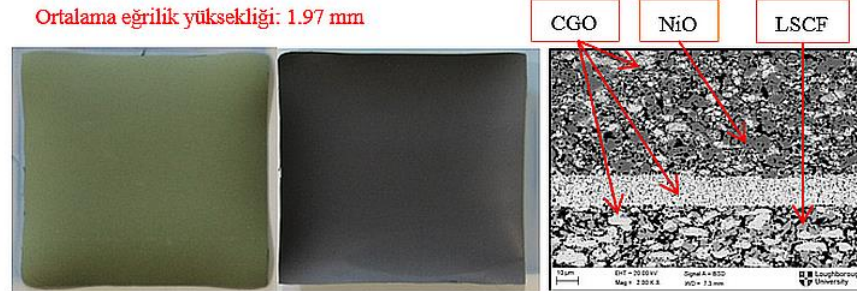
Pil 1 40 mm x 40 mm GxU;10:2:2 kalınlık oranı; 200:40:40 µm kalınlık; kısıtlama olmadan sinterleme



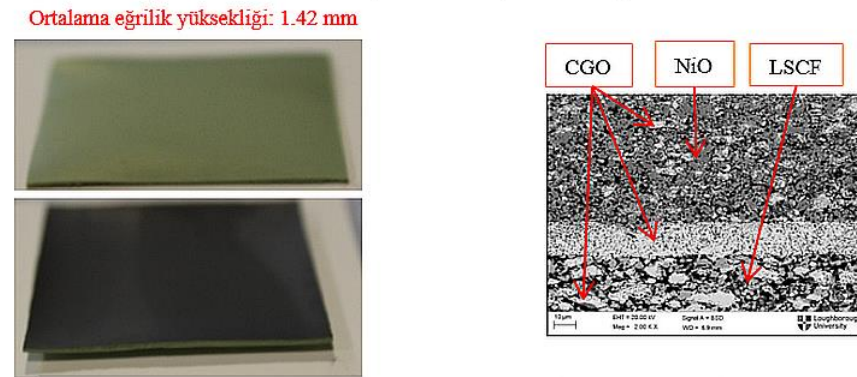
Pil 2 40 mm x 40 mm GxU;20:2:2 kalınlık oranı, 400:40:40 µm kalınlık; kısıtlama olmadan sinterleme



Pil 3 40 mm x 40 mm GxU;20:1:2 kalınlık oranı; 400:20:40 µm kalınlık; kısıtlama olmadan sinterleme



Pil 4 40 mm x 40 mm GxU;40:1:2 kalınlık oranı, 800:20:40 µm kalınlık; kısıtlama olmadan sinterleme

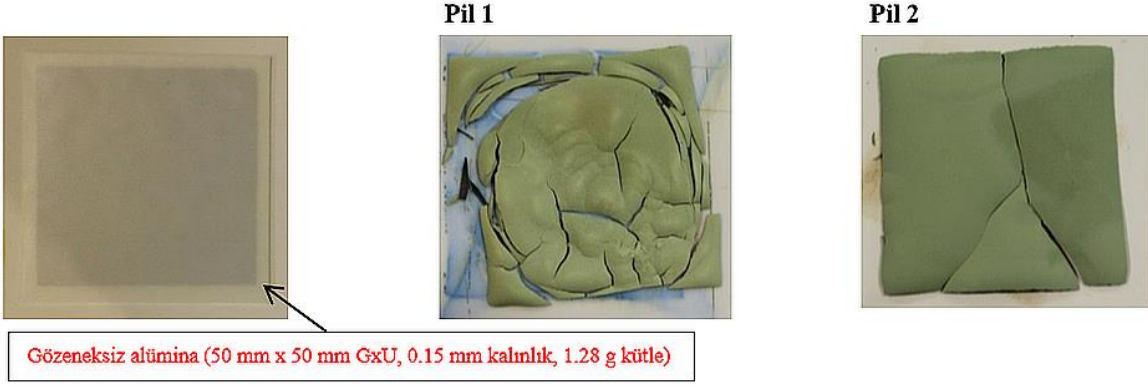


A) Sinterleme sonuçları

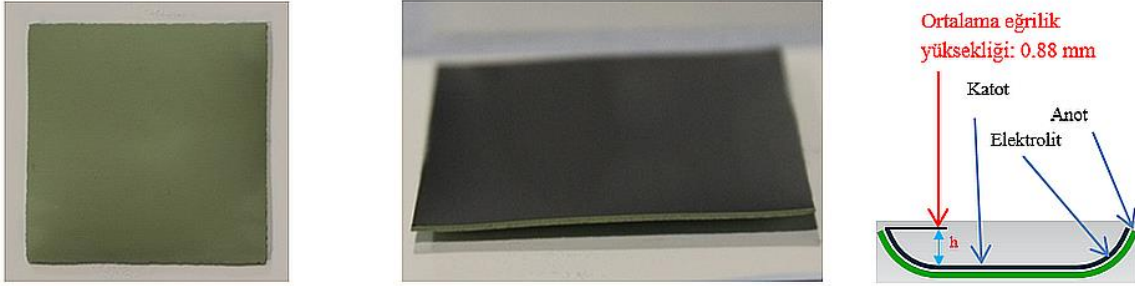
B) BSE SEM sonuçları

Şekil 2. (A) Sinterlenmiş pillerin fotoğrafları (Yeşil, anot; siyah, katot yüzeyini göstermektedir) (B) Enine kesit alınmış pillerin geri saçılmış elektron (BSE) SEM görüntüleri (Sayan vd., 2018)

Pil 1, Pil 2 ve Pil 4 üzerine yerleştirilen gözeneksiz alümina kaplama plakasıyla sinterlenmiştir (50 mm x 50 mm GxU, 0.15 mm kalınlık, 1.28 g kütle)

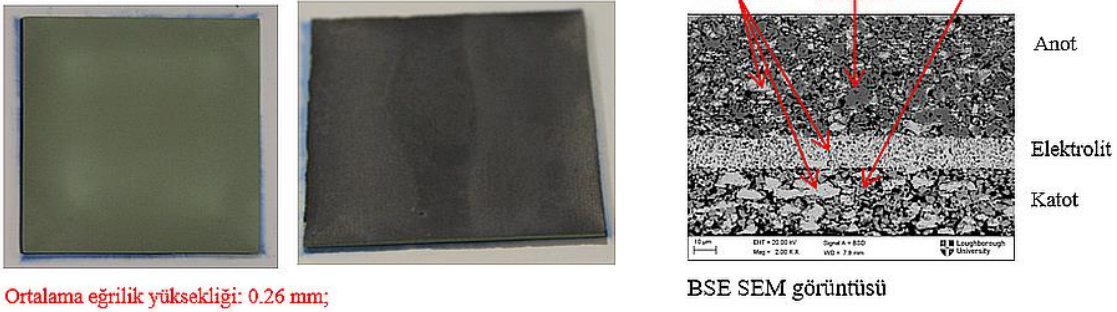


Pil 4

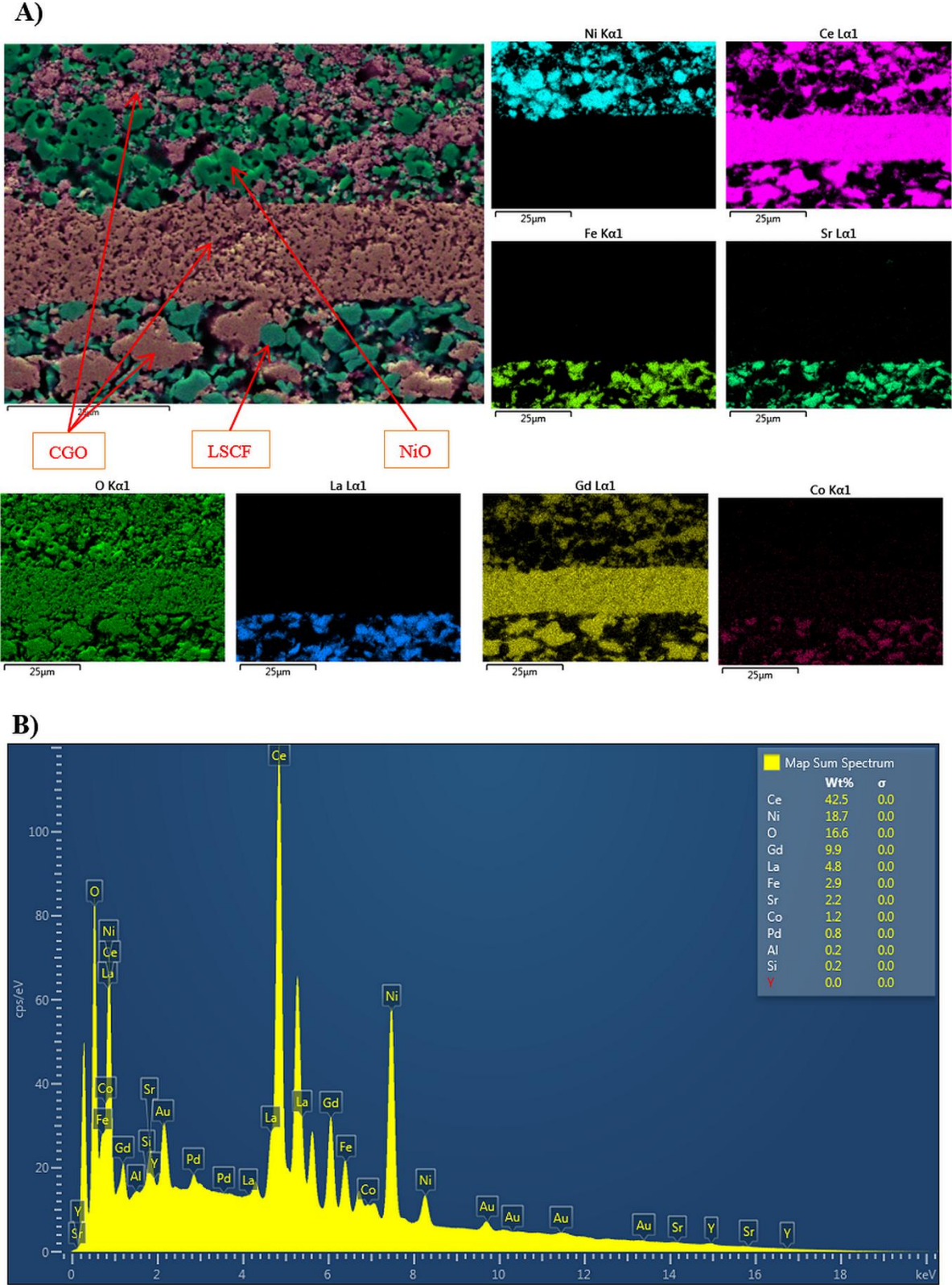


Pil 4 üzerine yerleştirilen 40% gözenekli bir alümina kaplama plakasıyla sinterlenmiştir. (50 mm x 50 mm GxU, 1 mm kalınlık, 7.31 g kütle)

Tahmini gözeneklilik: Anot: %29.98 Elektrolit: %15.67 Katot: %26.32



Şekil 3. Pil 1, Pil 2 ve Pil 4 üzerine yerleştirilen gözeneksiz bir alümina kaplama plakasıyla sinterlenmiştir. Pil 4 üzerine yerleştirilen 40% gözenekli bir alümina kaplama plakasıyla sinterlenmiştir. Yeşil, anot; siyah, katot yüzeyini göstermektedir



Şekil 4. (A) Gözenekli bir alümina ile sinterlenmiş pil 4'ün EDS haritası **(B)** Pilin EDS haritalama spektrum sonuçları

Şekil 4, üzerine gözenekli bir alümina plakası yerleştirilerek sinterlenmiş pil 4'ün EDS haritalamasını ve spektrumunu göstermektedir. Şekil 4A'ya bakıldığı zaman bu pilin anot, katot ve elektrolitinde bulunması gereken nikel (Ni), seryum (Ce), demir (Fe), stronsiyum (Sr), oksijen (O), lantan (La), gadolinyum (Gd) ve kobalt (Co) elementlerinin dağılımları beklenen bölgelerdedir. EDS haritasına göre bu bölgelerde bu elementler dışında başka hiçbir yabancı madde görülmemektedir. Ancak bu sonuç tek başına pillerde istenmeyen elementlerin olmadığını gösteremez. Bunun nedeni: İstenmeyen yabancı element miktarının bir EDS haritalamasının yapabileceği hassasiyetin altında olabilmesidir. Ancak bunlar EDS spektrumunda görülebilmektedirler. Şekil 4B'ye bakıldığında pilin içerisinde

istenmeyen altın (Au), paladyum (Pd), silikon (Si) ve alüminyum (Al) gibi bazı yabancı maddelerin olduğu görülmektedir. Au ve Pd'nin bulunmasının sebebi: Bu elementlerin SEM analizinden önce (pili SEM analizi için iletken hale getirmek) pilin yüzeylerine püskürtülmesidir. Al, büyük olasılıkla sinterleme sırasında pil üzerine yerleştirilmiş gözenekli alümina plakasından gelmektedir. Si ise pilin hazırlanması, sinterlenmesi, parlatılması ve hatta karakterizasyonu sırasında pile geçmiş olabileceği düşünülmektedir. Çünkü Si her yerdedir ve bu aşamaların herhangi birinde Si elementi bulunabilir. Bu istenmeyen unsurlar pillerin performansını ciddi şekilde etkileyebilmektedir. Bu nedenle pil içinde bulunmaları engellenmeli veya bunların miktarı kabul edilebilir bir düzeye indirilmelidir. Şekil 4B'den görülebileceği gibi bu istenmeyen elementlerin miktarları oldukça küçüktür.

3.2. Pil performansı

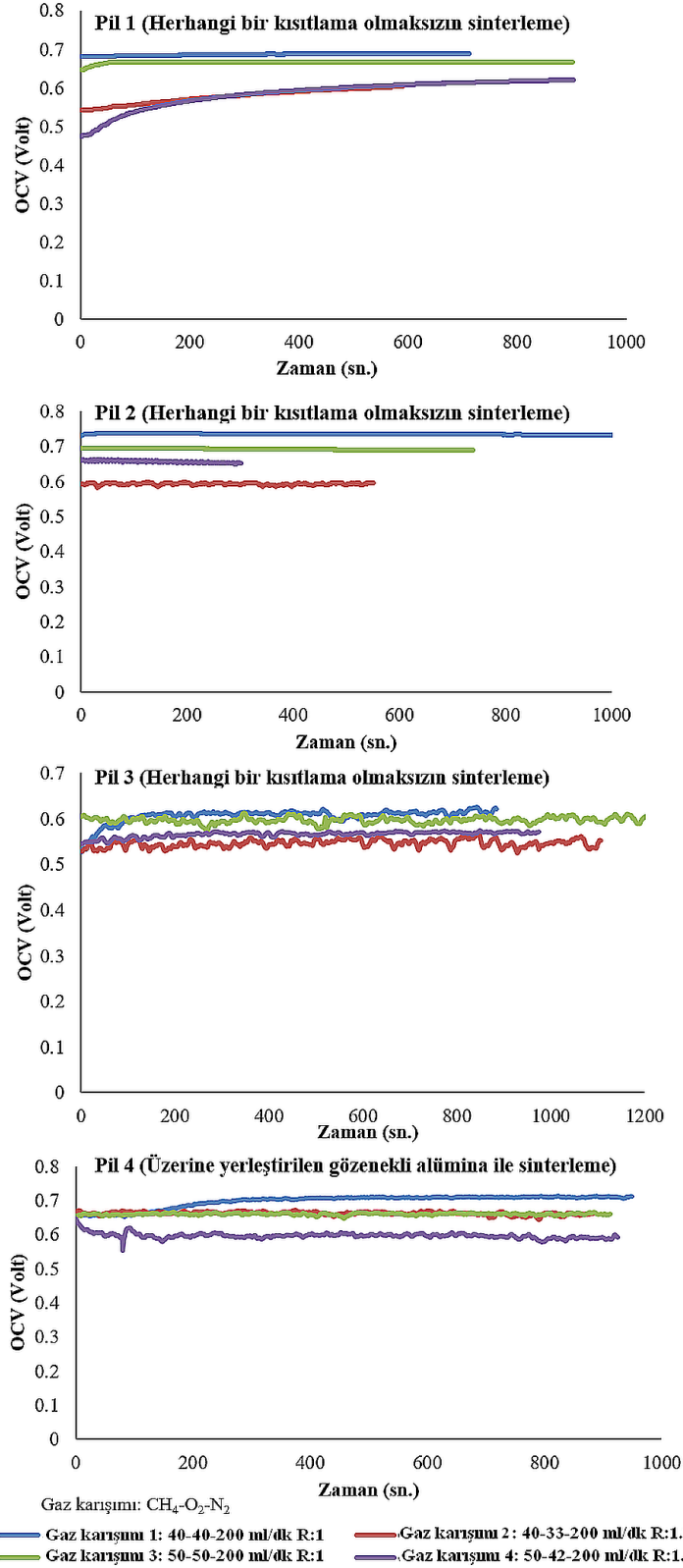
Pillerin performans testi iki amaçla gerçekleştirilmiştir: (a) sinterlenmiş numunelerin çalışan elektrokimyasal piller olarak işlevselliğini belirlemek (b) sinterleme sırasında pil kenarlarında meydana gelen eğriliğin azalmasında faydalı olan artan anot kalınlığının ve azaltılmış elektrolit kalınlığının pillerin performansı üzerine etkilerini incelemektir. Şekil 5 herhangi bir kısıtlama olmaksızın (serbest sinterleme) sinterlenmiş pil 1, pil 2 ve pil 3'ün OCV ölçümlerini ve üzerinde gözenekli bir alümina plakası yerleştirilerek sinterlenmiş pil 4'ün OCV ölçümlerini farklı akış hızlarında ve farklı gaz karışım oranlarında göstermektedir. Ek olarak Tablo 2, bu pillerin maksimum OCV ve güç yoğunluğu sonuçlarını özetlemektedir. Pil 1 ve pil 2 birbiriyle karşılaştırıldığında, hemen hemen tüm gaz karışımlarında (gaz karışımı 2 hariç) pil 2'nin OCV ölçümünün pil 1'den daha yüksek olduğu görülmektedir (bkz. Tablo 2). Bunun nedeni olarak artan anot kalınlığı sebebiyle anot tarafında metan reformunun iyileştirilmesinin bir sonucu olabileceği düşünülmektedir. Bu durum lokal olarak (anotta) oksijen kısmi basıncının düşmesine yol açmaktadır. Dolayısıyla elektrotlar boyunca (katot ve anot boyunca) oksijenin kısmi basınç farkı artmış olur. Bu da OCV'nin artmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte elektrolit kalınlığı azaldığında (pil 2 ve pil 3 karşılaştırıldığında) pil 3'ün tüm gaz karışımlarındaki OCV değerleri pil 2'nin ve hatta pil 1'in bu gaz karışımlarındaki OCV değerlerinin altında ölçülmüştür. Bu durum aşağıdakilerin bir sonucu olabileceği düşünülmektedir: (1) Elektrolit kalınlığının azalması elektrolitin daha iyi bir iyonik iletkenliğe sahip olmasına yol açar. Böylece oksijen iyonlarının (O^{2-}) daha hızlı bir şekilde katottan anot tarafına geçişine izin verilmiş olur. Bu durum aynı zamanda oksijen indirgeme reaksiyonunun mevcut durum için hızlı bir oranda ilerlemesine olanak sağlar ve/veya (2) anot tarafındaki reaksiyon ürünleri (H_2 ve CO) katot tarafına gözenekli elektrolitten dolayı kolayca geçebilir ve oksijen ile reaksiyona girebilir. Her iki durumda da anot ve katot tarafları arasındaki oksijen kısmi basınç farkları azalır ve dolayısıyla OCV azalır. İkinci durum aynı zamanda yakıt kullanımını azaltır. Bunun nedeni: H_2 ve CO gazlarının anotta elektrokimyasal reaksiyona girmek yerine katotta kimyasal reaksiyona girerek sadece ısı üretmesidir. Anot kalınlığı tekrar artırıldığında (pil 4) tüm farklı gaz karışımlarında OCV değerlerinde pil 3'e kıyasla iyileşmeler olduğu Tablo 2'den görülebilmektedir. Hatta bu değerler pil 2'nin OCV değerlerine yaklaşmıştır. Sonuç olarak elektrolit kalınlığındaki azalmaya bağlı OCV düşüşü anot kalınlığının artırılmasıyla belirli bir dereceye kadar telafi edilmiştir. Ayrıca bazı pillerin (pil 3, pil 4 ve hatta pil 2) OCV'lerinin salınımı (bkz. Şekil 5), anot yükseltgenme (oksidasyon) ve indirgenme döngüsüne ve ilgili sıcaklık dalgalanmasına bağlanabilir.

Tablo 2. Farklı gaz karışımlarında 600 °C'de test edilen pil 1, pil 2, pil 3 ve pil 4'ün OCV ölçümleri ve maksimum güç yoğunlukları

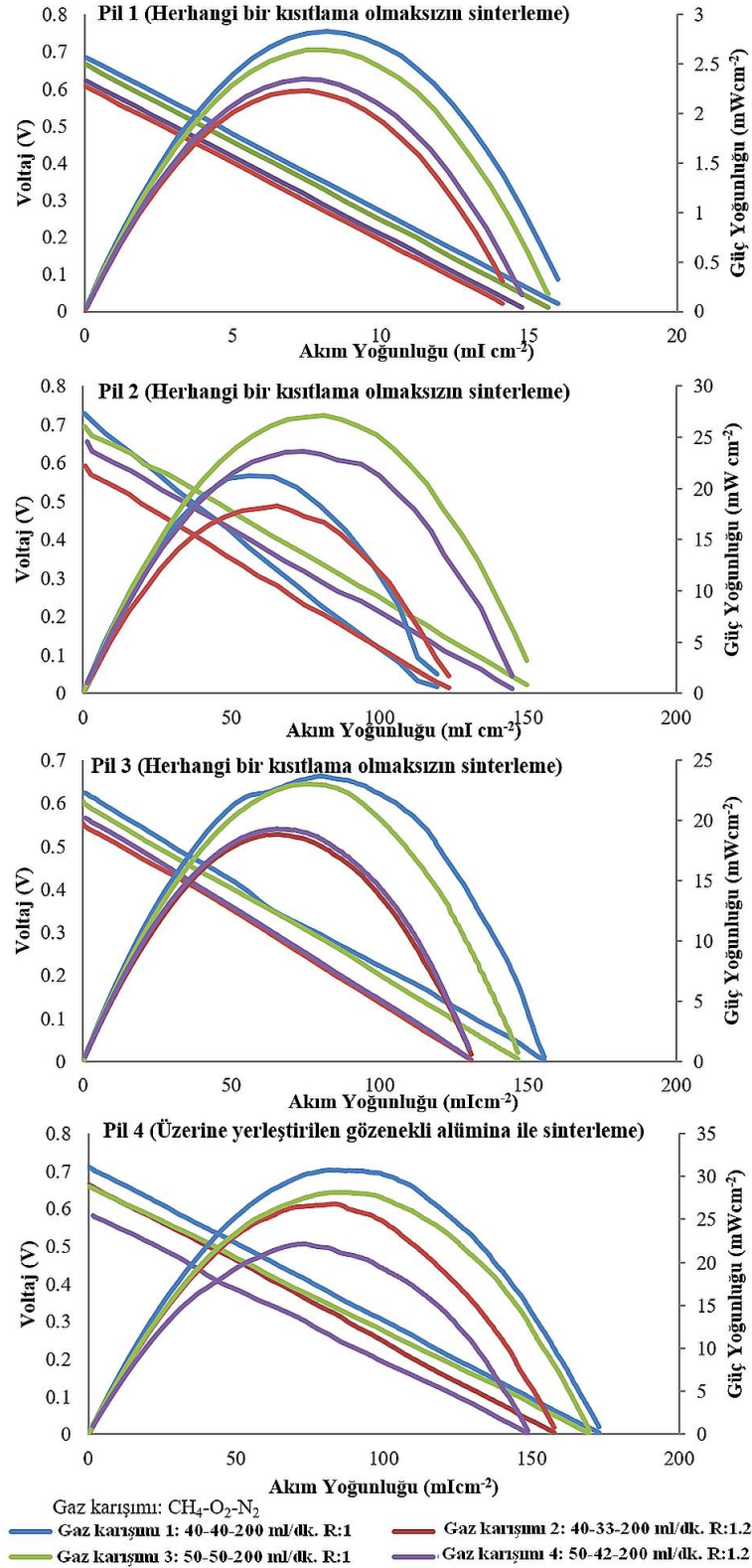
	Pil 1		Pil 2		Pil 3		Pil 4	
	Kalınlık 200:40:40µm A:E:K		Kalınlık 400:40:40 µm A:E:K		Kalınlık 400:20:40 µm A:E:K		Kalınlık 800:20:40 µm A:E:K	
	OCV (V)	Güç yoğunluğu (mW cm ⁻²)	OCV (V)	Güç yoğunluğu (mW cm ⁻²)	OCV (V)	Güç yoğunluğu (mW cm ⁻²)	OCV (V)	Güç yoğunluğu (mW cm ⁻²)
Gaz karışımı: CH₄-O₂-N₂								
Gaz karışımı 1:40-40-200 ml dk ⁻¹ R:1	0.69	2.82	0.73	21.15	0.62	23.64	0.71	30.69
Gaz karışımı 2:40-33-200 ml dk ⁻¹ R:1.2	0.6	2.23	0.6	18.30	0.55	18.80	0.66	23.19
Gaz karışımı 3:50-50-200 ml dk ⁻¹ R:1	0.67	2.65	0.69	27.12	0.6	23.01	0.66	28.19
Gaz karışımı 4:50-42-200 ml dk ⁻¹ R:1.2	0.62	2.35	0.65	23.67	0.57	19.30	0.59	22.11

Şekil 6'da bu pillerin farklı gaz karışımlarında test edilmiş akım ve güç yoğunlukları gösterilmektedir. En yüksek güç yoğunluğu pil 1, pil 3 ve pil 4 için tüm gaz karışımları içerisinde gaz karışımı 1 iken elde edilmiştir. Bu sonuçlar pil 1, pil 3 ve pil 4 için sırası ile 2,82 mW cm⁻², 23,64 mW cm⁻² ve 30,69 mW cm⁻²'dir. Fakat en yüksek güç yoğunluğu pil 2 için 27.12 mW cm⁻² olarak gaz karışımı 3 iken elde edilmiştir. Pil 1 ve pil 2 birbiriyle karşılaştırıldığında anot kalınlığının artırılması tüm gaz karışımlarında mevcut pil performansını önemli ölçüde artırmıştır. Bunun önemli sebeplerinden bir tanesi, artan anot kalınlığı ile birlikte metan reformunun daha iyi hale gelmesidir. Anot, katalizör ve iletken olan NiO malzemesinin yanı sıra, içerisinde iyonik iletken olan elektrolit malzemesini (CGO) içermektedir. Ayrıca anot gözenekli (gaz fazı olan) bir yapıya sahiptir. Elektronik iletken fazı, gaz fazı ve iyonik iletken fazının bir

arada bulunduğu bölgeye üçlü faz bölgesi (ÜFB) denir ve bu bölgeler anotun içlerine kadar yayılmıştır. Elektrokimyasal reaksiyonlar (anot için oksidasyon) bu ÜFB'lerde meydana gelmektedir. Bu nedenle kalınlıkla performansın artmasının diğer bir önemli sebebi ise bu ÜFB'lerin sayısının kalınlıkla artmasıdır. Sonuç olarak: Pilin anot kalınlığının artırılması sadece genel olarak pil OCV'sini iyileştirmek ve sinterleme sırasında eğrilik oluşumunu azaltmakla kalmaz, aynı zamanda pil güç yoğunluğunu da önemli ölçüde iyileştirir. Ayrıca elektrolit kalınlığı azaltıldığında ohmik kayıplardaki azalma nedeniyle pilden yüksek güç yoğunluğu elde edilmesi beklenir. Aynı anot kalınlığı için (pil 2 ve pil 3) elektrolit kalınlığının azalması, gaz karışımı 1 ve 2'de pil performansının artmasıyla sonuçlanmıştır. Pil 2'in güç yoğunluğu gaz karışımı 1 ve 2 için sırasıyla 21.15 mW cm^{-2} ve 18.3 mW cm^{-2} olarak elde edilirken bu değerler pil 3 için 23.64 mW cm^{-2} ve 18.8 mW cm^{-2} olarak elde edilmiştir. Ancak gaz karışımı 3 ve 4 için, pil 3'ün güç yoğunluğu pil 2'ye kıyasla azalmaktadır (sırayla 27.12 mW cm^{-2} 'den 23.01 mW cm^{-2} 'ye ve 23.67 mW cm^{-2} 'den 19.3 mW cm^{-2} 'ye) (bkz. Tablo 2). Bu durum reaksiyon sonucu oluşan yan gazların (CO ve H_2) anottan katot tarafına geçişinin pil performansı üzerine olumsuz etkisinin, ohmik kayıp azalmasının pil performansı üzerine pozitif etkisinden daha yüksek olmasıyla açıklanabilir. Bunlara ek olarak anot kalınlığının daha da artırılması (Şekil 6 veya Tablo 2, pil 4) pil performansını pil 3'e kıyasla daha da artırır. Pil 4'ün pil 3'e göre güç yoğunluğundaki artış gaz karışımı 1, 2, 3 ve 4'te sırayla %29,82, %42,5, %22,46 ve %14,55 olarak ölçülmüştür. Pil 2'ye kıyasla pil 4'ten daha fazla güç yoğunluğu, gaz karışımları 1,2 ve 3 ile test edildiğinde elde edilmiştir. Fakat bu durum gaz karışımı 4 için tam tersidir. Sonuç olarak: Artan anot ve azalan elektrolit kalınlığı yalnızca daha iyi sinterleme sonucu değil, aynı zamanda pillerin performansının genel olarak artmasını sağlamıştır.



Şekil 5. Farklı gaz karışımları ve akış hızı oranında pil 1, pil 2, pil 3 ve pil 4'ün OCV ölçümleri. (R, yakıt-oksijen oranı)



Şekil 6. Farklı gaz karışımları ve akış hızı oranında pil1, pil 2, pil 3 ve pil 4'ün polarizasyon eğrileri (R, yakıt-oksijen oranı).

Genel olarak pillerdeki hem toplam akım çekişi hem de güç yoğunluğu nispeten düşüktür. Pillerin performansı, yaygın olarak tüm pilleri etkileyen çeşitli nedenlerden olumsuz etkilenebilmektedir. Anot ve katotun katalizör olarak sırasıyla yakıt ve O_2 gazlarına karşı düşük seçiciliği tüm TO-KOYP'ler için genel bir sorundur (Kuhn & Napporn, 2010; Riess, 2008) ve bu oldukça düşük pil performansı ve yakıt kullanımı ile sonuçlanmaktadır. Kalın ve gözenekli elektrolit daha fazla iyonik taşıma kayıplarına (ohmik kayıplar) sebep olur. Ayrıca elektrolitin gözenekli olması O_2 gazının katottan anota, CO ve H_2 gazlarının ise anottan katota geçmesine olanak sağlar. Bu durum gazların birbirleri ile kimyasal reaksiyona girmesine sebep olur. Bu da yakıtın boşa kullanılmasına sebep olurken aynı zamanda

OCV belirleyen elektrotlar arasındaki oksijen kısmi basınç farkının azalmasına sebep olmaktadır. Dahası CGO elektrolitinin indirgeyici koşullarda kullanılması (katot), bu elektroliti elektriksel olarak iletken hale getirir ve bu da pil içinde kısa devre akımı sağlar (Wang, Kobayashi, Dokiya, & Hashimoto, 2000). Ayrıca düşük çalışma sıcaklığı (600 °C) nedeniyle metan gazının kısmi oksidasyonu yeterli olmayabilir. Metanın uygun bir şekilde reform edilebilmesi için sıcaklığın 700 °C'nin üzerinde olması gerekmektedir. Bu durum düşük sıcaklık TO-KOYP'ler için kabul edilemez (Kuhn & Napporn, 2010; Zhang, Lin, Ran, & Shao, 2010). Ek olarak: Gaz fazındaki oksijen (O₂) elektrolitten gelen oksijen iyonlarına kıyasla sentez gazlarıyla (H₂ ve CO) daha aktif bir şekilde reaksiyona girerek pil performansında düşüşe neden olur (Riess, 2008). Diğer bir husus LSCF perovskite katodunun HC/metan oksidasyonuna karşı katalitik olarak aktif olduğunun bilinmesidir (Li & Chuang, 2009; Kuhn & Napporn, 2010). Dolayısıyla bu durum katotta istenmeyen metan reformunun oluşmasına ve istenilen oksijen indirgememesinin azalmasına sebep olur. Oksijen indirgememesinin TO-KOYP'lerde OCV'yi oluşturmak için ilk adım olduğu düşünüldüğünde, katodun oksijen indirgememesine karşı daha seçici kalması önemlidir. Tüm pillerde 0.7 V seviyelerinde OCV elde edilmesi, H₂ ve CO gazlarının anotta elektrokimyasal oksidasyonunun hala gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca tüm pillerdeki katot mikro yapısının iri olması performansı olumsuz etkileyebilmektedir. Daha iri yapı aynı malzeme hacmi boyunca olası üçlü faz bölge sayısını azaltacaktır. Daha iyi elektriksel ve iyonik iletkenliği için tanecikler arasında iyi bir bağlantı olması da gerekmektedir (Leng, Chan, & Liu, 2008). Ancak CGO iletken yolları tüm elektrotlarda olması gerektiği kadar iyi değildir (bkz. pil 1, pil 2, pil 3 ve pil 4'ün SEM görüntülerine). Bu durum oksijen iyonlarının hareketlerinin kesintiye uğramasına sebep olabilmektedir. Yığılmış tanecikler arasındaki zayıf bağlantılar, elektron transferini zorlaştırdığı gibi oksijen iyonlarının taşınım direncini de gözenekli elektrotlar boyunca artırmaktadır (Ding vd., 2010).

Ayrıca metan gazının parçalanması (CH₄'ün C+2H₂'ye) nedeniyle katalizör yüzeylerinde karbon birikmesi, zamanla pil performansını bozabilmektedir (Hibino, Tsunekawa, Tanimoto, & Sano, 2000; Kuhn & Napporn, 2010). Bu karbon tabakası daha sonra şunlara neden olur: (1) Ni parçacıklarını birbirinden ayırarak anotta sürekli olmayan bir katalizör dağılımına sebep olmak ve (2) nikel yüzeyinde bir bariyer oluşturarak gazların reaksiyonlarını (özellikle arzu edilen heterojen elektrokimyasal reaksiyonlarını) engellemek (Singhal & Kendall, 2003). Ayrıca elektrolit ve elektrotlardaki yabancı maddeler de pil performansı üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Si elektrolit malzemesini zehirleyebilmekte ve dolayısıyla performansı düşürebilmektedir. Örneğin: Silikon elektrolit malzemesinin tane sınırlarından ayrılarak yalıtkan silisyum dioksit (SiO₂) oluşturup iletkenliği azaltabilmektedir. Si'nin katot elektrotu üzerinde de zararlı etkisi bulunmaktadır. Özellikle nemli atmosferde önemli yüzey değişim katsayısı bozulmasına neden olabilmektedir (Bucher & Sitte, 2004, 2011; Bucher, Sitte, Klauser, & Bertel, 2012). Örneğin: Si, LSCF katotta Sr ile reaksiyona girerek katot bozulmasına neden olabilmektedir (Yang vd., 2017). Pil 4'ün EDS analizi, pilde az miktarda Si olduğunu göstermektedir (bkz. Şekil 4). Stronsiyum karbonat (SrCO₃), O₂-CO₂ bulunduğu ortamda LSCF katodu üzerinde meydana gelebilmektedir (Hayd, Dieterle, Guntow, Gerthsen, & Ivers-Tiffée, 2011; Z. Zhao vd., 2013). Böylece LSCF üzerindeki oksijen aktivitesi ve yüzey adsorpsiyonu azalmakta ve bu durum H₂O'nun varlığı ile daha da kötüleşmektedir. CO₂ ile H₂O'nun varlığı ayrıca LSCF katot üzerinde stronsiyum oksit (SrO) oluşmasına neden olmaktadır (R. R. Liu vd., 2011). Zhao vd. (Z. Zhao vd., 2013), H₂O'nun varlığının karbon dioksitin perovskit oksit ile etkileşimini artırdığını göstermiştir. LSCF katot malzemesi üzerinde meydana gelebilecek bu reaksiyonlar katotun oksijen indirgeme reaksiyonunu azaltmaktadır. Bu çalışmada pillerin test edilmesinde yakıt olarak CH₄ kullanılmasından dolayı elektrokimyasal veya kimyasal reaksiyonlar sonucu CO₂ ve H₂O oluşumu yüksek bir olasılıktır. Sonuç olarak: SrCO₃ veya sülfür oksit (SO) yalıtım katmanlarının oluşumu daha düşük güç yoğunluğunun nedenleri olabilmektedir. Bunlara ek olarak pillerde az miktarda Al da tespit edilmiştir. Bu yabancı madde anot ve katotta reaksiyonların meydana geldiği aktif yüzey alanlarını bloke ederek performansı etkileyebilmektedir. Ni ayrıca çok az miktarda kükürt (S) içeren gaz karışımlarında kükürt bileşikleri tarafından zehirlenebilir (Singhal & Kendall, 2003). Bu çalışmada yakıt olarak %96 saflığa sahip metan kullanıldığından dolayı Ni anotunun zehirlenme olasılığı muhtemeldir. Bu durum da pil performansını negatif yönde etkileyen sebeplerden biri olarak düşünülmektedir.

Dahası pillerin alt ve üst yüzeylerinde bulunan altın ızgaralarla kromel telin bağlantısının gümüş macunla yapıldığı önceki bölümlerde bahsedilmişti. Burada dikkat çekilmesi gereken nokta gümüşün bir elektrottan diğerine elektrolitin gözenekliliğinden dolayı difüzyonla geçebileceğidir. Bu durum pil üzerinde kısa devre oluşması ile sonuçlanmaktadır. Gümüş difüzyonunun yanı sıra akım toplayıcı olarak her iki elektrot tarafına püskürtülen altın, nano boyutundan dolayı (250 nm) bir elektrottan diğerine difüze olmakta ve aynı şekilde kısa devreye neden olmaktadır. Pillerin test edilmesi aşamasında bu problemler gözlemlenmiştir. Deney sırasında gözlemlenen bir diğer problem ise akım toplayıcı olarak elektrot yüzeylerinde oluşturulan altın ızgaraların 600 °C buharlaşarak özelliğini yitirmesidir. Dolayısıyla zayıf akım toplama ve kısa devre sonucu pillerin performansı oldukça düşük ölçülmüş olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca test odası pillerin performansını etkileyebilmektedir. Çünkü dar gaz çıkış kesiti pil performansını negatif olarak etkileyen gaz durgunluğuna ve gazların birbirine karışmasına neden olmuş olabileceği düşünülmektedir. Piller test edilirken ideal çalışma parametreleri (gaz karışımı, sıcaklık, gaz akış hızı vb.) tam olarak belirlenmemiştir. Bu parametrelerin tam olarak belirlenmesi durumunda daha yüksek pil performansları elde edilebileceği ön görülmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, tek aşamada ortak sinterleme yöntemi ile elde edilen anot destekli düzlemsel TO-KOYP'nin performansı test edilmiştir. Ayrıca anot, katot ve elektrolitin birlikte sinterlenmesinden dolayı pilde oluşan eğriliğin azaltılmasında faydalı olan anot kalınlığının artırılması ve elektrolit kalınlığının azaltılmasının pil performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Üretilen pillerin performansları farklı gaz karışımlarında 600 °C sıcaklıkta test edilmiştir. Maksimum OCV, pil 2'den 0.73 V olarak 40 ml dk⁻¹ CH₄, 40 ml dk⁻¹ O₂ ve 200 ml dk⁻¹ N₂ gaz karışımında ölçülmüştür. Üzerine gözenekli alümina yerleştirilerek sinterlenen pil 4'ün maksimum voltaj ve güç yoğunluğu sırasıyla 0.71 V ve 30.69 mW cm⁻² olarak 40 ml dk⁻¹ CH₄, 40 ml dk⁻¹ O₂ ve 200 ml dk⁻¹ N₂ gaz karışımında elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar ışığında: artan anot kalınlığının (200 μm 'den 400 μm 'ye ve 800 μm 'ye) ve azaltılan elektrolit kalınlığının (40 μm 'den 20 μm 'ye) pilin tek aşamada sinterlenmesini kolaylaştırmakla birlikte, pil performansını da arttırdığı görülmüştür. Bununla birlikte elde edilen güç yoğunlukları nispeten düşüktür. Bu da elektrolit stabilitesi, elektrolit gözenekliliği, akım toplama ve optimize edilmiş akış koşulları ile ilgili sorunlara çözüm bulmak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

Referanslar

- Briault, P., Rieu, M., Laucournet, R., Morel, B., & Viricelle, J.-P. (2014). Anode supported single chamber solid oxide fuel cells operating in exhaust gases of thermal engine. *Journal of Power Sources*, 268, 356–364. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.06.061>
- Bucher, E., & Sitte, W. (2004). Defect chemical modeling of (La, Sr)(Co, Fe)O_{3- δ} . *Journal of Electroceramics*, 13(1–3), 779–784. <https://doi.org/10.1007/s10832-004-5192-x>
- Bucher, E., & Sitte, W. (2011). Long-term stability of the oxygen exchange properties of (La,Sr)_{1-z}(Co,Fe)O_{3- δ} in dry and wet atmospheres. *Solid State Ionics*, 192(1), 480–482. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2010.01.006>
- Bucher, E., Sitte, W., Klauser, F., & Bertel, E. (2012). Impact of humid atmospheres on oxygen exchange properties, surface-near elemental composition, and surface morphology of La_{0.6}Sr_{0.4}CoO_{3- δ} . *Solid State Ionics*, 208, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2011.12.005>
- Ding, C., Lin, H., Sato, K., Amezawa, K., Kawada, T., Mizusaki, J., & Hashida, T. (2010). Effect of thickness of Gd_{0.1}Ce_{0.9}O_{1.95} electrolyte films on electrical performance of anode-supported solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 195(17), 5487–5492. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.03.075>
- Guo, Y., Bessaa, M., Aguado, S., Steil, M. C., Rembelski, D., Rieu, M., ... Farrusseng, D. (2013). An all porous solid oxide fuel cell (SOFC): a bridging technology between dual and single chamber SOFCs. *Energy & Environmental Science*, 6(7), 2119. <https://doi.org/10.1039/c3ee40131f>
- Hao, Y., Shao, Z., Mederos, J., Lai, W., Goodwin, D. G., & Haile, S. M. (2006). Recent advances in single-chamber fuel-cells: Experiment and modeling. *Solid State Ionics*, 177(19–25), 2013–2021. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2006.05.008>
- Hayd, J., Dieterle, L., Guntow, U., Gerthsen, D., & Ivers-Tiffée, E. (2011). Nanoscaled La_{0.6}Sr_{0.4}CoO_{3- δ} as intermediate temperature solid oxide fuel cell cathode: Microstructure and electrochemical performance. *Journal of Power Sources*, 196(17), 7263–7270. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.11.147>
- Hibino, T., Hashimoto, A., Inoue, T., Tokuno, J., Yoshida, S., & Sano, M. (2000). Single-chamber solid oxide fuel cells at intermediate temperatures with various hydrocarbon-air mixtures. *Journal of The Electrochemical Society*, 147(8), 2888–2892. <https://doi.org/10.1149/1.1393621>
- Hibino, T., Tsunekawa, H., Tanimoto, S., & Sano, M. (2000). Improvement of a single-chamber solid-oxide fuel cell and evaluation of new cell designs. *Journal of The Electrochemical Society*, 147(4), 1338. <https://doi.org/10.1149/1.1393359>
- Ii, J. C. F., & Chuang, S. S. C. (2009). Investigating the CH₄ reaction pathway on a novel LSCF anode catalyst in the SOFC. *Catalysis Communications*, 10(6), 772–776. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2008.11.035>
- Kuhn, M., & Napporn, T. W. (2010). Single-Chamber Solid Oxide Fuel Cell Technology – From its origins to today's state of the art. *Energies*, 3(1), 57–134. <https://doi.org/10.3390/en30x000x>
- Leng, Y., Chan, S. H., & Liu, Q. (2008). Development of LSCF-GDC composite cathodes for low-temperature solid oxide fuel cells with thin film GDC electrolyte. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(14), 3808–3817. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.04.034>
- Liu, M., & Lü, Z. (2013). Effect of stack configurations on single chamber solid oxide fuel cell, anode-cathode, anode-anode, and cathode-cathode configuration. *Electrochimica Acta*, 104, 64–68. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.04.092>
- Liu, R. R., Kim, S. H., Taniguchi, S., Oshima, T., Shiratori, Y., Ito, K., & Sasaki, K. (2011). Influence of water vapor on long-term performance and accelerated degradation of solid oxide fuel cell cathodes. *Journal of Power Sources*, 196(17), 7090–7096. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.08.014>
- Maryland Tape Casting Ltd, ABD. (2017). <http://www.marylandtapecasting.com/>

- Meunier, M. (2016). Performance and ageing of an anode-supported SOFC operated in single-chamber conditions. *Journal of Power Sources*, 153(1), 108–113. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.03.138>
- Morel, B., Roberge, R., Savoie, S., Napporn, T. W., & Meunier, M. (2007). An experimental evaluation of the temperature gradient in solid oxide fuel cells. *Electrochemical and solid-state letters*, 10(2), 2006–2008. <https://doi.org/10.1149/1.2398729>
- Nagao, M., Yano, M., Okamoto, K., Tomita, A., Uchiyama, Y., Uchiyama, N., & Hibino, T. (2008). A single-chamber SOFC stack: Energy recovery from engine exhaust. *Fuel Cells*, 8(5), 322–329. <https://doi.org/10.1002/fuce.200800017>
- Riess, I. (2008). On the single chamber solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 175(1), 325–337. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.09.041>
- Sayan, Y., Venkatesan, V., Guk, E., Wu, H., & Kim, J. S. (2018). Single-step fabrication of an anode supported planar single-chamber solid oxide fuel cell. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 15(6), 1375–1387. <https://doi.org/10.1111/ijac.13012>
- Shimada, H., Suzuki, T., Yamaguchi, T., Sumi, H., Hamamoto, K., & Fujishiro, Y. (2016). Challenge for lowering concentration polarization in solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 302, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.10.024>
- Shri Prakash, B., Senthil Kumar, S., & Aruna, S. T. (2014). Properties and development of Ni/YSZ as an anode material in solid oxide fuel cell: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 149–179. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.043>
- Singhal, S. C., & Kendall, K. (2003). *High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, design and Applications*. (S. C. Singhal & K. Kendall, Ed.). Oxford: Elsevier Advanced Technology.
- Suzuki, T., Jasinski, P., Petrovsky, V., Anderson, H. U., & Dogan, F. (2004). Anode supported single chamber solid oxide fuel cell in CH₄-air mixture. *Journal of The Electrochemical Society*, 151(9), A1473–A1476. <https://doi.org/10.1149/1.1782141>
- Tian, Y., Lü, Z., Liu, M., Zhu, X., Wei, B., Zhang, Y., ... Su, W. (2013). Effect of gas supply method on the performance of the single-chamber SOFC micro-stack and the single cells. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 17(1), 269–275. <https://doi.org/10.1007/s10008-012-1865-6>
- Tomita, A., Namekata, Y., Nagao, M., & Hibino, T. (2007). Room-temperature hydrogen sensors based on an In³⁺-Doped SnP₂O₇ Proton Conductor. *Journal of the Electrochemical Society*, 154(5), 172–176. <https://doi.org/10.1149/1.2713702>
- Van Rij, L. N., Le, J., Van Landschoot, R. ., & Schoonman, J. (2001). A novel Ni-CERMET electrode based on a proton conducting electrolyte. *Journal of materials science*, 6, 1069–1076.
- Viricelle, J.-P., Udriou, S., Gadacz, G., Pijolat, M., & Pijolat, C. (2010). Development of single chamber solid oxide fuel cells (SCFC). *Fuel Cells*, 10(4), 683–692. <https://doi.org/10.1002/fuce.200900146>
- Wang, S., Kobayashi, T., Dokiya, M., & Hashimoto, T. (2000). Electrical and ionic conductivity of Gd-doped ceria. *Journal of The Electrochemical Society*, 147(10), 3606–3609.
- Yang, Z., Guo, M., Wang, N., Ma, C., Wang, J., & Han, M. (2017). A short review of cathode poisoning and corrosion in solid oxide fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(39), 24948–24959. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.057>
- Yano, M., Tomita, A., Sano, M., & Hibino, T. (2007). Recent advances in single-chamber solid oxide fuel cells: A review. *Solid State Ionics*, 177(39–40), 3351–3359. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2006.10.014>
- Yin, J.-W., Zhang, C., Yin, Y.-M., Shi, H., Lin, Y., Lu, J., & Ma, Z.-F. (2015). Anode-supported single-chamber solid oxide fuel cell based on cobalt-free composite cathode of Nd_{0.5}Sr_{0.5}Fe_{0.8}Cu_{0.2}O_{3-δ}-Sm_{0.2}Ce_{0.8}O_{1.9} at intermediate temperatures. *Journal of Power Sources*, 286, 217–223. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.173>
- Zhang, C., Lin, Y., Ran, R., & Shao, Z. (2010). Improving single-chamber performance of an anode-supported SOFC by impregnating anode with active nickel catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(15), 8171–8176. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.12.164>
- Zhao, T. S., & Ni, M. (2013). *Solid Oxide Fuel Cell: From Materials to System Modelling*. (T. S. Zhao & M. Ni, Ed.) (The Royal). Cambridge: The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781849737777>
- Zhao, Z., Liu, L., Zhang, X., Wu, W., Tu, B., Cui, D., ... Cheng, M. (2013). High and low temperature behaviors of La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-δ} cathode operating under CO₂/H₂O-containing atmosphere. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(35),

15361–15370. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.09.089>

Zhu, X., Lü, Z., Wei, B., Zhang, Y., Huang, X., & Su, W. (2010). Fabrication and evaluation of a Ni/La_{0.75}Sr_{0.25}Cr_{0.5}Fe_{0.5}O_{3-δ} co-impregnated yttria-stabilized zirconia anode for single-chamber solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(13), 6897–6904. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.028>



Analysis of MIMO Channel Capacity at 28/73 GHz with NYUSIM Channel Simulator

Ahmet Furkan Kola^{1*} , Çetin Kurnaz² 

¹Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Samsun University, Ondokuzmayıs, Samsun, Turkey

²Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ondokuz Mayıs University, Atakum, Samsun, Turkey

Başvuru/Received: 17/06/2022

Kabul / Accepted: 12/01/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Abstract

5G and beyond systems will meet the demand for high data rates in mobile communication with millimeter wave (mmWave) technology. The use of high frequencies reduced signal strength, changed path loss patterns, and increased the effect of atmospheric attenuation. Therefore, using old channel models became impossible, and new channels had to be created. Analyzing the channel models to be produced is also critical for 5G system performance. This study investigated the effects of 28 GHz and 73 GHz frequencies, the number of transmitting and receiving antennas, and LOS/NLOS parameters on 5G channel capacity using the NYUSIM channel simulator. As a result of the analysis, changing from a 2x2 to a 64x64 antenna structure for 28 GHz increased capacity by 29.78 times for LOS and 26.91 times for NLOS. When changing the MIMO configuration from 2x2 to 64x64 at 73 GHz, the channel capacity rises 36.88 times for LOS and 29.00 times for NLOS. With a 64x64 antenna structure, the channel capacity for 28 GHz and LOS is 8.81 times higher than for 73 GHz and 12.56 times higher for NLOS. For the 28 GHz 64x64 structure and LOS condition, the channel capacity is 215.69 times higher than the NLOS condition, while this value is 307.7 times for 73 GHz. It has been recognized that it is critical to adjust the LOS status in communication in urban areas where disruption effects from the use of mmWaves are common. Furthermore, as frequency increases, communication efficiency decreases. Various MIMO configurations can compensate for this reduction.

Keywords

“mmWave, Channel Modeling, Channel Capacity, NYUSIM”

1. Introduction

The increasing number of users, mobile traffic, and user demands for high-data-rate applications has created a need for high data rates in wireless communication. Communication with developing technology began between people and everything, such as innovative home technologies, IoT, virtual reality, cloud technologies, high-definition multimedia, vehicle-to-vehicle (V2V), device to device (D2D), but instead mobile lines. Each innovation added to the wireless communication channel creates a new data rate requirement. The current frequency spectrum would not be able to meet the demands of this rapidly evolving technology (Yang, Xiao, Xiao, & Li, 2019). Radio/TV, mobile communication, satellite, and Wi-Fi systems are currently in the sub-6 GHz frequency region. Because of the extreme density of these frequency ranges, the ITU has identified the millimeter-wave region for fifth-generation (5G) and beyond systems. Using frequency bands ranging from 30-300 GHz, 5G communication, and beyond technologies can achieve data transmission rates of 10 Gbps and higher with very low latency and data loss. In 5G technology, using multiple-input multiple-output (MIMO) and massive MIMO antenna technologies to transmit signals in multiple ways improves communication quality and efficiency. The orthogonal frequency-division modulation (OFDM) technique first appeared in fourth-generation (4G) systems and has also been used in 5G and beyond technologies. Deep fading regions in the frequency selective channel at bandwidths of up to 800 MHz significantly reduce communication efficiency in 5G. With OFDM, the interruptive effect of the channel can be reduced.

The evolution of wireless communication systems since 4G has resulted in new differentiation (Qi, Hunukumbure, Nekovee, Lorca, & Sgardoni, 2016). The channel models will change significantly with the implementation of mmWave to mobile communication. This is because high frequencies will be used for the first time, and the properties of signals with these frequencies will be discovered. Before creating communication systems, channel models are also required to predict how the channel will react in various situations. Therefore, new 5G channel models and computer-aided channel simulators are required to generate these models. In literature, many channel models have been investigated as 5G technology progresses, and many channels and channel simulators have been designed for 5G and beyond systems (Lübke et al., 2021). In 2017, Rappaport made the NYUSIM channel simulator open source as a MATLAB GUI file developed by New York University (Sun, MacCartney, & Rappaport, 2017). There are many studies in the literature using the NYUSIM. Many studies examine the power delay profile and path loss models produced directly by the software (Hasan, Mowla, Rashid, Hosain, & Ahmad, 2019; Mowla, Dutty, & Ahmad, 2019; Zekri & Ajgou, 2019). Also, the effect of system parameters on received power is shown in (Al-Shuwaili & Jamel, 2021; Surahio, Hafeez, & Bohra, 2020). There have also been studies modeled using NYUSIM and capacity analysis, but the effect of channel parameters on capacity has not been investigated thoroughly (Abdullah-Al-Nahid et al., 2021; Hikmaturokhman, Suryanegara & Ramli, 2019; Kurniawan, Danisya, & Isnawati, 2020; Prasetyo, Suryanegara, & Asvial, 2019)[10-13]. In this study, the effects of 28 GHz and 73 GHz frequencies, the number of transmitter and receiver antennas, and whether there is direct sight between the receiver and the transmitter (line of sight, non-line of sight) on the 5G channel capacity was investigated using the NYUSIM simulator.

2. Wireless Channel Model

NYUSIM simulator performs Monte Carlo simulations and has two modes; spatial consistency mode on or off. When spatial consistency is enabled, it creates time and frequency-selective channels. In the off mode used in this study, a time-selective channel consisting of delayed and fading multipath components (MPCs) is established between the stationary transceiver, independent of the channel Doppler shift (Ju, Kanhere, Xing, & Rappaport, 2019). Aside from the basic parameters such as frequency, bandwidth, communication distance, line of sight (LOS), non-line of sight (NLOS) factor, and signal strength, the NYUSIM simulator can determine environmental factors such as rain, humidity, pressure, and temperature, the type of environment where communication will take place (urban, rural, microcell, macrocell), and antenna characteristics. In the NYUSIM, the channel coefficient of each MIMO-OFDM subcarrier is expressed by equation (1).

$$h_{m,k}(f) = \sum_p \alpha_{m,k,p} e^{j\Phi} e^{-j2\pi f\tau} e^{-j2\pi d_T m \sin(\theta)} e^{-j2\pi d_R k \sin(\varphi)} \quad (1)$$

Here, m is the transmitting, k is the receiving antenna number, and f is the subcarrier frequency. Resolvable MPCs are denoted by p ; thus, the multipath components of the noise level can be ignored. α is the amplitude of the antenna gain, Φ indicates the phase of each MPC, τ the delay of the MPCs, d_T and d_R are the distance between each antenna in the antenna groups for the transmit and receive antenna groups, respectively. θ and φ is the angel of departures (AOD) and an angel of arrivals (AOA). The channel matrix is the matrix $h_{m,k}$, each of which represents a channel coefficient.

The close-in free space reference distance (CI) path loss model used by NYUSIM is given in equation (2), which changes according to various atmospheric conditions, taking 1 meter as a reference. Using the CI parameter and the path loss exponent simultaneously provides excellent stability under different environmental conditions (Ju et al., 2019).

$$PL^{CI}(f, d) = FSPL(f, 1m)[dB] + 10n\log_{10}(d) + AT[dB] + X_{\sigma} \quad (2)$$

Here n represents the degree of path loss, which is set to 2 for free space. The distance between the transmitter and the receiver is shown with d . X_{σ} is called shadow fading. The free space path loss model (FSPL) is expressed by equation (3).

$$FSPL(f, 1m)[dB] = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi f \times 10^9}{c} \right) = 32.4[dB] + 20 \log_{10}(f) \quad (3)$$

f represents the carrier frequency in GHz, and c represents the speed of light. Equation (4) represents atmospheric attenuation.

$$AT[dB] = \alpha[dB/m] + d[m] \quad (4)$$

Here, α denotes the attenuation coefficient for dry air, vapor, haze, fog, and rain. The received signal power is directly related to the Friis relation and, as shown in (5), to the path loss.

$$P_r[dBm] = P_t[dBm] + G_t[dB]G_r[dB] \times PL(d)[dB] \quad (5)$$

P_t transmit antenna power, G_t and G_r represents transmit and receive antenna gains, respectively. The average path loss is denoted by $PL(d)$.

Channel capacity analysis can be used to assess the impact of a communication channel on communication quality. Equation (6) gives the capacity expression for MIMO channels.

$$C = B \log_2[\det(I_m + SNR \cdot H \cdot H')] \quad (6)$$

Here, B denotes the bandwidth, SNR is the signal-to-noise ratio, N_t transmitting, N_r is the receiving antenna number, H represents the channel matrix, H' is the conjugate transpose of the channel matrix, I_m represents the identity matrix of $N_t \times N_r$ dimensions. Equation (6) can be arranged as given below (7).

$$C = B \sum_{i=1}^r \log_2(1 + SNR \cdot \lambda_i^2) \quad (7)$$

Here, λ_i^2 , represents the eigenvalues of the $H \cdot H'$ matrix. This operation is carried out because the relationships of the eigenchannels are used in the channel capacity, as demonstrated by equation (8).

$$\lambda_i^2 = \text{eig}(H \cdot H') \quad (8)$$

Capacity analysis can be carried out in either the time or frequency domain. By analyzing each MPCs, capacity can be calculated in the time domain. It is possible to calculate capacity in the frequency domain by analyzing all OFDM subcarriers, and this method was used in this study.

Version 3.1 of the NYUSIM simulator was used in this study. Table 1 lists the channel parameters that were used in the NYUSIM simulations. The table shows that 28 GHz and 73 GHz frequencies were used in the analysis. 28 GHz is currently licensed in existing 5G communication networks. 73 GHz, on the other hand, was chosen because it has the lowest local atmospheric attenuation and is one of the potential 5G/6G communication frequencies. An example of a channel obtained with these parameters is shown in Fig. 1. The equivalent of the channel in the frequency domain is given in Fig. 2. The bandwidth in the NYUSIM is 800 MHz, and each OFDM subcarrier is divided into 500 kHz channels, with channel capacity analyses performed.

Table 1. NYUSIM Channel Parameters

Parameter	Scenario A	Scenario B	Scenario C	Scenario D
Frequency	28 GHz	28 GHz	73 GHz	73 GHz
Environment	LOS	NLOS	LOS	NLOS
Bandwidth	800 MHz	800 MHz	800 MHz	800 MHz
Scenario	UMi	UMi	UMi	UMi
Distance	200 m	200 m	200 m	200 m
Tx Power	30 dB	30 dB	30 dB	30 dB
Pressure	1013.13 mbar	1013.13 mbar	1013.13 mbar	1013.13 mbar
Temperature	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C
Humidity	%80	%80	%80	%80
Rain Rate	60 mm/hr	60 mm/hr	60 mm/hr	60 mm/hr
Antenna number	2x2 - 64x64	2x2 - 64x64	2x2 - 64x64	2x2 - 64x64

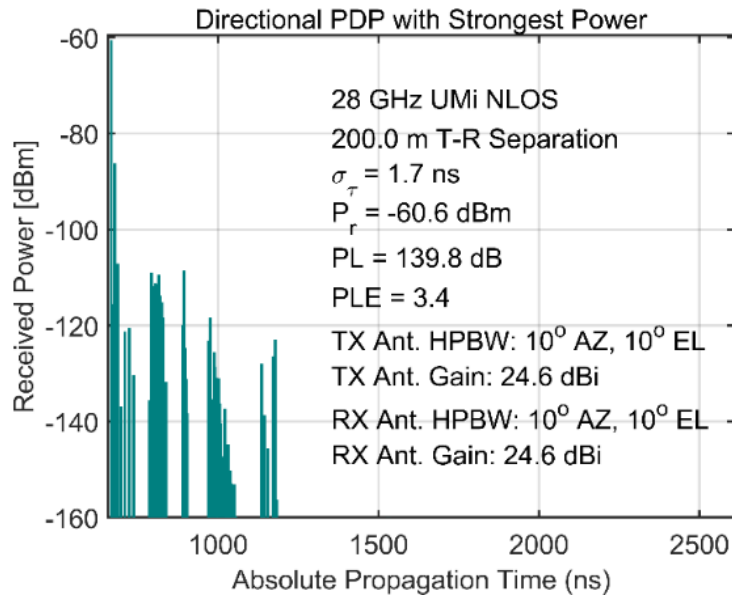


Figure 1. A sample of channel impulse response value in time-domain

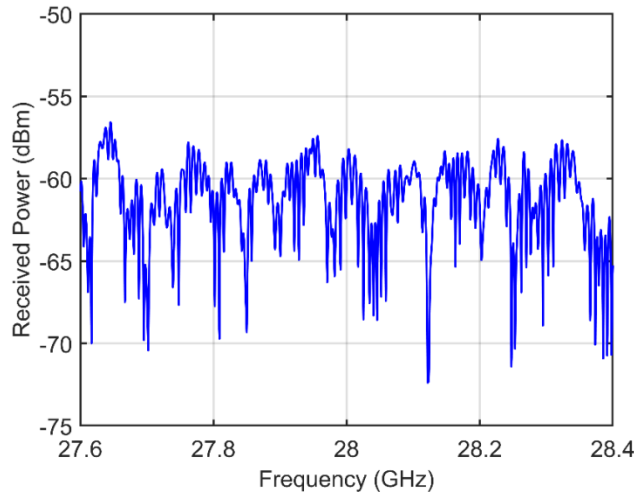


Figure 2. An example of OFDM subcarrier placement in the frequency domain.

Because NYUSIM generates a stochastic model, analyses in this study were performed by repeating each channel simulation 2000 times. The capacity of each generated channel was calculated, and the analysis used the average of 2000 different channel capacity values. After setting 28 GHz and 73 GHz as operating frequencies in the channel simulators, channel capacity analyses were performed for LOS and NLOS. All the channel capacity analyzes were made by selecting the receiver and transmitter antenna numbers of 2x2, 4x4, 8x8, 16x16, 32x32, and 64x64.

3. Simulation Results

This study made channel capacity analyses for frequency, antenna number, and LOS/NLOS situations in this study. For the 28 GHz frequency, channel capacity analyses for LOS and NLOS status were obtained, and the variation of capacity with SNR is shown in Fig. 3. Fig. 3 shows that the channel capacity grows exponentially as the SNR increases. It is also seen that the channel capacity calculated for LOS is much higher than for NLOS. For LOS, 2x2 MIMO structure, and 40 dB, channel capacity is 0,6336 (Table II contains all capacity ratings for 40 dB). This value is 18.8687 for 64x64, and the increase in channel capacity is 29.78 times compared to 2x2 MIMO. For NLOS, 2x2 MIMO structure and 40 dB, channel capacity is 0,00325. For 64x64, this value is 0.08748, and the difference between 2x2 is 26.92 times. For 64x64 MIMO, 40 dB, LOS channel capacity is 215.69 times higher than NLOS condition.

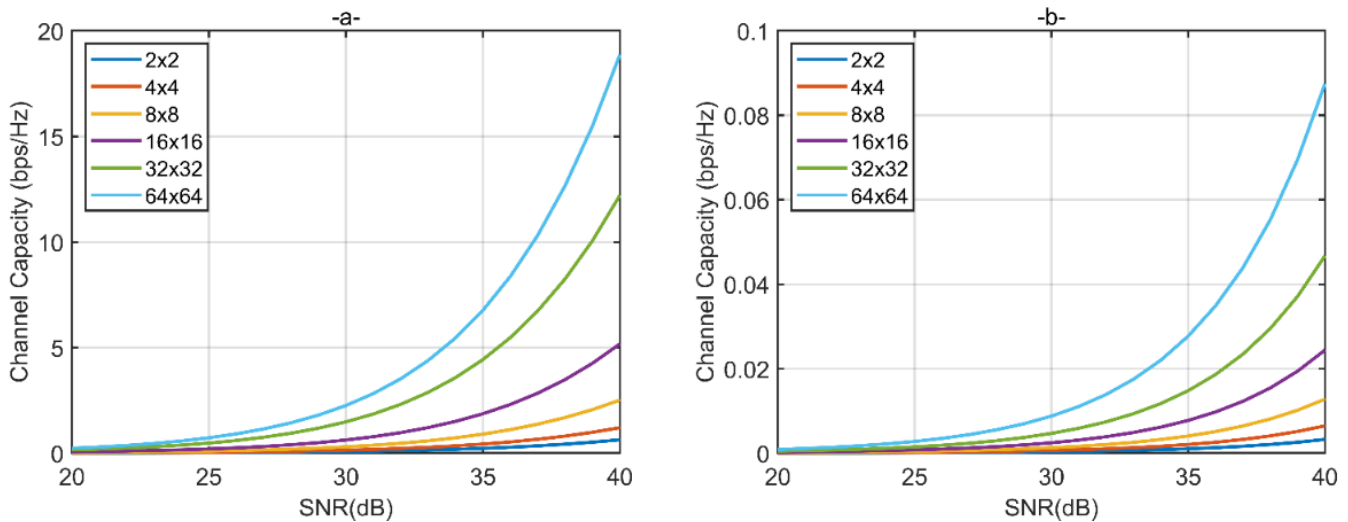


Figure 3. Channel capacity for 28 GHz in condition a) LOS b) NLOS

The changes in channel capacity with SNR for LOS and NLOS at 73 GHz frequency are given in Fig. 4. For 73 GHz, all MIMO models and LOS/NLOS implementations used at 28 GHz have been re-examined. The capacity of the 2x2 MIMO channel with the LOS transmission line is calculated as 0.05806 for 40 dB SNR in the NYUSIM model. This value is 2.14164 for 64x64, and the increase in channel capacity is 36.88 times compared to the 2x2 structure. For NLOS, 40 dB, 2x2 MIMO, the channel capacity is

0.00024, this value is 0.00696 for 64x64, and the amount of increase in the channel capacity is 29 times. For 40 dB, 64x64 MIMO, LOS, channel capacity is 307.7 times higher than NLOS. In NLOS cases, it has been demonstrated that channel capacity drops so dramatically that communication quality suffers significantly in areas with high urbanization. The distances between the antennas must be reduced or the disruptive effects minimized to avoid this. Furthermore, in such environments, increasing the number of base stations and reflective antennas, bringing them closer, and converting communication to LOS conditions will improve efficiency. For 64x64, 40 dB, LOS, 28 GHz frequency, the channel capacity is 8.81 times more than 73 GHz. For NLOS, this value is 12.56 times. The channel capacity decreases as the frequency increases due to both a decrease in signal strength and an increase in atmospheric attenuation. But this decrease is not as much as in the LOS/NLOS case. Therefore, the capacity decreasing with frequency can be compensated by various MIMO implementations or, more simply.

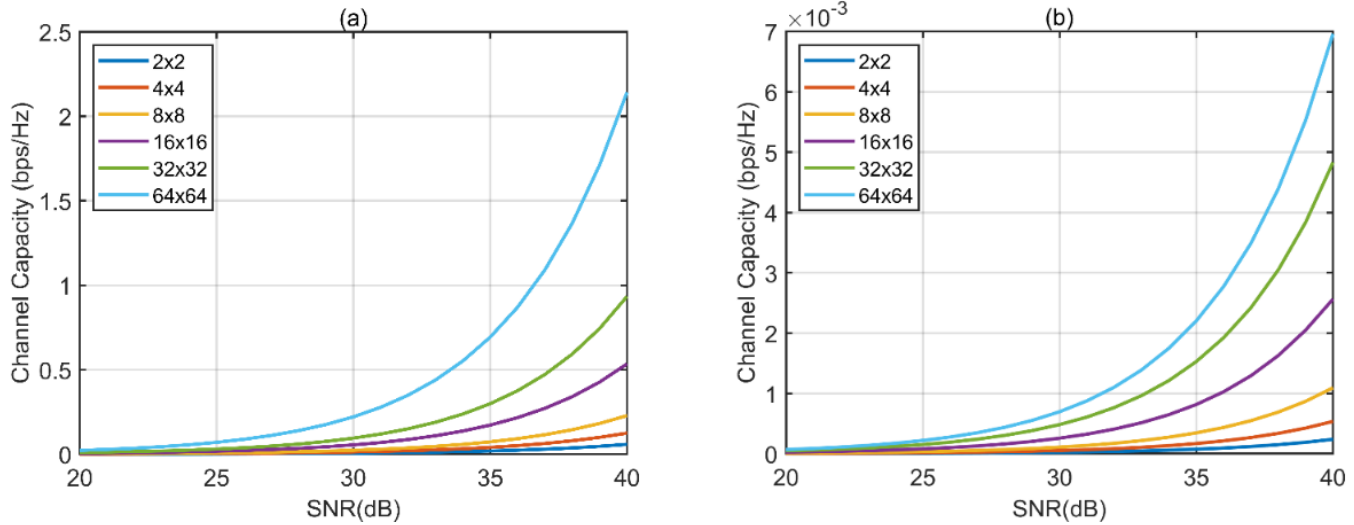


Figure 4. Channel capacity for 73 GHz in condition a) LOS b) NLOS

Table II shows channel capacity values for all MIMO antenna structures, 28 GHz and 73 GHz, and LOS/NLOS conditions are given for the 40 dB SNR value. As can be seen from Table II, the channel capacity also increases depending on the increasing number of transceiver antennas. When the number of transceiver antennas is doubled, the increase in capacity varies between 1.54 and 2.35 times for 28 GHz and LOS, while this value range is between 1.87 and 1.99 for NLOS. For 73 GHz and LOS, this range is 1.74 - 2.34, while it is 1.44-2.20 for NLOS. In short, doubling the MIMO antennas increases channel capacity by approximately twofold. This result was obtained as predicted by equation (7). Communication at high frequencies, where signal strengths and, thus, channel capacities are low, can be carried out much more efficiently with an increase in the number of transceiver antennas. It is also seen from Table II that the amount of increase in channel capacity changes depending on the frequency and LOS/NLOS conditions depending on the increasing MIMO structure. For example, when increasing MIMO configuration from 2x2 to 4x4, channel capacity increases 1.90 times for 28GHz LOS, while NLOS is 1.99 times. While it is 2.14 times for 73 GHz LOS, it is 2.20 times for NLOS.

Table 2. Channel Capacity Analysis

MIMO	Channel Capacity (for 40 dB)			
	28 GHz		73 GHz	
	LOS	NLOS	LOS	NLOS
2x2	0.6336	0.00325	0.05806	0.00024
4x4	1.2055	0.00647	0.12453	0.00053
8x8	2.5119	0.01277	0.22799	0.00109
16x16	5.1755	0.02442	0.53439	0.00205
32x32	12.2122	0.04673	0.93330	0.00483
64x64	18.8687	0.08748	2.14164	0.00696

4. Conclusion

This study investigates different channel models created for millimeter-wave communication systems using the NYUSIM channel simulator. The created channels were analyzed for carrier frequencies of 28/73 GHz, MIMO antenna configurations from 2x2 to

64x64, and LOS/NLOS parameters. Based on the results, the highest channel capacity was obtained for the 28 GHz frequency and 64x64 MIMO structure and LOS state condition. The channel capacity increased to 36.88 times when changing from 2x2 to 64x64, up to 12.56 times when 28 GHz was used instead of 73 GHz, and up to 307.7 times when LOS was used instead of NLOS. Based on these results, it is clear that high frequencies for 5G and beyond systems are critical. Increasing the frequency reduces channel efficiency directly. As a result, the use of higher frequencies requires the use of large MIMO antenna arrays. Furthermore, the location of base stations and reflective antennas in urban areas can be adjusted, increasing the probability of LOS in communication and thus significantly increasing channel efficiency.

References

- Abdullah-Al-Nahid, S., Khan, T. A., Taseen, M. A., Tasnim, S., Marium, T., & Baki, A. (2021). *Comparison of Condition Numbers and Ranks of the MIMO Channel at 77 GHz Carrier Frequency*. Paper presented at the 2021 5th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT).
- Al-Shuwaili, A., & Jamel, T. M. (2021). *5G Channel Characterization at Millimeter-Wave for Baghdad City: An NYUSIM-based Approach*. Paper presented at the 2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD).
- Hasan, R., Mowla, M. M., Rashid, M. A., Hosain, M. K., & Ahmad, I. (2019). *A statistical analysis of channel modeling for 5g mmwave communications*. Paper presented at the 2019 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE).
- Hikmaturokhan, A., Suryanegara, M., & Ramli, K. (2019). *A comparative analysis of 5G channel model with varied frequency: a case study in Jakarta*. Paper presented at the 2019 7th International Conference on Smart Computing & Communications (ICSCC).
- Ju, S., Kanhere, O., Xing, Y., & Rappaport, T. S. (2019). *A millimeter-wave channel simulator NYUSIM with spatial consistency and human blockage*. Paper presented at the 2019 IEEE global communications conference (GLOBECOM).
- Kurniawan, A., Danisya, A. R., & Isnawati, A. F. (2020). *Performance of mmWave Channel Model on 28 GHz Frequency Based on Temperature Effect in Wonosobo City*. Paper presented at the 2020 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat).
- Lübke, M., Dimce, S., Schettler, M., Lurz, F., Weigel, R., & Dressler, F. (2021). *Comparing mmWave Channel Simulators in Vehicular Environments*. Paper presented at the 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring).
- Mowla, M. M., Dutty, H. B. H., & Ahmad, I. (2019). *A statistical mmWave channel modeling for backhaul networks in 5G communications*. Paper presented at the 2019 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering (IC4ME2).
- Prasetyo, A. H., Suryanegara, M., & Asvial, M. (2019). *Evaluation of 5G Performance at 26 GHz and 41 GHz frequencies: The Case of Tropical Suburban Areas in Indonesia*. Paper presented at the 2019 IEEE 14th Malaysia International Conference on Communication (MICC).
- Qi, Y., Hunukumbure, M., Nekovee, M., Lorca, J., & Sgardoni, V. (2016). *Quantifying data rate and bandwidth requirements for immersive 5G experience*. Paper presented at the 2016 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC).
- Sun, S., MacCartney, G. R., & Rappaport, T. S. (2017). *A novel millimeter-wave channel simulator and applications for 5G wireless communications*. Paper presented at the 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC).
- Surahio, A. B., Hafeez, S., & Bohra, N. (2020). *Analyzing indoor/outdoor environmental effects with varying cell size on 5G millimeter-wave propagation*. Paper presented at the 2020 3rd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET).
- Yang, P., Xiao, Y., Xiao, M., & Li, S. (2019). 6G wireless communications: Vision and potential techniques. *IEEE network*, 33(4), 70-75.
- Zekri, A. B., & Ajgou, R. (2019). *Study of mmWave channels for different scenarios*. Paper presented at the 2019 6th International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (ISPA).



İskilip (Çorum) Civarının Kaya Düşmesi Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Assessment Of Rockfall Potential In The Vicinity Of Iskilip (Çorum)

Nazlı Tunar Özcan^{1*}

¹Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe/Ankara TÜRKİYE

Başyuru/Received: 18/11/2022

Kabul / Accepted: 18/01/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Kaya düşmesi yaygın olarak gözlenen şev duraysızlığı türlerinden biridir. Yerleşim alanlarının hasar görmesine, ana ulaşım hatlarının kapanmasına, can ve mal kayıplarına neden olan kaya düşmesi olgusundan korunmak için kaynak alanların belirlenmesi ve bu alanlarda düşme potansiyeli olan blokların yörüngelerinin ve menzil mesafelerinin tahmin edilmesi önem taşımaktadır. Bu çalışmada, kaya düşmesi tehdidi altında bulunan Hacıpiri ve Tabakhane Mahallelerinin (İskilip, Çorum) kaya düşme potansiyelinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, kaya düşmesi kaynak alanı ve bu alanın jeo-mühendislik özellikleri belirlenmiş olup, kinematik analizler, kaya düşmesi risk sınıflamaları ve iki boyutlu kaya düşmesi analizleri yapılmıştır. Eosen yaşlı konglomera biriminden oluşan kaya düşmesi kaynak alanı için yapılan analizlerde, düşme potansiyeline sahip blokların menzil mesafelerinin 140 m ile 210 m arasında değişim gösterdiği ve bu blokların yerleşim yerlerine kadar ulaşabileceği saptanmıştır. Ayrıca, inceleme alanında meydana gelebilecek kaya düşmelerini engellemek ve/veya hasarları azaltmak için kaya tutma bariyerleri Rocfall yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Uygun özelliklerdeki esnek kaya tutma bariyerleri ile düşen blokların yerleşim yerlerine ulaşmasının önlenileceği analizlerle ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler

“İskilip, Kaya düşmesi, Kinematik analiz, Kaya düşmesi risk sınıflama sistemi, İki boyutlu kaya düşmesi analizleri”

Abstract

Rockfall is one of the most common types of slope instabilities. It is important to determine the source areas and to estimate the trajectories and run out distances of the blocks that have the potential to fall in order to be protected from the rockfall phenomenon that causes serious damage to the residential areas, the closure of the main transportation lines, and the loss of life and property. This study aimed to evaluate the rockfall potential of Hacıpiri and Tabakhane (Iskilip, Çorum), which are under threat of rockfall. For this purpose, the rockfall source area and geo-engineering characteristics of this area were determined, kinematic analyses, rockfall risk classifications and two dimensional rockfall analyses were performed. According to the analyzes made for the rockfall source area consisting of Eocene aged conglomerate units, it was determined that the run-out distances of the blocks with fall potential varied between 140 m and 210 m and that these blocks could reach the settlement area. In addition, flexible rockfall barriers are modeled using Rocfall software to prevent possible rockfalls and/or reduce damages that may occur in the study area. The analyses show that these blocks can be prevented from reaching the settlement area with flexible rockfall barriers with appropriate properties.

Key Words

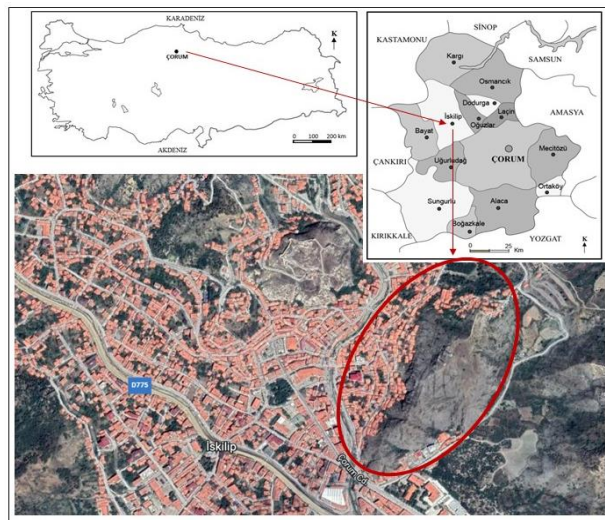
“İskilip, Rockfall, Kinematic analysis, Rockfall risk rating system, Two dimensional rockfall analyses”

1. Giriş

Türkiye’de iklimsel, jeomorfolojik, jeolojik ve hidrojeolojik koşullar nedeniyle deprem başta olmak üzere sel-taşkın, kaya düşmesi gibi mal ve can kaybına sebep olan, birçok doğal afet gerçekleşmektedir (Polat ve Güney, 2013). Bu doğal afetlerden biri olan kaya düşmesi olgusu, kaya bloklarının ana kütlede makaslama yenilmesi olmaksızın ayrılması ve dik bir eğim boyunca serbest düşme, sıçrama, yuvarlanma ve kayma şeklinde hareket etmesi olarak tanımlanmaktadır (Varnes, 1978; Ritchie, 1963; Whalley, 1984; Cruden and Varnes, 1996; Wyllie, 2015). Dik ve eklemlili kaya yamaçlarında sıklıkla gerçekleşen kaya düşmesi yoğun yağışlar, kimyasal-fiziksel ayrışma, donma-çözülme süreçleri (Matsuoka & Sakai, 1999), erozyon aşınması (Aydan 1989; Tokashiki & Aydan, 2010) bitki köklerinin büyümesi, depremler (Kobayashi vd., 1990), volkanik patlamalar ve tsunamiler tarafından tetiklenebilmektedir. Kaya düşmelerinin ve sonucunda meydana gelebilecek hasarların azaltılması amacıyla kaya düşmesi olayının mekanizmasının ortaya konulması, nedenlerinin değerlendirilmesi (Binal & Ercanoğlu, 2010) ve yerleşim alanları ile ulaşım güzergahlarında kaya düşmesi analizleri yapılarak, düşme potansiyeline sahip kaya bloklarının sınırlarının belirlenmesi oldukça önem taşımaktadır (Topal vd., 2012; Akın vd., 2019). Kaya düşmesi konusundaki bilimsel literatür göz önüne alındığında, kinematik analiz, sayısal modelleme, coğrafi bilgi sistemi tabanlı değerlendirmeler (Crosta & Agliardi, 2003; Ercanoğlu & Aksoy, 2004; Aksoy & Ercanoğlu, 2006) ve iki veya üç boyutlu modelleme yaklaşımları (Tunusluoğlu & Zorlu, 2009; Tunar Özcan vd., 2021; San vd., 2020; Tağa & Zorlu, 2017, Kayabaşı, 2018; Guzzetti vd., 2003; Kalender & Sönmez, 2019; Polat, 2020) gibi farklı tekniklerden yararlanıldığı görülmektedir. Kaya düşmelerinin modellenmesi ve düşme potansiyeli olan blokların yörüngelerinin, menzil mesafelerinin, sıçrama yüksekliklerinin ve kinetik enerjilerinin tahmin edilmesi için SAS (Bozzolo & Pamini, 1986), Kolorado kaya düşmesi simülasyonu (Pfeiffer & Bowen, 1989), STONE (Guzzetti vd., 2002), Rocfall (Stevens, 1998), Rockyfor3D (Dorren vd., 2006), CONEFALL (Jaboyedoff & Labiouse, 2011) gibi deterministik ve ampirik yöntemlere dayalı birçok iki ve üç boyutlu yazılım geliştirilmiştir.

Kaya düşmelerinin insan hayatını etkilediği alanlarda, yerleşim yerlerinde, ulaşım hatlarında meydana gelebilecek zararların önlenmesi ve/veya azaltılması için bazı kaya ıslah yöntemleri uygulanmaktadır (Nasery & Çelik, 2020). Kaya saptamaları, kablo ile sabitleme, kayaların kontrollü bir şekilde kırılması, traşlama, ankrajlı çelik kafesler gibi bazı önleme ve koruma yöntemleri kayanın harekete geçmeden önce durdurulmasına yönelik çözümler sunmaktadır. Kaya tutma hendekleri, esnek ve sabit bariyerler, toprak setleri ve geçiş tünelleri gibi bazı yöntemler ise düşme potansiyeline sahip kayaların harekete geçtikten sonra kontrollü bir biçimde durdurulmasını sağlamaktadır.

İskilip İlçe Merkezi’nin (Çorum) doğusunda yer alan Hacıpiri ve Tabakhane Mahalleleri kaya düşmesi tehdidi altındadır (Şekil 1). Geçmiş yıllarda yağışlı dönemleri takiben bölgede yer alan hanelerde önemli hasarlara neden olan kaya düşmesi olayları gerçekleşmiştir. 142 konut, 2 depo, 7 işyeri ve 4 kamu binasının bu kaya düşmesi olaylarından etkilendiği ve/veya etkilenme potansiyeline sahip olduğu Çorum İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü (AFAD) tarafından rapor edilmiş olup, bu yapıların nakledilmeleri önerilmiştir (Becer, 2020). Buna rağmen kaya düşme tehlikesine sahip bu bölgede herhangi bir önlem alınmamış olup, hane halkı ikametine devam etmektedir. Bu durum dikkate alınarak, bu çalışmada Hacıpiri ve Tabakhane Mahallelerinin kaya düşme potansiyelinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda hat etütleri yapılmış, süreksizliklerin set sayısı, yönelim, pürüzlülük, bozunma, açıklık, aralık, dolgu vb. özellikleri belirlenmiştir. Saroglou vd. (2012) tarafından önerilen kaya düşme risk sınıflaması yöntemi kullanılarak inceleme alanının kaya düşmesi riski değerlendirilmiştir. Ayrıca, süreksizlik kontrollü duraysızlıkların tespit edilmesi için kinematik analizler yapılmış ve bunlara ek olarak düşme potansiyeline sahip blokların düşme sırasında izleyebilecekleri yörünge, menzil mesafesi, sıçrama yüksekliği ve kinetik enerjilerini belirlemek için dört hat boyunca iki boyutlu kaya düşmesi analizleri yapılmıştır. Son olarak olası kaya düşmelerini engelleyici kaya tutma bariyerleri modellenerek analizlerin işlevselliğinin artırılması hedeflenmiştir.



Şekil 1. Çalışma Alanının Yer Bulduru Haritası.

2. Çalışma Alanının Tanıtımı ve Jeolojik Özellikleri

İnceleme alanı İskilip'in doğusunda yer alan, Akçay deresinin doğusu ile Koçkayaşı tepesinin batısı ile sınırlandırılmış Hacıpiri ve Tabakhane Mahallelerini kapsamaktadır. Bu alanın genel bir görüntüsü Şekil 2'de sunulmuştur. İnceleme alanında topografik yükseklikler 730-820 m arasında değişmekte olup, kışları yağışlı, yazları sıcak ve kurak geçen karasal iklim koşulları egemendir. İskilip'te sıcaklıklar yıl içerisinde -6°C ile 29°C arasında değişmektedir (Weatherspark.com, 2022). En fazla yağış Mayıs ayında olup, ortalama yağış miktarı 42 mm'dir. Yağışlı dönemleri takiben bölgede kaya düşmesi olaylarında artış yaşanmaktadır. Şekil 3'te kaya düşmesi olayından etkilenen konutlar görülmektedir. Bunun yanı sıra, inceleme alanında kaya düşme tehlikesi altındaki bazı yapılar da Şekil 4'te sunulmuştur.

Üst Kretase sonunda, Sakarya Kıtası ile Kırşehir Kıtasının çarpışması ile, bu iki kıta arasındaki İzmir-Ankara-Erzincan suture zonu üzerinde oluşmuş Çankırı-Çorum havzası (Gürsoy vd., 2019) üzerinde yer alan çalışma alanının jeoloji haritası Şekil 5'te gösterilmiştir. Buna göre, Koçkayaşı Tepe ve çevresinde yüzeylenen Hacihalil Formasyonuna ait Eosen yaşlı konglomeralar, İskilip yerleşim yerinin büyük kısmını kaplayan Paleosen yaşlı kumtaşı, çamurtaşı, konglomera ardalanması ve dere yataklarında çökelen kuvaterner yaşlı alüvyonlar çalışma alanının ana jeolojik unsurlarıdır (Yalçın & Karslı, 1998).

Hacıpiri ve Tabakhane Mahallelerinde mevcut kaya düşmelerinin kaynak zonu Eosen yaşlı Hacihalil Formasyonuna ait konglomeralar olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma alanındaki yamaç yüzeylerinde mostra veren konglomera birimi gri renkli, kırıklı, çatlaklı, yer yer kolayca dağılabilen özelliktedir. Konglomeralar üst seviyelerde kırıklı, çatlaklı olup, alt kısımlara doğru daha masif özellik göstermektedir. Konglomeraların bağlayıcı malzemesini karbonatlı seriler oluşturmaktadır olup içerisinde ince tabaka halinde killi ve jipsli seriler yer almaktadır (Yalçın & Karslı, 1998). Donma-çözünme süreçleri süreksizlik yüzeylerinin ve konglomeraların aşınmasına neden olmaktadır. Ayrıca gece-gündüz sıcaklık farklılıkları, atmosferik ve klimatolojik özellikler kayaların killi ve jipsli kısımlarının aşınmasına ve dayanımının azalmasına yol açmıştır. Kayaların üst kısımları çekiç ile kolaylıkla kırılabilir sertliktedir. Yarı küresel blok şekline sahip konglomera blokları eğimin de etkisiyle harekete geçme potansiyeline sahip olmaları nedeniyle inceleme alanındaki konutlar için tehlike oluşturmaktadır.



Şekil 2. İnceleme Alanının Genel Bir Görünümü.

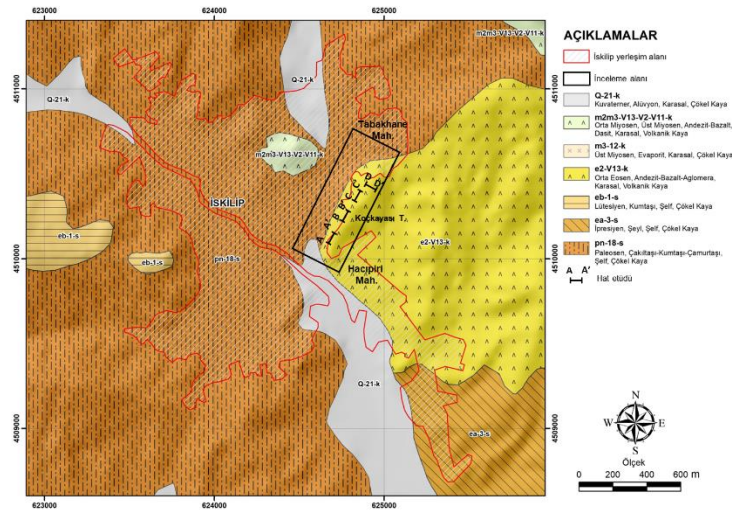


Şekil 3. Hacıpiri Mahallesi Kaya Düşmesinden Etkilenen Konutlar (İRAP, 2021).



Şekil 4. Hacipiri Ve Tabakhane Mahallelerinde Kaya Düşme Tehlikesi Altındaki Bazı Yapılar.

Bu çalışma kapsamında inceleme alanı ve yakın çevresinin eğim haritası da oluşturulmuştur (Şekil 6). Buna göre, eğim haritası üzerinde kırmızıyla işaretli bölgede kaya düşme potansiyeline sahip konglomera birimindeki eğimlerin 35° ile 60° arasında değiştiği belirlenmiştir.



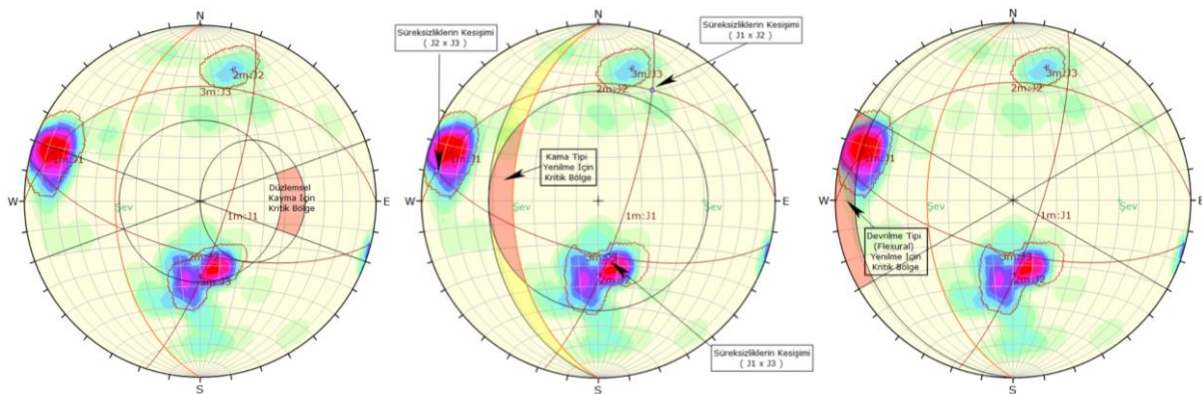
Şekil 5. İnceleme Alanının Jeoloji Haritası (Sevin & Uğuz, 2011'den Düzenlenmiştir).

Tablo 1. Kaynak Kaya Kütesinin Hat Etütleri Boyunca Belirlenen Bazı Özellikleri

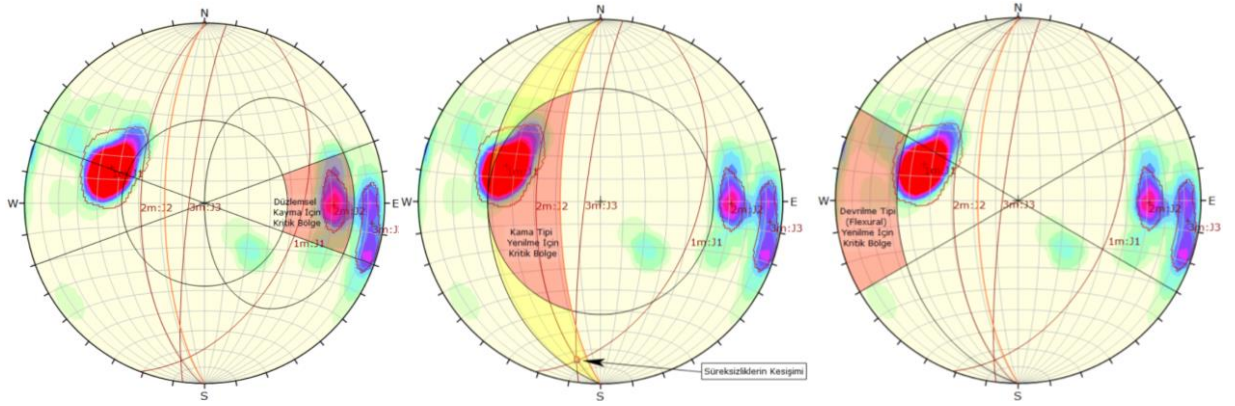
Özellik	Profil	AA'	BB'	CC'	DD'
Süreksizlik set sayısı		3	3	4	2
Süreksizlik seti eğim/eğim yönü		77/108	46/111	35/100	46/103
		33/358	61/271	74/235	46/103
		66/194	83/277	75/322	58/332
Hacimsel eklem sayısı, J_v (eklem/m ³)		2.8	2.1	3.4	1.8
Blok boyutu (m ³)		1.5	5.2	2.4	5
Pürüzlülük puanı, R_r		5	5	5	5
Bozunma puanı, R_w		3	3	3	3
Dolgu puanı, R_f		2	2	0	2
Süreksizlik yüzey koşulu puanı, SCR		10	10	8	10
Yapısal özellik puanı, SR		62	67	58	70
GSI		53	56	47	57

4. Kinematik Analizler

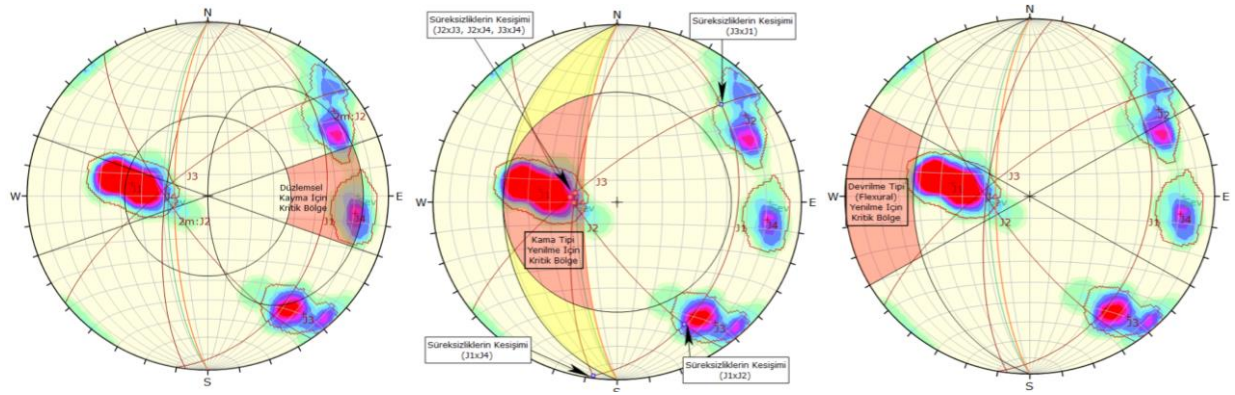
Kinematik analiz yöntemi kaya kütlelerinde süreksizlik sistemleri tarafından kontrol edilen, düzlemsel, kama ve devrilme türü duraysızlıkların belirlenmesi amacıyla ayrıntılı analizlere başlanmadan önce yararlanılan pratik bir yöntemdir (Ulusay, 2010). İnceleme alanında bu tür duraysızlıkların değerlendirilmesi için her bir hat etüdü profili için Dips v7.016 (Rocscience, 2022a) programı kullanılarak kinematik analizler yapılmıştır. AA' profili için yapılan analizler değerlendirildiğinde bu alanda 3 ana süreksizlik setinin olduğu ve herhangi bir düzlemsel ve kama türü duraysızlığın gerçekleşmediği saptanmıştır. Buna karşın devrilme türü duraysızlık için yapılan kinematik analizlerde eğim/eğim yönü 77/108 olan süreksizlik setinin kutup noktalarının %41'inin kritik bölgenin içine düştüğü belirlenmiştir. Buna göre AA' profili için kritik duraysızlık modeli devrilme olarak tanımlanabilir (Şekil 8). BB' profili için yapılan kinematik analizler Şekil 9'da sunulmuştur. Buna göre, BB' profilinde düzlemsel, kama ve devrilme türü duraysızlıkların tümünün gerçekleşme potansiyelinin bulunduğu analiz sonuçlarından görülmektedir. Doğal şev eğim/eğim yönünün genel olarak 75/270 olduğu CC' profili için yapılan analizlerde kaya kütesinin dört ana süreksizlik seti tarafından bölündüğü saptanmıştır (Şekil 10). Bu profil için yapılan kinematik analizlerde eğim/eğim yönü 71/277 olan süreksizlik setinin %75'inin düzlemsel kayma kritik bölgesine girmektedir. Buna ek olarak, üç eklem takımına ait kesişim noktalarının kama türü duraysızlık kritik bölgesinin içinde olduğu belirlenmiştir. Eğim yönü KKB (340) olan DD' profili boyunca düzlemsel ve kama türü duraysızlıkların gerçekleşme potansiyelinin olduğu kinematik analizlerle belirlenmiştir (Şekil 11). Tüm kinematik analiz sonuçları saha gözlemleriyle uyumlu olup, Şekil 12'de inceleme alanında ölçüm yapılan profiller boyunca gerçekleşmiş düzlemsel, kama ve devrilme türü duraysızlıklara ait örnekler sunulmuştur.



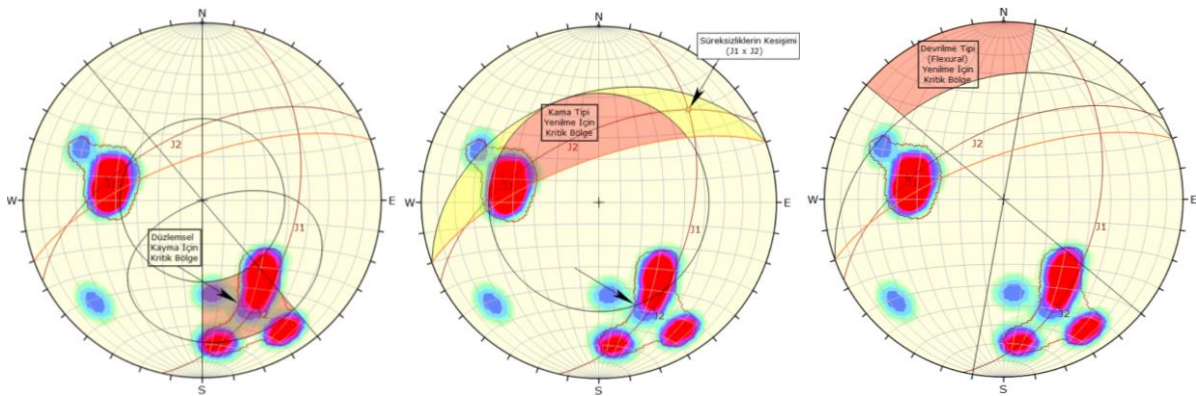
Şekil 8. AA' Profiline Ait Düzlemsel Kayma, Kama Ve Devrilme Türü Duraysızlıklar İçin Yapılan Kinematik Analizler.



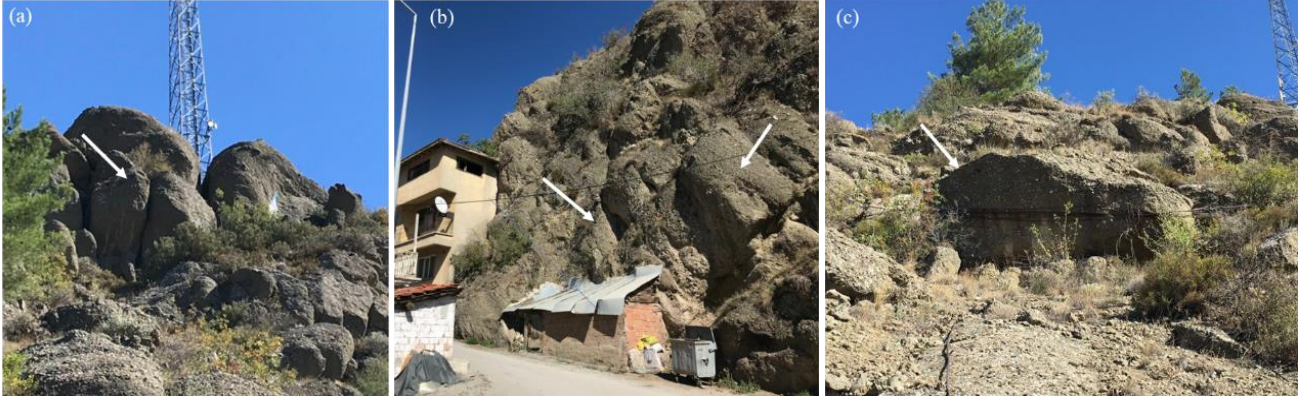
Şekil 9. BB' Profiline Ait Düzlemsel Kayma, Kama Ve Devrilme Türü Duraysızlıklar İçin Yapılan Kinematik Analizler.



Şekil 10. CC' Profiline Ait Düzlemsel Kayma, Kama Ve Devrilme Türü Duraysızlıklar İçin Yapılan Kinematik Analizler.



Şekil 11. DD' Profiline Ait Düzlemsel Kayma, Kama Ve Devrilme Türü Duraysızlıklar İçin Yapılan Kinematik Analizler.



Şekil 12. (a) AA' Profili Yakınlarında Gözlenen Devrilme Türü Duraysızlık, (b) BB' Profili Civarında Gerçekleşmiş Kama Tipi Kayma, (c) CC' Profili Yakınında Düzlemsel Kayma Potansiyeline Sahip Bir Kaya Bloğunun Çelik Halat İle Desteklenmesi.

5. Kaya Düşmesi Risk Değerlendirmesi

Literatürdeki kaya düşmesi riski değerlendirme sistemleri çoğunlukla karayolu ve demiryolu şevlerindeki kaya düşmesi riskinin değerlendirilmesine yönelik olarak geliştirilmiştir (Saroglou vd., 2022). Saroglou vd. (2022), şev geometrisi, kaynak bölgenin konumu, şev pürüzlülüğü, bitki örtüsü, süreksizlik özellikleri, yağış ve sismik aktivite gibi parametreler ve önceki kaya düşmelerine ilişkin bilgileri kapsayan, doğal ve yapay şevlerin kaya düşme riskinin hesaplanmasında uygulanabilen bir kaya düşmesi risk sınıflama sistemi önermişlerdir. Bu çalışma kapsamında, Hacıpiri ve Tabakhane Mahallerinin kaya düşme riski kaya düşmesi risk sınıflama sistemine (Saroglou vd., 2022) göre değerlendirilmiştir. Bu amaçla inceleme alanı benzer özelliklere sahip kısımlar bir grupta toplanacak şekilde A, B, C ve D olmak üzere dört bölgeye ayrılmıştır (Şekil 13). Her bir parametre için belirlenen puanlar, toplam puan ve bölgelerin risk sınıfları Tablo 2'de sunulmuştur. Buna göre inceleme alanının A, B ve C bölgelerinin yüksek, D bölgesinin ise orta derecede kaya düşmesi riskine sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 13. İnceleme Alanı İçin Tanımlanmış Kaya Düşmesi Risk Sınıflaması Bölgeleri.

Tablo 2. Saroglou Vd. (2022) Tarafından Önerilen Yönteme Göre İnceleme Alanının Kaya Düşmesi Risk Sınıflaması.

Şev Bölümleri	A	B	C	D
Parametreler	Parametre ağırlık faktörüne göre hesaplanmış skor (puan)			
1. Şev açısı ($^{\circ}$)	4.20 (60)	7.00 (100)	7.00 (100)	7.00 (100)
2. Şev yüksekliği (m)	1.20 (30)	2.40 (60)	2.40 (60)	2.40 (60)
3. Kaynak zonun yüksekliği	4.20 (60)	4.20 (60)	4.20 (60)	4.20 (60)
4. Şev pürüzlülüğü	1.80 (60)	1.80 (60)	1.80 (60)	1.80 (60)
5. Şev yüzeyi bitki örtüsü	4.00 (100)	4.00 (100)	4.00 (100)	0.40 (10)
6. Süreksizlik pürüzlülüğü / dolgu malzemesi / süreksizlik açıklığı	6.00 (100)	6.00 (100)	6.00 (100)	6.00 (100)
7. Süreksizlik yönelimi	5.00 (100)	5.00 (100)	5.00 (100)	3.00 (60)
8. Süreksizlik devamlılığı	1.20 (30)	2.40 (60)	2.40 (60)	1.20 (30)
9. Süreksizlik yüzeyi dayanımı (JCS, MPa)	0.30 (30)	0.30 (30)	0.30 (30)	0.30 (30)
10. Sağlam kaya dayanımı (MPa)	0.60 (60)	0.60 (60)	0.60 (60)	0.60 (60)
11. Blok hacmi (m^3)	1.20 (30)	2.40 (60)	2.40 (60)	2.40 (60)
12. İncelenen şev genişliği boyunca önceden düşmüş tahmini blok sayısı	2.00 (100)	2.00 (100)	2.00 (100)	1.20 (60)
13. Karstlaşma	0.20 (10)	0.20 (10)	0.20 (10)	0.20 (10)
14. Yağış koşulları ve yoğunluğu	0.90 (30)	0.90 (30)	0.90 (30)	0.90 (30)
15. Permeabilite / Şevdeki drenaj durumu	0.90 (30)	0.90 (30)	0.90 (30)	0.90 (30)
16. Sismik tehlike (yer ivmesi, a)	2.40 (60)	2.40 (60)	2.40 (60)	2.40 (60)
17. Kaya tutma zonunun genişliği (m)	3.00 (30)	3.00 (30)	3.00 (30)	1.50 (15)
18. Kaya düşmesi geçmişi	1.50 (30)	1.50 (30)	1.50 (30)	0.75 (15)
19. Şevin ulaşılabilirliği	1.50 (30)	1.50 (30)	1.50 (30)	1.50 (30)
20. Çarpmanın potansiyel sonuçları ve yapıların değeri	20.00 (100)	20.00 (100)	20.00 (100)	20.00 (100)
Toplam Puan (10 ile 100 arasında)	62.10	68.50	68.50	58.65
Risk Sınıfı	YÜKSEK	YÜKSEK	YÜKSEK	ORTA

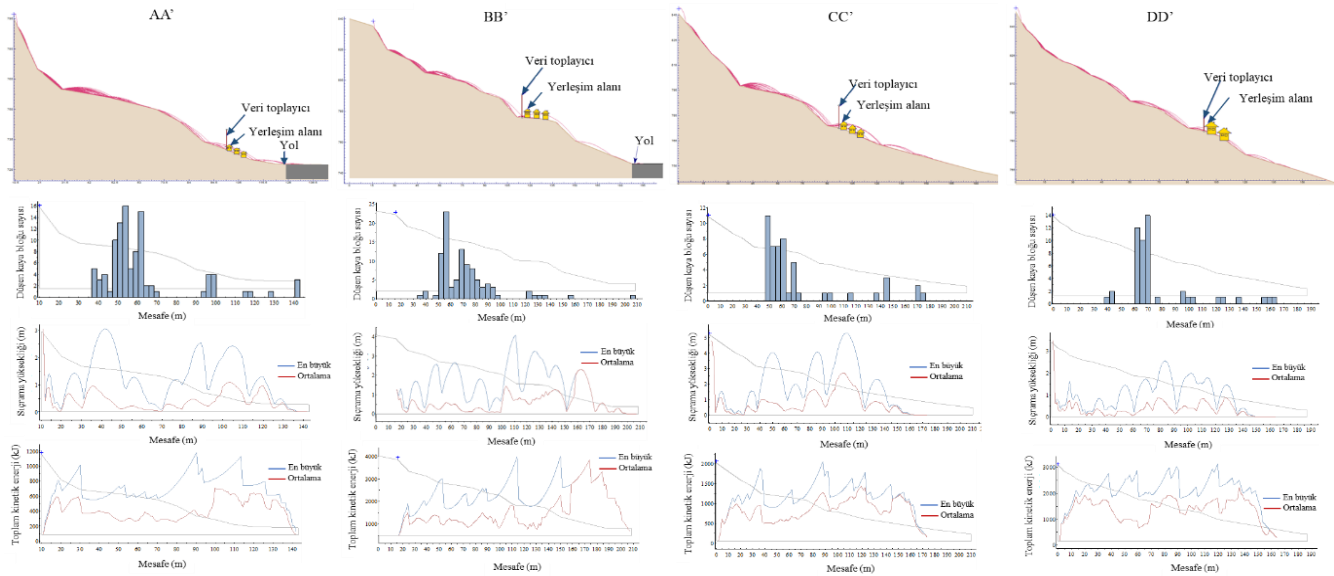
5. Kaya Düşmesi Analizleri

Son yıllarda kaya düşmesinin tahminine yönelik bazı pratik simülasyon programları geliştirilmiş ve bu programlar kaya mühendisliği uygulamalarında geniş yer bulmuştur. Bu programlar yardımıyla şev geometrisi, sürtünme katsayısı, kaya bloklarının boyut ve şekli, normal ve teğetsel geri sıçrama katsayıları (R_n , R_t) gibi parametreleri kullanarak kaya düşmesi davranışı modellenip, düşme potansiyeline sahip blokların izleyeceği yol, ulaşacağı maksimum mesafe, sıçrama yüksekliği ve toplam kinetik enerji miktarları belirlenmektedir. Kinematik analizler ve kaya düşme riski değerlendirmelerinin yanı sıra bu çalışmada etkin sonuçlar elde edilmesi ve kullanım kolaylıkları nedeniyle iki boyutlu RocFall v.8.016 (Rocscience, 2022b) yazılımı kullanılarak inceleme alanının topoğrafik haritasından elde edilmiş dört profil boyunca kaya düşmesi modellemesi yapılmıştır. Kaya düşmesi modellemeleri RocFall yazılımının

içerdiği parçalı kütle (lumped mass) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaya düşme analizlerinde kullanılan yörünge modelleri içerisinde en önemli girdi parametrelerinden biri geri sıçrama katsayısıdır (Ulusay vd., 2006; Çapar, 2018). Normal geri sıçrama katsayısı (R_n) enerji kaybı olarak tanımlanır ve şev yüzeyini kaplayan malzemenin elastisitesiyle belirlenmektedir. Teğetsel geri sıçrama katsayısı (R_t) ise yüzey pürüzlülüğü ve bitki örtüsü gibi şev karakteristikleri tarafından kontrol edilmektedir (Dorren vd., 2004). İnceleme alanında kaya düşmelerinin konglomera birimi üzerinde gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu konglomera birimi için normal ve teğetsel geri sıçrama katsayıları geriye dönük analizlerle sırasıyla 0.5 ve 0.85 olarak saptanmıştır. Süreksizlik sürtünme açısı daha önce de belirtildiği gibi tilt deneylerinden 38° olarak tayin edilmiştir. İnceleme alanında yapılan ölçümlere göre blok boyutları 1 m^3 ile 20 m^3 arasında değişim göstermektedir. Her bir profil için o profile ait ortalama blok boyutu analizlerde girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Analizlerde fırlatılan blok sayısı 100, ilk hız 1 m/s olarak seçilmiştir.

Yukarıda değinilen tüm parametreler dikkate alınarak yapılan kaya düşmesi analizlerinin sonuçları Şekil 14'te sunulmuştur. Bu analiz sonuçlarına göre düşmesi muhtemel blokların yerleşim yerlerine ve hatta yola kadar ulaşabileceği görülmektedir. Düşme potansiyeline sahip blokların menzil mesafelerinin 140 m ile 210 m arasında değiştiği tespit edilmiştir. Ayrıca bu blokların hem kaynak kaya hem de blokların üzerinde hareket edeceği temel zemin olan konglomera çarparak sıçrayabilecekleri en büyük ve ortalama yüksekliklerin ve blokların hareketi esnasında oluşabilecek toplam kinetik enerjilerinin menzil mesafesine göre değişimi de belirlenmiştir. (Şekil 14).

Bu çalışma kapsamında Hacıpıri ve Tabakhane Mahallelerinde meydana gelebilecek kaya düşmelerini engellemek ve oluşabilecek hasarları azaltmak için kaya tutma bariyerleri de RocFall (Rocscience, 2022b) yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Analizlerde kaya tutma bariyerlerin taşıyabileceği en büyük enerji seviyesinin belirlenebilmesi için daha önce yapılmış olan bariyersiz kaya düşmesi analizlerinde evlerin yakınına veri toplayıcı yerleştirilmiş olup bu veriler değerlendirilerek kaya tutma bariyerlerinin özellikleri belirlenmiştir. Buna göre her profil için farklı yüksekliklerde ve farklı enerji sönümleme kapasitesine sahip esnek bariyerler tasarlanmıştır (Tablo 3). Kaya düşmesi analizlerinde kaya blokları şevin en yüksek kısmından ($790 \text{ m} - 820 \text{ m}$ kotlarından) düşürülmüş olup, bu kısım yerleşim yerlerine yatay ekseninde yaklaşık $100\text{-}150 \text{ m}$ uzaklığındadır. Düşmesi beklenen kayalar sadece en yüksek kottan beklenmemekte ve potansiyel kaya düşmesi kaynak alanı yerleşim yerlerine daha yakın mesafelerden de kopabilecek kaya bloklarının mevcut olduğunu göstermektedir. Bu nedenle esnek kaya düşmesi bariyerlerinin yerleşim yerine yakın konumda olması gerekmektedir.

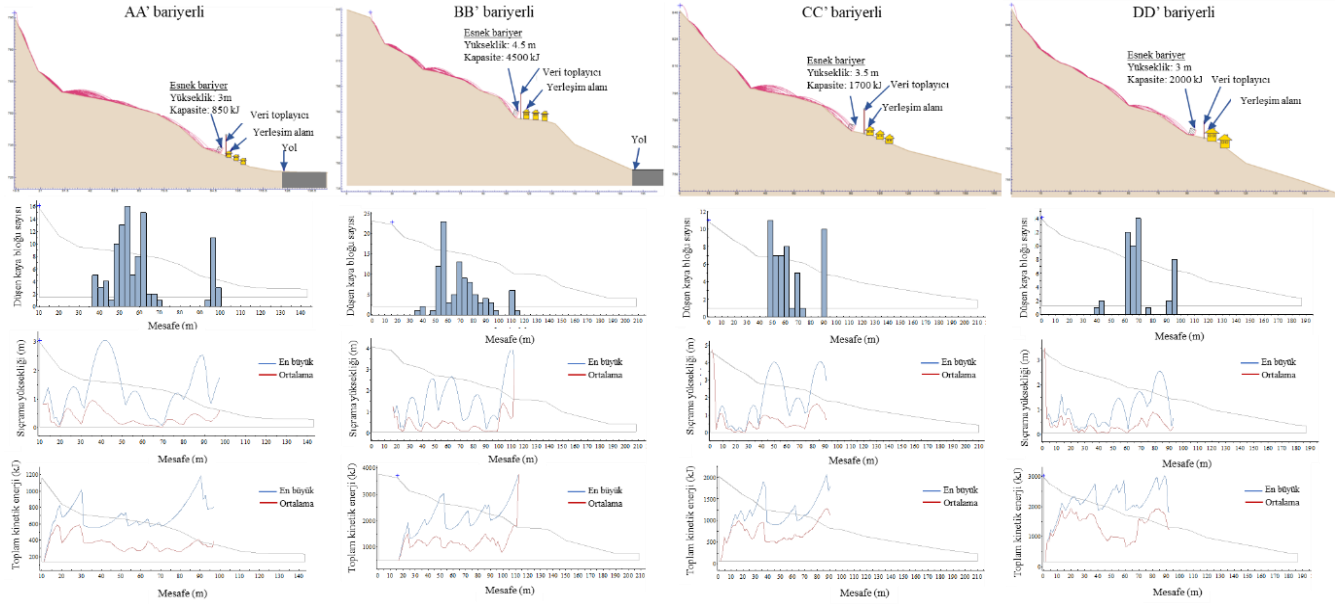


Şekil 14. AA', BB', CC' ve DD' Kesitleri İçin Düşme Potansiyeline Sahip Kaya Bloklarının İzleyeceği Yol, Ulaşacağı Maksimum Mesafe, Sıçrama Yüksekliği Ve Toplam Kinetik Enerji Grafikleri.

Bariyerli kaya düşme analizlerinin sonuçları Şekil 15'te sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre inceleme alanında Tablo 3'te verilen özelliklere sahip olan esnek bariyerlerin inşa edilmesiyle düşme potansiyeli olan kaya bloklarının yerleşim yerine ulaşmasının önüne geçilebileceği ortaya konulmuştur.

Tablo 3. Kaya Düşmesi Analizlerinde Kullanılan Bariyerlerin Yükseklikleri Ve Kapasiteleri.

Profil	Bariyer Yüksekliği	Bariyer Kapasitesi
	(m)	(kJ)
AA'	3.0	850
BB'	4.5	4500
CC'	3.5	1700
DD'	3.0	2000



Şekil 15. AA', BB', CC' ve DD' Kesitleri İçin Esnek Bariyer Yapıldıktan Sonra Düşme Potansiyeline Sahip Kaya Bloklarının İzleyeceği Yol, Ulaşacağı Maksimum Mesafe, Sıçrama Yüksekliği Ve Toplam Kinetik Enerji Grafikleri.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada Hacıpiri ve Tabakhane Mahallelerinin kaya düşme potansiyeli kinematik analizler, kaya düşme risk değerlendirme sistemi ve kaya düşmesi simülasyonlarıyla değerlendirilmiştir. Çalışmada elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- (i) İnceleme alanında yağışlı dönemlerin ardından yerleşim yerlerine hasar veren kaya düşmesi olayları gerçekleşmektedir. Kaya düşmelerinin Eosen yaşlı Hacihalil Formasyonuna ait konglomeralarda bozunmaya bağlı serbestleşme sonucunda meydana geldiği izlenmiştir.
- (ii) Konglomeraların ortalama birim hacim ağırlıklarının 25 kN/m^3 tek eksenli sıkışma dayanımının ortalama 52 MPa ve süreksizlik sürtünme açısının 38° olduğu laboratuvar deneyleriyle belirlenmiştir. GSI değeri 47 ile 57 arasında değişen, ortalama 3 süreksizlik setine sahip konglomeranın kaynak kaya kütleli bloklu-çok bloklu bir kaya kütleli olarak sınıflandırılmıştır. Blok boyutlarının 1 m^3 ile 20 m^3 arasında değiştiği ve ortalama $3,5 \text{ m}^3$ olduğu saptanmıştır.
- (iii) İnceleme alanında düzlemsel, kama ve devrilme türü duraysızların gerçekleştiği gözlenmiş ve kinematik analizlerle de bu durum doğrulanmıştır.
- (iv) Saroglou vd. (2012), tarafından önerilen kaya düşmesi risk sınıflama sistemine göre inceleme alanındaki A, B ve C bölgelerinin yüksek, D bölgesinin ise orta derecede kaya düşmesi riskine sahip olduğu belirlenmiştir.
- (v) Rocfall yazılımı kullanılarak yapılan kaya düşmesi simülasyonlarında düşme potansiyeline sahip blokların mesafelerinin 140 m ile 210 m arasında değiştiği ve bu blokların yerleşim yerlerine kadar ulaşabildiği görülmüştür. 3 m – 4,5 m yüksekliğinde ve 850 – 4500 kJ kapasitesinde esnek kaya tutma bariyerleriyle bu blokların yerleşim yerlerine ulaşmasının önlenilebileceği yapılan analizlere ortaya konmuştur.
- (vi) Kaya düşme potansiyeli önemli ölçüde yüksek olan inceleme alanında gerçekleşebilecek bir kaya düşmesi afetinde can ve mal kayıpları yaşanmaması için gerekli önlemlerin ivedilikle alınması gerekmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında yapılan laboratuvar deneyleri sırasında desteklerini esirgemeyen H.Ü. Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı teknisyenleri Özgür Erol ve Ahmet Bay'a, inceleme alanına ilişkin haritaların hazırlanmasında vermiş olduğu destek için Bülent Topuz'a, Rocfall yazılımının temin edilmesindeki katkısı için sevgili hocam Prof. Dr. Ömer Aydan'a, arazi çalışmaları sırasındaki destekleri için Gökhan Uğuz ve Genco Özcan'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Kaynaklar

Akın, M., Dinçer İ., Orhan A., Ok A.Ö., Muge A. & Topal T. (2019). Kaya tutma hendek performansının 3-boyutlu kaya düşme analizleriyle değerlendirilmesi: Akköy (Ürgüp) örneği, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 43, 211-232.

Aksoy H. & Ercanoğlu M. (2006). Determination of the rockfall source in an urban settlement area by using a rule-based fuzzy evaluation, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, 941-954.

Alejano L.R., Muralha J., Ulusay R., Li C.C., Pérez-Rey I., Karakul H., Chryssanthakis P. & Aydan Ö. (2018). ISRM Suggested Method for Determining the Basic Friction Angle of Planar Rock Surfaces by Means of Tilt Tests, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 3853-3859.

Aydan Ö. (1989). The stabilization of rock engineering structures by rockbolts, Doctorate Thesis, 204p, Nagoya University, 1989.

Becer M. M., Demir, B. & Şener, A. (2020). İskilip İlçesi Hacıpıri – Tabakhane Mahallesi Jeolojik Etüt Raporu. Çorum İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, 2020.

Binal A. & Ercanoğlu M. (2010). Assessment of rockfall potential in the Kula (Manisa, Turkey) geopark region, *Environmental Earth Science*, 61(7), 1361-1373.

Bozzolo D. & Pamini R. (1986). Simulation of rock falls down a valley side, *Acta Mechanica*, 63, 113-130.

Çapar N. (2018). Kaya Düşmesi Analizinde Geri Sıçrama Katsayısının Etkisinin Deneysel ve Analitik Yöntemlerle İncelenmesi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı Doktora Tezi, Ankara, 186.

Crosta G.B. & Agliardi F. (2003). A methodology for physically based rockfall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 407-422.

Cruden M.D. & Varnes J.D. (1996). Landslide types and processes, *Landslides: Investigation and Mitigation*, Transport Research Board, Washington DC, 36-75.

Dorren L. K. A, Maier B., Putters U. S. & Seijmonsbergen A. C. (2004). Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps. *Geomorphology* 57:151-167.

Dorren L.K.A., Berger F. & Putters U.S. (2006). Real size experiments and 3D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, 145-153.

Ercanoğlu M. & Aksoy, H. (2004). Ankara Kalesi ve civarındaki kaya şevleri için potansiyel duraysızlık haritası. *Yerbilimleri*, 25 (29), 97-114.

Gürsoy M., Demircan H., Aydın A., Görmüş M. & Tunoğlu C. (2019). Çankırı-Çorum Havzası Eosen-Oligosen stratigrafisi ve paleocoğrafyası, *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, 28, 49-53.

Guzzetti F., Crosta G., Detti R., & Agliardi F. (2002). STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rockfalls, *Computers and Geosciences*, 28 (9), 1079-1093.

Guzzetti F., Reichenbach P. & Wieczorek G.F. (2003). Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, 491-503.

İRAP (2021). T.C. Çorum Valiliği İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü İl Afet Risk Azaltma Planı, 146.

Jaboyedoff M. & Labiouse V. (2011). Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 11:819-828.

- Kalender A., Sönmez H. (2019). Kargabedir Tepe (Ankara-Eskişehir Karayolu) Bölgesinin Kaya Düşmesi Duyarlılığının İnsansız Hava Aracı (İHA) Görüntüleri Kullanılarak Konik Yayılım Yaklaşımıyla Değerlendirilmesi, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 43, 187-210.
- Kayabaşı A. (2018). The assesment of rockfall analysis near a railroad: a case study at the Kızılinler village of Eskişehir, Turkey, *Arabian Journal of Geoscience*, 11, 800.
- Kobayashi Y., Harp E.L. & Kagawa T. (1990). Simulation of rockfalls triggered by earthquakes, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 23, 1-20.
- Matsuoka N. & Sakai H. (1999). Rockfall activity from an alpine cliff during thawing periods, *Geomorphology*, 28, 309-328.
- Nasery M.M. & Çelik M. (2020). Kaya Islahı Çalışmalarında Birleşik Çözümlerin İncelenmesi: Trabzon Kaymaklı Örneği, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25 (1).
- Pfeiffer, T.J. & Bowen T.D. (1989). Computer simulation of rockfalls. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 1, pp 135-146.
- Polat, A. (2020). Cbs Tabanlı 3b Kaya Düşmesi Analizi Ve Veri Hazırlama Süreçleri: Kavak Köyü(Sivas-Türkiye) Örneği, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25 (3).
- Polat, S. & Güney, Y. (2013). Bağbaşı Köyü'nde (Uşak) Kaya Düşmesi. *Uşak Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 6 (1), s 198-224.
- Ritchie A.M. (1963). Evaluation of Rockfall and its Control. *Stability of Rock Slope Vol 17, Highway Research Board, National Academy of Sciences-National Research Council., Washington, DC*, pp 13-28.
- Rocscience (2022a) <https://www.rocscience.com/software/dips>, Dips v7.016, 2022.
- Rocscience (2022b) Rocfall 2D software, Rocscience Inc.,Toronto, Canada, 2022.
- San N.E., Topal T. & Akin, M.K. (2020). Rockfall Hazard Assessment Around Ankara Citadel (Turkey) Using Rockfall Analyses and Hazard Rating System, *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 3831-3851, 2020.
- Saroglou H., Marinos V., Marinos P. & Tsiambaos G. (2012). Rockfall hazard and risk assessment: an example from a high promontory at the historical site of Monemvasia, Greece. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 12, 1823-1836, 2012.
- Sevin M. & Uğuz M.F. (2011). 1:100.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Çankırı G32 paftası. MTA Yayınları No: 148, 2011.
- Sönmez H. & Ulusay R. (2002). A discussion of the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. *Yerbilimleri*, 26, 77-90, 2002.
- Sönmez H. & Ulusay R. (1999) Modifications to the geological strength indeks (GSI) and their applicability to stability of slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 36 (6), 743-760.
- Stevens, W. D. (1998). Rocfall: A tool for probablistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls, Master's thesis, University of Toronto, http://www.rocscience.com/library/pdf/rf_3.pdf, 1998.
- Stimpson B. (1981). A suggested technique for determining the basic friction angle of rock surfaces using core. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science Geomechanics Abstracts*, 18, 63-65, 1981.
- Taga H. & Zorlu K. (2017). Assessment of Rockfall Hazard on Steep Slopes: Ermenek (Karaman, Turkey), *Yerbilimleri*, 38 (2), 161-178.
- Tokashiki N. & Aydan Ö. (2010). The stability assessment of overhanging Ryukyu limestone cliffs with an emphasis on the evaluation of tensile strength of Rock Mass. *Journal of Geotechnical Engineering, JSCE*, 66(2), 397-406.
- Topal, T., Akin, M. K. & Akin, M. (2012). Rockfall hazard analysis for an historical Castle in Kastamonu (Turkey). *Natural Hazards*, 62, pp 255-274, DOI:10.1007/s11069-011-9995-1
- Tunar Özcan N., Aydan Ö., Murayama Y., Horiuchi K. & Ulusay R. (2021). A Study on Model Experiments and Numerical Simulations on Rockfalls and Its Utilization to Assess the Rockfall Hazards in Miyagi Island (Japan) and Cappadocia (Turkey). In: Barla M., Di

- Donna A., Sterpi D. (eds) Challenges and Innovations in Geomechanics. IACMAG 2021. Lecture Notes in Civil Engineering, Springer, 126, 482-490.
- Tunusluoglu M.C. & Zorlu K. (2009). Rockfall hazard assessment in a cultural and natural heritage (Ortahisar Castle, Cappadocia, Turkey). *Environmental Geology*, 56 (5), 963–972.
- Ulusay R., Gokceoglu C., Topal T., Sonmez H., Tuncay E., Erguler Z. A. & Kasmer O. (2006). Assessment of environmental and engineering geological problems for the possible re-use of an abandoned rock-hewn settlement in Ürgüp (Cappadocia) Turkey, *Environmental Geology*, 50, 473–494.
- Ulusay R. (2010). Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları No:38, Ankara, 458, 2010.
- Varnes, D.J. (1978). Slope Movement Types and Processes. Landslide Special Report, 176, National Academy of Sciences, Washington, DC, pp 11-33.
- Whalley W.B. (1984). Rockfalls, Wiley, New York, 217–256.
- Whetherspark (2022). <http://weatherspark.com>, erişim tarihi, 2022.
- Wyllie D.C. (2015). Rock fall engineering, CRC Press, New York.
- Yalçın H., Karslı Ş., Dodurga (Çorum) kömür havzasında karbonat ve smektit minerallerinin kökeni ve diyajenetik evrimi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 41, 95-108, 1998.



Otomotiv Sektöründe Kullanılan İşletme İçi Ergonomik Risk Değerlendirme Metodunun Reba Yöntemi ile Karşılaştırılması

Comparison Of in-House Tailored Ergonomic Risk Assessment Method Used in Automotive Industry with Reba Method

Didem Terzi^{1*}, Güvenç Cengiz¹

¹ Toyota Otomotiv Sanayi, 41100 Kocaeli, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 07/11/2022

Kabul / Accepted: 21/01/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Emek yoğun otomotiv endüstrisinde ergonomik risklerin değerlendirilmesi ve çalışma ortamının iyileştirilmesi hem çalışan sağlığı hem de üretim verimliliğinin artması için çok önemlidir. Günlük pratikte ve bilimsel araştırmalarda kullanım kolaylığı ve düşük maliyetli olması nedeniyle gözlemsel ergonomik risk değerlendirme (ERD) yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Halihazırda kullanılan ERD yöntemlerinin fiziksel yüklenme, tekrar sayısı, yapılan işin süresi ve uygunsuz duruşlar gibi birden çok ergonomik riski kapsayamadığı görülmektedir. Kullanılan metodun odaklandığı başlığa göre aynı taskı değerlendiren iki yöntemden biri yüksek risk saptarken diğeri aynı task için düşük risk olarak değerlendirebilmektedir. Bu çalışmada otomotiv üretim sektöründe kullanılmakta olan işletme içi ERD yöntemi ile literatürde sık kullanılan REBA ERD yöntemi başüstü aktiviteyi içeren bir montaj işi üzerinden karşılaştırılacaktır. Hem işletme içi ERD metodunda hem de REBA metodunun her ikisinde de değerlendirilen task yüksek ergonomik risklidir. İşletme içi ERD ile işin yapılma süresi ve tekrar sayısını dikkate almaktadır. El bileğinde REBA oldukça sınırlı bir değerlendirme yapmakta ve el aletlerini değerlendirmemektedir. Alt ekstremitte değerlendirmesinde her iki yöntemde benzer parametrelerin değerlendirildiği görülmüştür. Literatürde henüz sektöre özel ERD metodlarının olmadığı ve kullanılan standart ölçeklerin özellikli tasklarda yetersiz kalabildiği görülmüştür. İşletme içi ERD metodlarının yapılan işe özel olarak ve o işletmenin İSG hafızasıyla ve tecrübesiyle geliştirilmesi sayesinde sorunların saptanmasında öne çıktığı söylenebilir.

Anahtar Kelimeler

“Otomotiv Sektörü, Ergonomik Risk Değerlendirme, REBA, El Aleti, İşletme İçi Geliştirilmiş Risk Değerlendirme, Ergonomi”

Abstract

Evaluating ergonomic risks and improving the working environment in the labor-intensive automotive industry is very important for both employee health and increasing production efficiency. Observational ergonomic risk assessment (ERA) methods are frequently used in daily practice and scientific research due to their ease of use and low cost. It is seen that currently used ERA methods cannot cover multiple ergonomic risks such as physical load, number of repetitions, duration of work, and inappropriate postures. One of the two methods, which evaluates the same task according to the subjects that the method used is specialized, determines high risk, while the other can evaluate it as low risk for the same task. In this study, the in-house ERD method, which is used in the automotive production sector, and the REBA ERD method, which is frequently used in the literature, will be compared over an assembly job involving overhead activities. The task evaluated in both the in-house tailored ERA method and the REBA method has a high ergonomic risk. With in-house ERA, the duration of the work and the number of repetitions are taken into account. In the wrist, REBA makes a very limited evaluation and does not evaluate hand tools. It was observed that similar parameters were evaluated in both methods in the evaluation of the lower extremities. It has been seen in the literature that there are no industry-specific ERA methods yet and the standard scales used may be insufficient for specific tasks and the in-house tailored ERA methods come to the fore in identifying problems.

Key Words

“Automotive Industry, Ergonomic Risk Assessment, REBA, Hand Tool, In-House Tailored Risk Assessment, Ergonomics”

1. Giriş

Emek yoğun otomotiv endüstrisinde ergonomik risklerin değerlendirilmesi ve çalışma ortamının iyileştirilmesi hem çalışan sağlığı hem de üretim verimliliğinin artması için çok önemlidir. Ağır olarak bant üretim sistemi modelinin kullanıldığı sektör, işe özgü üretim özellikleri ile öne çıkmaktadır. Her bir bantta verim, zaman tasarrufu ve kolaylık gibi üretime dair özelliklerin maksimize edilmesine çalışılırken diğer yandan çalışanların hiç/en az kas mesleki risk faktörlerine maruz kalması hedeflenmelidir. Bant üretimi sırasındaki denge “know how” olarak tanımlanan tecrübe ve bilginin getirdiği özgünlüğü de beraberinde getirmektedir (Ayan, 2015). Çalışan sağlığı ve güvenliği gözlemlenmediği durumlarda iş ile ilişkili sağlık sonuçları karşımıza çıkmaktadır.

ILO iş ile ilişkili sağlık sonuçları için "gizli epidemi" tanımını kullanmıştır. Bu nedenle ortaya çıkan direk ve indirekt maliyetlerin ülkelerin ekonomisine maliyetinin toplam yurtiçi gelirinin en az %4'nün kaybına yol açtığına dikkat çekmiş ve koruma ve önleme faaliyetlerinin önemine vurgu yapmıştır (ILO, 2013). Kas iskelet sistemi hastalıkları mesleğe atfedilen yük bakımından ilk sıradadır ve tüm dünyada en sık görülen mesleki sağlık sorunlarının başında gelmektedir (HSE, 2021). İş yerinde mesleki ergonomik risk faktörleri çok çeşitlidir. Ayakta durma, oturma, çömelme, belden yanlara esneme, vücudu öne eğme, uzanma, kaldırma, itme ve çekme, kolların omuz seviyesinin üzerinde olması ve tutma ve kaldırma, taşıma (özellikle yükün elle taşınması) elde tutma, araç-gereç ya da tesisatları çalıştırmada güç/efor kullanma, el/kolun bir araç olarak kullanılması (bükme, vurma, çekiçleme, presleme), tekrarlayan yüksek el aktivitesi gerektiren işler, tüm vücut ile el ve kolun titreşimi, zorlukla ulaşılabilen işyerleri (merdiven çıkma, tırmanma gibi) bu durumlara örnek olarak gösterilebilir. İş ile ilgili kas iskelet sistemi hastalıkları literatürde başlıca; “Repetitive Stres Injury-RSI (Tekrarlayan Stres Yaralanmaları), Repetitive Stres Disorder-RSD (Tekrarlayan Stres Bozukluğu), Cumulative Trauma Disorder-CTD gibi oldukça kapsayıcı ve geniş tanımlanan birçok tıbbi durumu içine alan hastalıklar şeklinde görülmektedir. Yukarıdaki tanımlarda sıklıkla tekrarladığı üzere “repetitive” yani “tekrarlayan” vurgusu önemlidir. Tekrar sayısı KİS hastalıklarının ortaya çıkmasında en önemli faktörlerden biridir. Diğer parametreler uygulanan güç ve dinlenme süreleridir. KİS hastalıkları için yaş, kronik hastalıklar, BKİ, kişinin genel sağlıklılık durumu, spor ve egzersiz geçmişi gibi diğer faktörler de etkili olmaktadır. Mesleki nedensellik açısından değerlendirilirken en çok zorlanılan hastalık grubunun başında gelmektedir. Kişinin günlük hayatı ile ilişkili olabilecek maruziyetleri, meslek hastalığı tanımındaki tek ve güçlü nedensellik ilkesini çoğu zaman karşılayamamaktadır. Örneğin silikozisdeki gibi kişinin silika tozunu yalnızca çalışma ortamında maruz kalması gibi kesin bir durum yoktur. Bu nedenle MKİS risk değerlendirme süreçlerinin işe spesifik olması ve sorunlu taskı ya da hareketi net olarak tanımlaması oldukça kritiktir (Güven, 2012).

1.1 Risk Değerlendirme Amaçları Ve Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemleri

İşyerindeki sağlık ve güvenlik çalışmalarının temeli risk değerlendirme çalışmalarına dayanmaktadır. Alınacak önlemler, sağlık izlemi sırasında yapılacaklar ve risk kontrolü çalışmalarının planlanması iyi bir risk değerlendirme ile mümkün olabilir. Ülkemizde konu ile ilgili ana mevzuatlar 6331 sayılı “İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu” ve “İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği” dir (Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, 2012; Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirme Yönetmeliği, 2012). İlgili düzenlemeler iş yerlerinde düzenli olarak risklerin değerlendirmesi ve kontrolü çalışmaları için işverene tam sorumluluk vermektedir. Ancak herhangi bir risk türü için kullanılması önerilen bir risk değerlendirme metodu tanımlanamamaktadır. İş yerleri çalışan sayıları, tehlike sınıfları ve yapılan işlerin özellikleri, ekonomileri ve insan güçleri bakımından birbirine eşit olmadığından her iş yerinin kendine uygun bir metod ile risk değerlendirme yapmasını tavsiye etmektedir. Dünya örneklerinde de benzer bir bakış açısının varlığı görülmektedir (Mert, 2014).

Günlük pratikte ve bilimsel araştırmalarda kullanım kolaylığı ve düşük maliyetli olması nedeniyle gözlemsel ergonomik risk değerlendirme (ERD) yöntemleri en çok kullanılan yöntemlerdir. REBA, RULA, OWAS, HMD ölçekleri en sık kullanılan ölçeklerin başında gelmektedir (Delice, 2018). Literatürde farklı sektörlerde çoğunlukla birden çok ERD yönteminin birlikte kullanıldığı çalışmalar yapıldığı görülmektedir (Kahya E, 2019; Kırıcı, 2018) Ancak standart ERD yöntemlerinin uygulama ve çözüm getirme noktasında kısıtlılıkları ve yetersizlikleri sıklıkla bildirilmektedir (Özmehmet Taşan, 2019). Halihazırda sıklıkla kullanılan ERD yöntemlerinin hem fiziksel yüklenme, hem tekrar sayısı, hem yapılan işin süresi, hem de uygunsuz duruşlar gibi birden çok ergonomik riski kapsayamadığı görülmektedir. Kullanılan metodun odaklandığı başlığa göre aynı taskı değerlendiren iki yöntemden biri yüksek risk saptarken diğeri aynı task için düşük risk olarak değerlendirebilmektedir. Uluslararası kurumlar belli aralıklarla ERD metodlarını güncelleyerek riskin en spesifik şekilde tanımlanmasına çalışmaktadır. Sık kullanılan REBA yönteminin RULA ve OWAS yöntemleri üzerinden zenginleştirilerek geliştirilmesi de bu uygulamalara bir örnektir. Ergonomi çalışmalarının amacı kas iskelet sistemi hastalıkları için riskleri ortadan kaldırmak olduğundan iyileştirme çalışmalarına nereden başlayacağınıza gösterecek sonuçlar en doğru şekilde belirlenmeli ve hiçbir etken gözden kaçırılmamalıdır. Bu nedenle standart ERD yöntemlerinin karşılayamadığı başlıklar için ERD geliştirme ve uygulama çalışmaları hız kazanmıştır. Özellikle otomotiv üretiminde birden çok ERD kombine edilmesine dayanan işletme içi ERD çalışmaları önemli hale gelmiştir (Mert, 2014).

Bu çalışmada otomotiv üretim sektöründe kullanılmakta olan işletme içi ERD yöntemi ile literatürde sık kullanılan REBA ERD bir task üzerinden karşılaştırılacaktır.

2. Material Method

Karşılaştırmanın yapılacağı task fabrikada ergonomik risk açısından yüksek olarak değerlendirilen ve sık yapılan tasklardan biridir. Taskın adı Aircone Tube Montaj'dır. İşin tanımı: Montaj hattında yürüyen bant üzerinde, zamana bağlı ve tekrarlı olarak, aracın

önündeki motor odasına havalandırma sistemi için gerekli klima borusunun montajı işleminin yapılmasıdır. Karşılaştırma video kaydı üzerinden ergonomist iş güvenliği uzmanı ve işyeri hekimi tarafından önce kör biçimde ardından ortak uzlaşa puanları belirlenmesi metodu ile yapılmıştır.

2.1 REBA (The Rapid Entire Body Assessment, Hızlı Tüm Vücut Analizi)

Tüm vücut değerlendirmesi için geliştirilen REBA yöntemi 1999 yılında Hignett ve McAtamney tarafından yayımlanmıştır. REBA yönteminde bir çalışma duruşunun REBA puanı belirlenirken vücut bölümleri A ve B grubu olmak üzere iki grupta incelenir. A grubu altında boyun, gövde, bacaklar ve B grubu altında kollar ve el bileği değerlendirilmektedir. Bu vücut bölümlerinin hareketleri açılara ayrılmıştır ve toplam puan belirlenirken vücut bölümlerinin duruşlarının birleşik etkisi değerlendirilmektedir. Ayrıca yük/kuvvet etkisi, kavrama şekli, hareketin ne sıklıkta yapıldığı, hareket sırasında vücudun sabit durması veya hareket ettiğinde aynı zamanda dönme, bükülme olup olmadığı da dikkate alınmaktadır. REBA maruziyet puanı aksiyon ihtiyaçlarının kategorize edilmesi için kullanılmaktadır. Bu yöntemin uygulanması için işletmeye özel bilgileri içeren REBA formu ve bu yöntemi uygularken doğru karar vermeyi destekleyecek bir gözlemci rehberi hazırlanmıştır (Hignett, 2000).

2.2 İşletme İçi ERD Metodu (JT-SJT, JOSHI TEN & SHISEI JURYO TEN)

El-kol yükü ve pozisyonu ile ve sırt-bacak yükü ve pozisyonunun analiz edilmesine olanak tanıyan JT-SJT yönteminin ilk versiyonu 1970 yılında Japonya'da oluşturulmuştur. İşletme içi ERD metodunda değerlendirme üst gövde, üst gövde pozisyonu, alt gövde, alt gövde pozisyonu olmak üzere 4 ayrı puandan oluşmaktadır. Her bir bölüm kendi içinde <20 puan düşük risk, 20 dahil 25 puana kadar orta ergonomik risk, 25 puan ve üzeri ise yüksek ergonomik risk puanı anlamına gelir. Herhangi bir bölgede 25 puan ve üzeri çıkması iş istasyonunda aşırı ergonomik yüklenme var demek için yeterlidir. Bu değerlendirme sistematığı aynı zamanda çalışanın prosese yerleştirilmesi ile ilgili karar verilirken dikkate alınması gereken ilave diğer faktörleri de gözden geçirir. RD basamakları standart iş kontrol edilir, prosesin videosu çekilir, videodan prosesin tam bir turu (cycle) tespit edilir ve değerlendirme iki bağımsız (metod tek kişinin de değerlendirme yapmasına izin vermektedir) gözlemci tarafından yapılır. Üretim adeti mesainin bir tur için geçen zamana bölünmesi metodu ile hesaplanmaktadır. Üst gövde değerlendirmesinde; baskın kolun belirlenmesi, dirseğin omuz hizasından >90° derece üzeri açıda çalışma zamanı, vardiya başına üretim adeti, el aleti kullanma durumu ve parametreleri kullanılmaktadır. Kol kaldırma süresi ve üretim adedi puanlama matrisinde uygun basamakta eşleştirilerek üst ekstremité puanı elde edilmiş olur. Eğer çalışan el aleti kullanıyor ise bu puana el aleti puanı eklenir ki bu puan el aleti katsayısı, tetikleme sayısı ve en son üretim adedine göre çarpanlar ilgili tablolardan eklenmektedir. Üst gövde duruşu puanı hesabında üretim özellikleri ve literatür verileri ışığında belirlenen 12 pozisyonun uygun olan seçilerek frekans ile çarpılır ve üst gövde puanı elde edilir. Alt gövde değerlendirmesinde belden eğilme >20°, parça kaldırma, eğilmenin pozisyonları temel olarak değerlendirilen parametrelerdir. Duruşun süresi ve üretim adedi ile son puan belirlenmektedir. Bu metotta kaldırılan parçalar ile ilgili ayrı bir değerlendirme daha yapılmaktadır. 5 kg ve üzeri ağırlıklar için kaldırma sayısı ve parçanın ağırlığı üzerinden elde edilen puan üretim adedi ile çarpılarak bir sonuç puanı hesaplanmaktadır. Aynı ayrı bölgelere yönelik puanların hesabından sonra "ilave ergonomik risk faktörleri" değerlendirmesi yapılmaktadır. El aletinin titreşim seviyesi, öne-yukarıya veya aşağıya doğru fazla uzanarak çalışma, araç içine girilerek çalışma bu basamakta değerlendirilmektedir. İşletme içi RD metodunda risk puanı elde etmede kullanılan değişkenlerden birisi "üretim adedi" dir. Yani tekrar sayısının risk puanını belirleyen esas değişkenlerden biri olduğu görülmektedir. Şekil 1'de işletme içi ERD uygulamasından örnek verilmiştir.



Şekil 1. (a) Hareket 1; (b) Hareket 2 (c) Hareket 3 (d) Hareket 4

3. Bulgular

Karşılaştırma çalışması bas üstü aktiviteyi içeren bir montaj işi üzerinde uygulanmıştır. Her iki yöntem de gözlemsel ERD metodudur. Her iki yöntemde de öncesinde kullanıcı eğitimi alınması ve mümkünse iki bağımsız gözlemci tarafından yapılarak puanların karşılaştırılması önerilmektedir. Hem işletme içi ERD metodunda hem de REBA metodunun her ikisinde de değerlendirilen task yüksek ergonomik riskli iş olarak bulunmuştur. REBA metodunda A grubunda 7 puan ve +1 yük puanı toplamı ile toplam 8 puan elde edilmiştir. B puanı 8 puan ve kavrama puanı 0 olarak toplam 8 puan olarak belirlenmiştir. C skoru iki veri tablolarda uygun yerlere konulunca ve +1 aktivite puanı eklenerek toplam REBA skoru 11 puan olarak bulunmuştur. Buna göre bu iş yüksek riskli bir iş olup acil müdahale edilmesi önerilmektedir. İşletme içi ERD: Gövdenin 20 derece ve üstü eğilmesi (Resim a), havalı sıkım el aleti kullanımı

(Resim b), el aleti toplam kullanım süresi ve tekrar sayısı çarpanları ile tablolarda ilgili yerlere yerleştirilerek üst ekstremite puanı (JT): 20, üst ekstremite pozisyon puanı 23 olarak hesaplanmıştır. Alt ekstremite değerlendirmesi belden 20 dereceden fazla eğilme ve dönme hareketi, başparmak ile butona basmak, elleri ile uzanarak eğilme ek ergonomic riskleri nedeniyle SJT puanı 20, SJT pozisyon puanı 28 olarak hesaplanmıştır. İşletme içi metotta 4 puan ayrı ayrı verilmekte ve herhangi bir tanesinin yüksek çıkması durumunda iş yüksek riskli ergonomik iş olarak kabul edilmektedir.

Her iki metodun farklarına bakıldığında: İşletme içi ERD ile işin yapılma süresi ve tekrar sayısı tüm basamaklarda dikkate alınırken REBA yönteminde sadece aktivite faaliyet skoru olarak kısıtlı ve genel bir değerlendirme bulunmaktadır. İşletme içi ERD’de alt kol ve üst kol pozisyonu için 90 dereceyi geçen açılar olarak sınırlı bir değerlendirme varken, REBA yönteminde 6 farklı açısal pozisyonun değerlendirildiği görülmektedir. El bileği değerlendirmesinde REBA yönteminin oldukça sınırlı olarak yapıldığı ve el aleti kullanımını kavrama uygunluğu hariç değerlendirmede ancak işletme içi ERD metodunda el bileği için 10 farklı başlık altında pozisyonlar ve baskı kuvvetlerinin dikkate alındığı, ayrıca el aleti incelemesinde de aletin tipi-ağırlığı-boyutu, tetikleme sayısı ve süresinin değerlendirmeye katıldığı görülmektedir (Tablo 1). İşletme içi ERD metodunda el aleti titreşimi ilave ergonomik risk başlığında objektif değerlerle ayrıca yorumlanmaktadır. REBA metodu titreşimle ilgili yorum yapmamaktadır. Boyun değerlendirmesinde REBA yöntemi öne, arkaya, yanlara esneme ve dönmeye bakılırken, işletme içi ERD metodunda sadece boyun ekstansiyon hareketi değerlendirmeye katılmaktadır. Alt ekstremite değerlendirmesinde her iki yöntemde benzer parametrelerin değerlendirildiği görülmüştür. REBA’da belden yanal esnemeler, belden eğilmelere ilave risk olarak değerlendirilip mevcut puana +1 puan eklenirken işletme içi ERD metodunda yanal eğilmeler ana puan oluşturan kriterden biri olarak değerlendirilmektedir. Üst gövde ve bel değerlendirmesinde REBA metodunun 20° dereceden fazla öne eğilmeleri açılarına göre skorlayarak dikkate aldığı görülmektedir. İşletme içi ERD metodunda da 20° dereceden fazla açıda olan eğilmeler değerlendirilmektedir. Ancak REBA metodu üst ekstremite değerlendirmesindeki benzer şekilde süre ve sıklık değerlendirmesi yapmamaktadır. Yine sık görülen MKİS hastalıklarından lomber disk hernileri risk faktörleri düşünüldüğünde en önemli risk faktörün pozisyonunda geçen süre ve tekrar sayısı olduğu görülmektedir.

Tablo 1. REBA Yöntemi İle İşletme İçi ERD Karşılaştırması

Hareket	REBA	İşletme içi ERD	Yorum
Hareket 1	20° dahil tüm açıları değerlendiriyor.	90°den fazla olanları değerlendiriyor.	Tüm açıları çıplak gözle objektif olarak görmek çok olası değil
Hareket 2	El aleti ile ilgili tutma hariç bir değerlendirme kriteri yok	El aletleri kullanılıyorsa bunun çalışan üzerindeki etkisini gösterir bir analiz içeriyor.	Üretim tesislerinde yapılan çalışmaların bir çoğunda mutlaka el aleti kullanımı bulunuyor.
Hareket 3	Belden öne eğilme pozisyonunda 20°den fazla olan açıları değerlendirilir.	20°den fazla olanları değerlendiriyor.	Toplam olarak bir maruziyet değerlendirmesi var ancak tekrar ve sürenin katkısı yok.
Hareket 4	Sadece el bileğin yanal ve dikey bükülme açıları dikkate alınıyor.	Toplamda 10 farklı el bilek ergonomik kriteri dikkate alınıyor. Eklem açıları ile birlikte baskı kuvvetleri de dikkate alınıyor.	Sadece el bileğin öne ve geriye hareketine bakmak yeterli değildir.

4. Tartışma

REBA metodunun otomotiv sektörü gibi bant üretiminin yoğun olarak yapıldığı işlerde özellikle üst ekstremite değerlendirmesi sırasında kısıtlılıkları olduğu görülmüştür. En önemli farkın REBA yönteminin hareketin sıklığı ve süresini değerlendirmemesidir. KİS hastalıkları için en önemli risk faktörü hareketin tekrar sayısı ve süresi olması nedeniyle özellikle çözüm önerisi getirme noktasında kısıtlı seçenek sunmasıdır.

İşletme içi ERD yüksek risk puanına katkı sunan puanın hangi duruş nedeniyle olduğu spesifiye edilebilirken REBA puanı yalnızca toplam sonuç puanı üzerinden bir yorum bildirmektedir. El bileği değerlendirmesinde REBA’nın oldukça kısıtlı kaldığı ve el aleti kullanımını değerlendirmemesi nedeniyle özellikle montaj gibi işlerin ergonomik analizinde yetersiz kalabileceği düşünülmüştür. Gutiérrez ve arkadaşları REBA yöntemi ile ilgili 2020 yılında yaptıkları çalışmada, REBA’nın sadece bireysel duruşların analizine izin

verdiği, bir dizi veya duruş dizisini analiz etmek mümkün olmadığını belirtmişlerdir. Sadece efor yoğunluğunu ölçen, çalışma günü boyunca maruz kalma süresi ve duruş sıklığı dikkate alınmadığı için yetersiz olabileceğinin altı çizilmiştir (Hita-Gutiérrez, Gómez-Galán, Díaz-Pérez, & Callejón-Ferre, 2020). REBA puanı kolun 20°'den fazla olan hareketleri 4 kategoride değerlendirmektedir. Ancak hareketin açısı dikkate alınırken opozisyonda kalma süresi ve sıklık değerlendirmesi yapılmamaktadır. MKİS patofizyolojisi düşünüldüğünde eklem açısından çok pozisyonda geçirilen süre ve tekrar sayısı esas faktörlerdir. Yine omuz patolojileri açısından literatürde bilinen en riskli açının kolun omuz eklemine 90° derecenin fazla yani baş üstü aktiviteler olduğu iyi bilinmektedir. Omuz sıkışma sendromları ve tendinitler açısından 90° üstü süre, faaliyetin toplam süresi ve tekrar sayısı (repetitive) en önemli belirleyicilerdir. REBA yöntemi bu parametreleri değerlendirmemektedir. El bileği MKİS en sık görülen karpal tünel sendrom hastalığı pozisyonun süresi ve tekrarı en önemli iki parametredir. KTS tekrar sayısı arttıkça, el aleti kullandıkça, maruziyeti oldukça istatistiksel anlamlı oranda artmış risk olduğu bilinmektedir. Buna göre REBA metodu bu parametreleri değerlendirmedikten bu risklerin gözden kaçacağı ve KTS risk faktörü açısından anlamlı iyileşme sağlanamayacağı düşünülmektedir. Tetikleme sayısı risk faktörünün yine sık görülen MKİS tendinitler özellikle baş parmak (de quervain tendiniti) açısından RD prosedürüne önemli bir katkı yaptığı görülmektedir. Felekoğlu ve arkadaşları KİSR'e yönelik ergonomik risk değerlendirmelerde yalnızca bir değerlendirme yönteminin (örneğin REBA, RULA, HMD vb.) uygulanmasında kısıtlılıklar olduğunu bu nedenle reaktif ve proaktif metodların birlikte kullanılması gerektiğini çalışanların da farkındalık faaliyetleri ile desteklenen içeren bütünlük ve sistematik bir programın uygulanmasını önermektedir (Taşan, 2019). ERD metotları içinde de işletmemize en uygun ERD metodunu kullanmak ve işletme içi tecrübeler ile zenginleştirerek "işe özel, taske özel" değerlendirme sistematigi yapmak İSG profesyonellerine gerçeğe en yakın bilgiyi sağlayacaktır. Nitekim işletmeler artık giyilebilir teknolojiler ile eklem açısını ölçebilen ve tekrar sayısını objektif olarak belirleyebilen ERD metotları kullanmaya başlamıştır. Bu konuda halihazırda yayımlanmış ulusal ya da uluslararası bir standart bulunmamaktadır. Akademik çalışmalar ve işletme içi tecrübeler üzerinden giderek zenginleşen bir kütüphane oluştuğu ve ERD sistematiginin farklı bir yere doğru evrildiği ve işe özel, taske özel ve kişiye özel ERD konusunda önemli gelişmeler yaşandığı görülmektedir.

5. Sonuç

ERD amaç taske özel ergonomik risklerin saptanması ve kontrol önlemlerinin geliştirilmesi çalışmalarının mümkün olan en ideale ulaştırılmasıdır. Literatürde henüz sektöre özel ERD metotlarının olmadığı ve kullanılan standart ölççeklerin özellikli tasklarda yetersiz kalabildiği görülmüştür. Son yıllarda giderek daha fazla kullanılan işletme içi ERD metotlarının yapılan işe özel olarak ve o işletmenin İSG hafızasıyla ve tecrübesiyle geliştirilmesi sayesinde sorunların saptanmasında öne çıktığı söylenebilir. Bu metotların literatüre kazandırılması için daha çok veri ile yapılacak ileri dönem çalışmalara ihtiyaç vardır.

Referanslar

- Ayan, B. (2015). *Montaj hattında ergonomik risk unsurlarının incelenmesi: otomotiv sektörüne yönelik bir uygulama*. Ankara: Çalışma ve Sosyal Güvenlik Eğitim Uzmanlığı Tezi.
- Bakanlığı, Ç. v. (2012). İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu.
- Bakanlığı, Ç. v. (2012). İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirme Yönetmeliği.
- Delice, İ. A. (2018). Ergonomik risk değerlendirme yöntemleri ve ahp yöntemi ile çalışma duruşlarının analizi: ağır ve tehlikeli işler için bir uygulama. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*.
- Güven, R. (2012). Dünyada ve ülkemizde meslek hastalıkları. *Hisam Meslek Hastalıkları Çalıştayı*. Ankara.
- Hignett. (2000). Rapid entire body assessment (REBA) . *Applied Ergonomic*.
- Hita-Gutiérrez, M., Gómez-Galán, M., Díaz-Pérez, M., & Callejón-Ferre, Á.-J. (2020, 17). An Overview of REBA Method Applications in the World . *Int. J. Environ. Res. Public Health*.
- HSE. (2021). *Work-related musculoskeletal disorders statistics in Great Britain, 2021*.
- ILO. (2013). *ILO International Safety and Health Conference 2013*.
http://www.ilo.org/safework/events/conferences/WCMS_223173 adresinden alındı
- Kahya E, S. S. (2019). Jant Sektöründe QEC ve REBA Yöntemleriyle Ergonomik Risk Değerlendirmesi. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*.
- Kırcı. (2018). Lojistik Depo Sektöründe REBA, RULA ve NIOSH Yöntemleri ile Ergonomi Alanında Bir İrdeleme. *Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü*.

- Mert, E. A. (2014). *Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması ve Bir Çanta İmalat Atölyesinde Uygulanması*. İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi.
- Özmehmet Taşan, S. ., (2019, 21). Otomotiv sektöründe bütünleşik ergonomik risk değerlendirme uygulaması. *alıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, s. 378-396.
- Taşan, Ö. &. (2019). Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. *Otomotiv sektöründe bütünleşik ergonomik risk değerlendirme uygulaması*.



Sosyo-Mekânsal Ayrımcılık: Dışlayıcı Mimarlık-Örtük Yaşçılık İlişkisi

Socio-Spatial Discrimination: The Relationship of Exclusionary Architecture-Implicit Ageism

Damla Altuncu^{1*}

¹Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İç Mimarlık Bölümü, 34427, İstanbul, Türkiye

Başvuru/Received: 08/11/2022

Kabul / Accepted: 21/01/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Bir ayrımcılık türü olarak yaşçılık, 21. yy'da kamusal mekanların tasarımında etkili olan neo-liberal politikalara bağlı olarak yaygınlaşan 'dışlayıcı mimarlık' yaklaşımıyla ilişkili sosyo-mekânsal bir sorundur. Bu bakımdan çalışma, kamusal mekânda ergonomik ilkeler özelinde sosyo-mekânsal ayrımcılık anlayışını, dışlayıcı mimarlık ve örtük yaşçılık ekseninde güncel kamusal mimari mekân organizasyonları üzerinden tartışmaktadır. Araştırmanın hipotezi, kamusal alanda dışlayıcı mimarlık uygulamalarının evsizler gibi norm dışı aktörler yanında, yaş almış bireyler için de bir ayrımcılık sorunu olduğudur. Araştırmanın kapsamı, farklı dijital veri tabanları üzerinden elde edilen çeşitli kamusal alanlara ait mekân ve mobilya görselleriyle sınırlandırılmıştır. Sosyo-kültürel ve ekonomik özellikler kapsam dışında bırakılmıştır. Çalışmada araştırma yöntemi olarak, mevcut durumun gözden geçirilmesi için nicel araştırma yöntemlerinden tarama modeli tercih edilmiştir. Betimleyici çalışmanın araştırma evrenini oluşturmak için tercih edilen genel tarama modelinde iki aşamalı metodoloji uygulanmıştır. Birinci aşamada konuya ilişkin kavramlara ait tanımlamalar netleştirilmiştir. İkinci aşamada ise mevcut kamusal mekân ve mobilya uygulamalarına ait görseller, teorik altyapıya uygun biçimde içerik analizi yöntemiyle değerlendirilmiştir. Sonuç olarak; kamusal alanda dışlayıcı mimarlık uygulamalarının henüz sınırlı olduğu ancak uygulamaların yaygınlaşma potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

Ergonomi, Kamusal Mekân, Mekân Sosyolojisi, Dışlayıcı Mimarlık, Ayrımcılık, Mekân Tasarımı

Abstract

Ageism as a type of discrimination which is a socio-spatial problem related to the 'exclusionary architecture' approach, has become widespread due to the neo-liberal policies that are effective in the design of public spaces in the 21st century. In this respect, the study discusses the understanding of socio-spatial discrimination in public space, in particular ergonomic principles, on the axis of exclusionary architecture and implicit ageism, through contemporary public architectural space organizations. The hypothesis of the research is that exclusionary architectural practices in the public sphere are a discrimination problem for older persons, as well as non-normative actors such as the homeless. The scope of the research is limited to the space and furniture images of various public spaces obtained from different digital databases. Socio-cultural and economic features are excluded from the scope. In the study as a research method, the survey model -which is one of the quantitative research methods- was preferred to review the current situation. To create the research universe of the descriptive study, a two-stage methodology was applied in the preferred general survey model. In the first stage, the definitions of the concepts inherent in the subject were clarified. In the second stage, the visuals of the existing public space and furniture applications were evaluated by content analysis method in accordance with the theoretical infrastructure. As a result, it has been determined that exclusionary architectural practices in the public sphere are still limited, but the practices have the potential to become widespread.

Key Words

Ergonomics, Public Space, Sociology of Space, Exclusionary Architecture, Discrimination, Interior Design

1. Giriş

Birleşmiş Milletler (BM) İnsan Hakları Evrensel Bildirgesi'nin (İHEB-1948) birinci maddesinde, "Bütün insanlar özgür, onur ve haklar bakımından eşit doğarlar" ilkesi yer almaktadır. Bu ifadeye göre 'eşitlik' tüm insanların doğuştan sahip olması gereken temel bir haktır. Bildirgenin ikinci maddesinde ise "Herkes ırk, renk, cinsiyet, dil, din, siyasi ya da başka türden kanaat, ulusal ya da toplumsal köken, mülkiyet, doğuş veya başka türden statü gibi herhangi bir ayırım gözetilmeksizin, bu Bildirgede belirtilen bütün hak ve özgürlüklere sahiptir" ifadesiyle herkesin eşit muamele görmeye hakkı olduğu belirtilirken, ayrımcılık konusuna vurgu yapılmaktadır (BM, 2022). Bu ifadede açık bir ayrımcılık tanımı yer almamasına rağmen, ayrımcı muamelenin kimlere yapılamayacağı ifade edilmiştir (Yıldırım, 2021, s. 321-346).

Etnik köken, ırk, cinsiyet, cinsel yönelim, din, dil, felsefi-siyasi görüş, medeni durum, sınıf, sağlık durumu, yaş gibi doğuştan gelen ve sonradan edinilen özellikler, tüm insanlarda farklı kombinasyonlarda mevcut olabilir. Bu farklılık durumu özelinde, tüm bireylerin politika ve yasalar önünde eşit olması ve buna uygun muamele görmesi gerekliliğine rağmen, bir grubun diğer bir gruptan ayrılarak 'farklı' kabul edilmesi ve/veya ayrıcalıklı muamele görmesine 'ayrımcılık' denilmektedir. Uluslararası Af Örgütü'nün açıklamasına göre; "Ayrımcılık; politika, yasa veya muamele bakımından haksız bir ayırım nedeniyle, kişinin insan haklarından ve diğer yasal haklarından, başkalarıyla eşit bir biçimde faydalanmadığı durumlarda ortaya çıkar" (Uluslararası Af Örgütü, 2022). Bu bağlamda ayrımcılık; doğrudan, dolaylı ya da kesişimsel olarak ortaya çıkabilir. (Korkut, 2009, s. 54-56) Ayrımcılık türleri içinde en belirgin olan doğrudan ayrımcılık, Avrupa İnsan Hakları Sözleşmesi (1953), Avrupa Sosyal Şartı (1965) ve Gözden Geçirilmiş Avrupa Sosyal Şartı (1996), AB direktifleri gibi uluslararası sözleşmelerde de tanımlanmıştır (Kaya P. A., 2007, s. 67). Türkiye'de ise Türkiye İnsan Hakları ve Eşitlik Kurumu Kanunu (6701) kapsamında ayrımcılık türleri; "ayrı tutma, ayrımcılık talimatı verme ve bu talimatları uygulama, çoklu ayrımcılık, doğrudan ayrımcılık, dolaylı ayrımcılık, işyerinde yıldırma, makul düzenleme yapmama, taciz, varsayılan temele dayalı ayrımcılık" olarak çeşitlendirilmiştir (T.C. Cumhurbaşkanlığı, 2016). "Görünüşte ayrımcı olmayan her türlü eylem, işlem ve uygulamalar sonucunda, hukuken tanınmış hak ve hürriyetlerden yararlanma bakımından nesnel olarak haklılaştırılmayan dezavantajlı bir konuma sokulması durumunda, dolaylı ayrımcılıktan söz edilir" (Türkiye İnsan Hakları ve Eşitlik Kurumu, 2021) bu tanımdan da anlaşıldığı gibi ayrımcılığı oluşturan 'dezavantajlı konum' net olarak tanımlanmamıştır. Bu nedenle ayrımcılık türleri arasında en zor fark edileni dolaylı ayrımcılıktır denilebilir.

Doğrudan ayrımcılıkta eşitlikçi olmayan uygulamalar kanunlarla yasaklanırken, dolaylı ayrımcılıkta ise uygulamaların ayrımcı, dışlayıcı, kısıtlayıcı etkileri yasaklanmaktadır. Dolayısıyla ortada biçimsel olarak eşitlikçi bir uygulamaya bağlı görünür bir ayrıştırma yokken, doğuştan gelen ya da sonradan edinilen farklılıkların toplumsal etkileri, sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Dolaylı ayrımcılık çalışmaları genellikle; etnik köken, ırk, cinsiyet, cinsel yönelim, toplumsal cinsiyet vb. gibi konularda yoğunlaşırken; araştırmaların doğal olarak değişen sağlık durumu ve yaş gibi konularda daha nadir olduğu görülmüştür. Halbuki cinsiyetçilik, ırkçılık gibi yaş ayrımcılığı (Ageism) ya da yaşçılık da dolaylı ayrımcılık biçimidir. Bu ayrımcılık biçimini diğerlerinden ayıran en önemli özellik; cinsiyeti ve/veya etnik kökeni ne olursa olsun toplumsal yapıyı oluşturan tüm bireylerin yaşamlarında yaşa bağlı ayrımcılığa maruz kalma ihtimalidir. Çünkü toplumsal yapıyı oluşturan bireyler için fiziksel yeterliliğin üst seviyede olması, zaman içinde yitirilen bir durumdur. Bu bağlamda herkes, yaşamının belirli dönemlerinde çeşitli biçimlerde kısıtlamalara maruz kalmaktadır.

Çoğunlukla ileri yaşlarda görünür hale gelen yaş ayrımcılığı (Ageism), 21.yy'da kamusal mekanların tasarımında etkili olan neo-liberal politikalara bağlı olarak yaygınlaşan 'dışlayıcı mimarlık' anlayışı ile ilişkili sosyo-mekânsal bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. "Dışlayıcı mimari" (exclusionary architecture), 'hasmane mimari' (hostile architecture), 'korumaya yönelik kentsel mimari' (defensive urban architecture), 'çevresel tasarımla suçun önlenmesi' (Crime Prevention Through Environmental Design (CPTED)) ve 'disiplinci mimari' (disciplinary architecture) gibi kavramsallaştırmalarla anılan bu pratik, temelde kentsel ve dolayısıyla kamusal alanı mimari ve tasarım yoluyla denetlemek; yalnızca bu alana erişimi kısıtlamak değil, aynı zamanda alanın kullanım biçimlerini de şekillendirmek ve alandaki tutumları yönlendirmek gibi amaçlar taşımaktadır" (Özmaç & Yıldırım, 2020, s. 775-789). Sosyo-mekânsal bir ayrımcılık türü olarak ortaya çıkan bu ayrımcılık sorunun giderilmesi için, 'yaşçılık' kavramının evsizler gibi norm dışı toplumsal aktörlerin kısıtlanmasına yönelik olarak geliştirilen dışlayıcı mimarlık yaklaşımındaki yerinin araştırılması gerekmektedir. Bu bakımdan çalışma, kamusal mekânda ergonomik ilkeler özelinde sosyo-mekânsal ayrımcılık anlayışını, dışlayıcı mimarlık ve yaşçılık (ageism) ekseninde güncel kamusal mekân organizasyonları üzerinden tartışmaktadır.

Araştırmanın hipotezi, 'kamusal alanda dışlayıcı mimarlık uygulamalarının evsizler gibi norm dışı aktörler yanında, yaş almış bireyler için de toplumsal bir ayrımcılık sorunu' olduğudur. Literatürde dışlayıcı mimarlık uygulamaları; genellikle evsizler özelinde incelenmiş, dışlayıcı mimarlık ve yaşçılık kavramları karşılaştırmalı olarak yeterince araştırılmamıştır. Bu bakımdan çalışma; güncel kamusal mimari uygulamaların ergonomik boyutuna ve sosyo-mekânsal ayrımcılığa dikkati çekmek, mevcut uygulamaları sistematik biçimde incelemek, kamusal mekânı ergonomik ilkeler-sosyolojik yapı ile ilişkilendirmek bakımından öncül betimleyici bir araştırmadır. Çalışmanın amacı, dışlayıcı mimarlık kavramını yaşçılık konusunu da kapsayacak biçimde, mevcut mimari uygulamalardan yararlanarak genişletmektir. Bu nedenle araştırmanın kapsamı, farklı dijital veri tabanları üzerinden elde edilen çeşitli kamusal alanlara ait kamusal mekân ve mobilya görselleriyle sınırlandırılmıştır. Elde edilen görsellerin elde edildiği ülkelerin, sosyo-kültürel ve ekonomik farklılıkları kapsam dışında bırakılmıştır.

Çalışmada iki aşamalı bir metodoloji uygulanmıştır. Birinci aşamada mevcut araştırmalar incelenerek konuya ilişkin kavramlara ait tanımlamalar mevcut literatürde yer alan kaynaklar referans alınarak netleştirilmiştir. İkinci aşamada ise güncel kamusal mekân ve mobilya uygulamalarına ait görseller, teorik altyapıya uygun biçimde içerik analizi yöntemiyle değerlendirilmiştir.

2. Kaynak Araştırması

Kentsel mekân, bireylerin toplumsal etkileşim içinde olduğu, ortak yaşam alanlarını deneyimlediği bir araya gelme mekanlardır. Toplum yararı gözetilerek söylem ve eylemlerin üretilmesine olanak tanıyan bu mekanlar, kişisel mekanlardan farklı olarak ‘herkes tarafından’ erişilebilir, kullanılabilir, deneyimlenebilir olmalıdır (Özbek, 2015, s. 36-45). Mimarlığın temelinde yer alan ‘kapsayıcılık’ anlayışına paralel olarak gelişen bu düşünce, ‘evrensel tasarım’ (universal design) yaklaşımının oluşmasına neden olmuştur. Kapsayıcı tasarım (inclusive design), yaşam boyu tasarım (lifespan design), herkes için tasarım (design for all) gibi kavramlarla paralel gelişim gösteren bu tasarım yaklaşımı; erişilebilirlik, kullanılabilirlik, esneklik, güvenlik, pratiklik vb. gibi değerlendirme ölçütlerine sahiptir. II. Dünya Savaşı sonrasında değişen toplumsal yapı dahilinde, fiziksel engele sahip bireylerin özelliikle ulaşım olanaklarına erişimine odaklanan engelli bireyleri odak noktasına yerleştiren tasarım anlayışı, zaman içinde değişime uğramıştır. Toplumsal entegrasyonu amaçlayan uygulamalar sonucunda kavram, 1970’lerde ‘ulaşılabilir tasarım’ (accessible design) olarak ifade edilmeye başlanmıştır. “Günümüz anlayışıyla evrensel tasarım; tüm ürünlerin ve çevrelerin yaş, beceri ve durum farkı gözetmeksizin pek çok kişi tarafından kullanılabilmesini olanaklı kılan, bütünselleşme sağlayan bir tasarım yaklaşımı olarak tanımlanmaktadır” (Dostoğlu, Şahin, & Yavuz, 2009, s. 23-32).

1991 yılında Mace, Hardie ve Place tarafından “olabildiğince geniş bir kitleye hitap eden ve herkes tarafından kullanılabilen uyum ve özellikli tasarım gerektirmeyen ürünlerin ve çevrenin tasarımı” olarak tanımlanan evrensel tasarım, özünde toplumsal olarak idealize edilmiş stereotip makbul vatandaşların, ‘tasarlanmış kusursuz yaşantısı’ için üretilmiş bir ütopyanın fiziksel olarak somutlaştırılması hedefine yönelik olarak kavramın tanımı oldukça geniş tutulmuştur (Mace, Hardie, & Place, 1991, s. 47-49). Ancak, siyasi otoritenin ve toplumsal aktörlerin idealize ettiği fiziksel mekânın kapsayıcı özellikleri, zaman içinde erozyona uğramış, uygulama sahasında güvenlik, mülkiyet hakları gibi beklenmedik sorunlarla karşılaşmış ve yeni mimari tasarım stratejileri geliştirilmiştir. Bu durumun oluşmasında, kentsel mekânda kapsayıcılık ilkesiyle bir araya gelen heterojen toplulukların toplumsallaşmasına bağlı olarak artan güvenlik ihtiyacı, öncelikle toplumsal yönlendirme ve disipline etme davranışları için çeşitli mimari uygulamaların gelişmesine neden olmuştur. Bu bağlamda kapsayıcı tasarım anlayışında karşılaşılan güvenlik sorununa çözüm olarak geliştirilen dışlayıcı mimarlık anlayışı 21.yy’da giderek yaygınlaşmıştır. Konu hakkında Jane Jacobs, ‘Büyük Amerikan Şehirlerinin Yaşamı ve Ölümü’ kitabında başarılı bir kentsel tasarımın temel niteliğinin, ‘insanın sokakta yabancılar arasında yürürken kendini güvende hissetmesi’ olarak tanımlamıştır (Jacobs, 2011). Bu tanıma bağlı olarak emniyet ihtiyacını gidermek için öncelikle güvenliğin ne olduğunun sorgulanması gerekirken, daha çok nasıl sağlanabileceği tartışılmıştır. Konu hakkında Foucault’nun önerisi ise kentsel mekanlardaki sermaye ve insan topluluklarının sürekli denetim ve disiplin altında tutularak stratejik olarak yönetilmesidir (Foucault, 1995, s. 157). Bu bağlamda kentsel alanda denetim, gözetim araçlarıyla sağlanırken; disiplin ise zorlayıcı önlemler almaya gerek kalmadan dışlayıcı mimarlık uygulamalarıyla dolaylı yoldan sağlanabilmiştir. Bu durum toplumun güvenlik ihtiyacını giderirken, siyasal erkin de güvenlik ihtiyacının ortaya çıkmasının altında yatan nedenler üzerindeki sorumluluklarından kurtulmasını sağlamaktadır. Güvenliğin neden var olmadığını sorgulamak yerine güvenliği tehlikeye düşüren nedenlerle baş etmeye öncelik veren bu strateji, toplumsal olarak madun ve failer üzerinden uygulandığı için ayrımcılığı merkeze yerleştirmektedir. Doğrudan anlaşılamayan bu tür bir ayrımcılığın tartışılması ise oldukça yeni bir düşünce alanını araştırmacılara açmaktadır.

Doğrudan ayrımcılık (direct discrimination) çeşitli yasalarla engellenirken, dolaylı ayrımcılık ise (indirect discrimination) özel şartlara bağlı olarak gelişen haklı gerekçelerin varlığı dahilinde değerlendirilmektedir. Farklı muameledeki meşru amaç ve orantılılık düzeyi bu bağlamda belirleyici ölçütler olarak karşımıza çıkmaktadır (Ovey & White, 2006, s. 419). Doğrudan ayrımcılık uygulamalarındaki amaçlar, net olarak anlaşılırken, dolaylı ayrımcılıkta ise ‘örtük’ bir yaklaşım söz konusudur. Burada ifade edilen örtük kelimesi, gizli anlamını taşımamaktadır. Bu farklılık, örtük olarak ortaya çıkan dolaylı ayrımcılıkta belirli bir toplumsal gruba kasten diğer gruplardan ayırmak gibi negatif bir amacın varlığını net olarak ispatlanamamaktadır. Bu bağlamda meşru amaç ve orantılılık ilkelerinin sosyal politika ile ilişkili olduğu söylenebilir.

Farklı etkiden kaynaklanan ayrımcılık (disparate impact) olarak da adlandırılan ve yoruma dayalı olarak gelişen örtük ayrımcılık (covert/subtle discrimination) konusunun yasal düzenlemelerden farklı olarak sosyal politika bağlamında tanımlanması gerekmektedir. Bu değerlendirmede belirleyici olan özellik, kasıt unsurudur. Belirli bir gruba karşı, grubun temelindeki belirleyici özelliğiyle bağlantılı farklı bir tutumun ya da davranışın, açıkça gözlemlenebildiği bir ayrımcılık biçimi olmayan örtük ayrımcılıkta, tarafsızlık ya da ahlaken kabul edilebilir açık bir gerekçe bulunmamaktadır. Bu bakımdan örtük ayrımcılığın, kasıtlı olduğu ispat edilemese de bir grubu diğerine göre üstün kılmak için bilinçaltında gömülü amaçların ürünü olduğu söylenebilir.

Dolaylı ayrımcılığın tezahür biçimlerinin belirlenmesinde, dolaylı ayrımcılığın meşru bir düzenleme, tedbir ya da uygulama dolayısıyla da ortaya çıkabilme olanakları gözetilmiştir. Bu nedenle ilgili, düzenleme, tedbir ya da uygulamaların dezavantaj yarattığı grupların özellikleri, makul uyumlaştırma ilkesi dahilinde entegrasyon için biçimsel olarak tanımlanmışlardır. Buna göre yaş da cinsiyet ve ırk gibi dolaylı ayrımcılıkta belirleyici biçimsel özelliklerden biridir. Yaşa dayalı ayrımcılık her yaşta görülebilirken, yaşlı ayrımcılığı/yaşçılık ise ileri yaşlarda ortaya çıkmaktadır.

Bu bağlamda dolaylı ayrımcılık biçimlerinden biri olan örtük yaşçılık (implicit ageism) bireylerin farkında olmadan yaşa ve/veya yaşlılığa dair içselleştirdikleri birtakım önyargı ve stereotiplere dayanan ayrımcılığını ifade etmektedir.

Yaşlı ayrımcılığı (ageism) kavramı ilk olarak Robert Butler tarafından 1969 yılında ‘bir yaş grubunun diğer yaş gruplarına önyargısı’ olarak tanımlanmıştır. Sistematik stereotipleme ve ayrımcılık sürecinin özellikle yaş özelliği temel alınarak yapıldığı ayrımcılık biçimi, ırkçılık ve cinsiyetçilikten sonra gelen üçüncü büyük ayrımcılık biçimidir (Palmore, 1999, s. 6).

21.yy’da gelişen neo-liberal politikalar dahilinde iş gücüne katılmayan/katılmayan yaşlılar, toplumsal bir yük olarak görülmüşlerdir. Yaşlılara dair negatif tutumlara ve ayrımcı davranışlara kaynaklık eden kalıp yargılar, sistematik stereotipleme ile kurgulanmış baskın grupların ilgilerine gerekçe oluşturan düşünce ve inançlar seti olarak açıklanabilir. Bu bakımdan temelde siyasal erkin sistematik stereotiplemesine bağlı olarak ayrımcılığın meşrulaştırıp sürdürüldüğü söylenebilir. Bu bakımdan ideolojik bir yönü olduğu da görülen örtük yaşçılık konusu; yasal düzenlemeler, kamusal alandaki hareketlilik, hizmetlere erişim olanakları, sosyal yaşamdaki ilişkiler, medyadaki temsiller üzerinden sistematik olarak ayrımcı uygulamalar dahilinde incelenebilmektedir. Münferit olarak gerçekleştirilen çalışmaların çok boyutlu olarak yeniden ele alınması, alışlagelmiş uygulamaların yeniden değerlendirilmesi bakımından önemlidir. Bu bağlamda çalışmanın amacı, dışlayıcı mimarlık kavramını yaşçılık (ageism) konusunu da kapsayacak biçimde, mevcut mimari uygulamalardan yararlanarak genişletmektir. Bu bakımdan çalışma; güncel kamusal mimari uygulamaların ergonomik boyutuna ve sosyo-mekânsal ayrımcılığa dikkati çekmek, mevcut uygulamaları sistematik biçimde incelemek, kamusal mekânı ergonomik ilkeler-sosyolojik yapı ile ilişkilendirmek bakımından öncül betimleyici bir araştırmadır.

3. Materyal ve Yöntem

Araştırma materyali olarak farklı dijital veri tabanları üzerinden elde edilen çeşitli kamusal alanlara ait kamusal mekân ve mobilya görselleri kullanılmıştır. Sosyo-kültürel ve ekonomik farklılıklar kapsam dışında bırakılmıştır. Çalışmada araştırma yöntemi olarak mevcut durumun gözden geçirilmesi için nicel araştırma yöntemlerinden tarama modeli tercih edilmiştir. Betimleyici çalışmanın araştırma evrenini oluşturmak için tercih edilen genel tarama modeli, sistematik derleme sonucunda genellenebilir bir yargıya varmak bakımından çalışma için uygun görülmüştür.

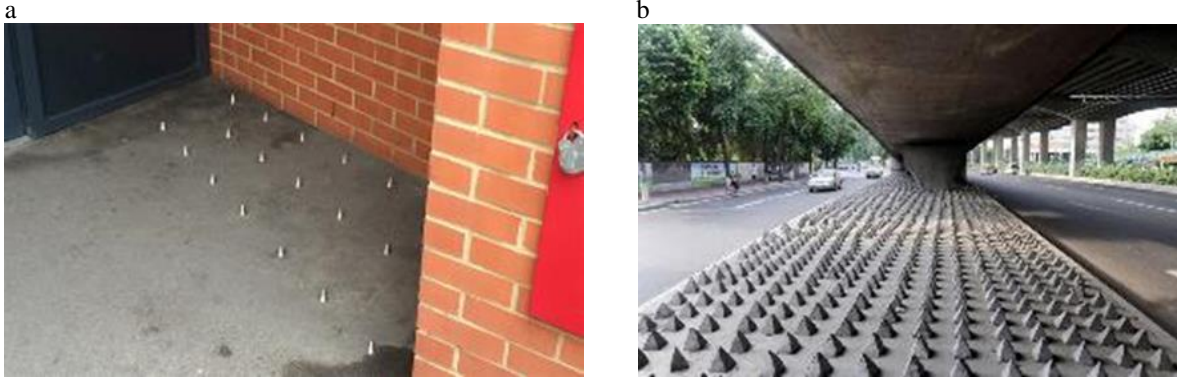
Çalışmada, belge olarak kabul edilen görsellere ulaşma, görsellerin özgünlüğünün kontrol edilmesi ve verilerin analiz edilmesi aşamaları izlenmiştir. Dokümanlara ulaşma aşamasında, veri kaynaklarına tümevarım yöntemi dahilinde ulaşılmaya çalışılmıştır. Dijital veri tabanlarında yer alan görsellere ait medya setleri, internet arama motorlarının görsel arama bölümüne, ‘ergonomi, kamusal mekân, mekân sosyolojisi, dışlayıcı mimarlık, ayrımcılık’ gibi anahtar kelimelerin Türkçe ve İngilizce dillerinde yazılmasıyla aranmıştır.

4. Bulgular ve Değerlendirme

Yapılan araştırma sonucunda elde edilen görsellere ait gözlemsel sonuçlar, teorik altyapıya uygun biçimde içerik analizi yöntemiyle değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda dışlayıcı mimari’ (exclusionary architecture), ‘hasmane mimari’ (hostile architecture), ‘korumaya yönelik kentsel mimari’ (defensive urban architecture), ‘çevresel tasarımla suçun önlenmesi’ (crime prevention through environmental design-CPTED) ve ‘disiplinci mimari’ (disciplinary architecture) olarak nitelendirilebilecek uygulamaların kapitalistleşmiş toplumlarda yaygın olarak kentsel mimari mekânında uygulandığı anlaşılmıştır. Dışlayıcı mimari mekân düzenlemelerinin, ülkelerin politik tutumlarına göre farklılık gösterirken; temelde ırk, etnik köken gibi farklılıklara göre şekillendirildiği söylenebilir. Bu bağlamda yaş ve cinsiyet ayrımcılığının kentsel mimari mekân ve mobilya tasarımlarında ilk bakışta fark edilmediği söylenebilir. Bununla birlikte, çeşitli nedenlerle kasti amaçlarla geliştirilen orantısız uygulamaların kapitalist ülkelerde yaygınlaşmaya devam ettiği de unutulmamalıdır. Paris, Londra, New York gibi metropollerde kapsayıcı mimari uygulamaların aksine dışlayıcı mimarlık uygulamalarının mültecilerin ve evsizlerin meydana getirdiği problemlere karşı bir önlem olarak kullanıldığı söylenebilir. Örneklerden de anlaşılacağı üzere mimari uygulamalar, siyasi erkin izlediği politikalara göre çeşitlenerek farklılaşmaktadır. (Bkz: Şekil 1, Şekil 2).



Şekil 1. Paris’te mülteci ve evsizlerin kamusal alanları işgalini engellemek için yerleştirilen taşlar (Yeni Şafak, 2022)



Şekil 2. (a) Londra’da mültecilerin/evsizlerin engellenmesi için yerleştirilen çıkıntılar (Buckle, 2014)
(b) New York’ta mültecilerin/evsizlerin engellenmesi için yerleştirilen çıkıntılar (Buckle, 2014)

Mülteciler ve/veya evsizlerle ilgili nispeten daha az sorunu olan ülkelerde de benzer uygulamalar görülmektedir. Bu durum dışlayıcı mimarlık uygulamalarının arka planında, kapitalist düzene uyum sağlayamayan yaş almış bireylerin kentsel yaşamdan uzaklaştırılması anlayışının yaygınlaştığı düşündürmektedir. Örneğin, Kanada Vancouver’da da benzer uygulamaları görülmesi, ırk ve cinsiyetin ötesinde farklı ancak etkili bir ayrımcılık biçimiyle karşı karşıya olduğumuzu göstermektedir (Bkz: Şekil 3).



Şekil 3. Vancouver’da oturmaya engellemek için yerleştirilen çıkıntılar (Mussett, 2019)

Tutunmak, oturmak gibi eylemlere, yaş almış bireylerin daha fazla ihtiyaç duyduğu söylenebilir. Yaş ilerledikçe gelişen sağlık sorunlarına paralel olarak fiziksel aktivitenin kısıtlanması, yaşlı bireylerin -engellilerle benzer biçimlerde- kentsel mimari mekânda desteklenmesini gerektirmektedir. Kentsel mekanların yaşlıların kullanımına uygun olarak yeniden düşünülmesi, Yaşlı Dostu Şehirler ve Topluluklar (Age-Friendly Cities and Communities (AFCC)) oluşumu dahilinde gelişmekte olan bir anlayıştır. Dünya Sağlık Örgütü’nün uygulamaları dahilinde ‘aktif yaşlanma’ olarak tanımlanan ileri yaştaki bireylerin toplumsal hayata katılmasına dair uygulamalar, ülkelerin sosyal politika stratejileri dahilinde oldukça detaylı olarak tanımlanmasına rağmen mimari mekân uygulama örneklerinde yeterli düzeye ulaşamadıkları anlaşılmaktadır. Bu bağlamda, teorik olarak mimari mekâna yerleştirilmesi gerektiği düşünülen mekân ve mobilya örneklerinin, tekrar düşünülerek detaylı olarak çalışılması gerekmektedir. Görsellerden de anlaşılacağı üzere, dışlayıcı mimarlık uygulamaları ‘kötü tasarım’ olarak kabul edilebilir nitelikler taşımaktadırlar (Bkz: Şekil 4, şekil 5). Ancak bu örnekleri sadece kötü tasarım olarak nitelendirmek, tasarım anlayışının altında yatan düşüncenin görmezden gelinmesine neden olacaktır.



Şekil 4. New York’ta çiçeklik kenarlarına oturmanın engellenmesi (New York Times, 2019)



Şekil 5. (a) New York'ta tutunmayı engelleyen korkuluklar (New York Times, 2019)
(b) New York'ta metrosunda oturma'nın engellenmesi (Ruetas, 2022)

Araştırma sırasında bulunan pek çok örnekte, mimari uygulamaların yaşlıların fiziksel yetersizliğini arttırmanın yanında sosyalleşmelerini de engelledikleri görülmüştür. Bu bakımdan yaşlı bireylerin sosyalleşme mekanları olarak kabul edilebilecek olan kamusal alanlarda fiziksel çevrenin yaşlılara uygun olarak düzenlenmemesi sonucunda sosyal gereksinimlerin de karşılanmadığı anlaşılmıştır (Bkz: Şekil 6). Bu durum, yaşlı bireylerin kendi konfor alanları içine hapsolmalarına neden olmaktadır.



Şekil 6. (a) Japonya'da oturmaya elverişli olmayan banklar (Ruetas, 2022)
(b) New York'ta sosyalleşmeye elverişli olmayan banklar (Sociology, 2017)

Dışlayıcı mimarlık örneklerinin kötü tasarım uygulamalarıyla birbirine karıştırılabildiği açıkça görülebilmektedir. Bu bakımdan konu hakkında net bir karar verebilmek için kamusal alan araştırmacısı olan Cara Chellew tarafından 'Hayalet olanaklar (ghost amenities)' terimi türetilmiştir (Torontoist, 2018). Bu bağlamda kamusal alandan beklenen özelliklerin yokluğunu tanımlamak için kullanılan bu terim, dışlayıcı mimarlığın sadece evsiz ve/veya mültecilere yönelik olmadığını da kanıtlar niteliktedir. Chellew, maliyetleri-bakımı azaltmak ve vandalizmi kontrol etmek için yapılan bu uygulamadan, savunmasız birçok insanı da orantısız bir şekilde etkilediğini söylemiştir. Oturup dinlenecek bankların, gölge ve barınak sunan alanların, umumi tuvaletlerin, kentsel mekânda var olmaması ya da herkesin kullanımı bakımından elverişsiz olması, insan merkezli olması beklenen kamusal alanlarda beklenmeyen bir mimari uygulamadır. Aşağıdaki örnekten de anlaşıldığı üzere, belirli bir gruba ayrımcılık uygulamak üzere gerçekleştirilen bir tasarım, kullanıcıların büyük çoğunluğunu etkileyerek tasarımı, pek çok kullanıcı için kullanılamaz hale getirmektedir.



Şekil 7. Kontrolsüz giriş-çıkışı engelleyen bariyerler (Buckle, 2014)

Bu tür, kullanıcı bakımından elverişsiz mimari uygulamaların yaygınlaşması ve kilitli bank örneğinde olduğu gibi kabul edilemez bir düzeye gelmesi üzerine (Bkz: Şekil 7), 2008'de Alman heykeltıraş Fabian Brunsing, ticarileştirilmiş kamusal alanlara karşı bir sanatsal protesto biçimi olarak The Pay & Sit bankını tasarlamıştır (Brunsing, 2014). İronik bir biçimde para atıldığında küçük çıkıntıların içeri girmesiyle birlikte 'belirli bir süre' oturmaya izin veren bank tasarımı, gelecekte dışlayıcı mimarlık örneklerinin kapitalist düzen ve neo-liberal politikalar dahilinde uç örneklerini görebileceğimize dair bir uyarı niteliği taşımaktadır. (Bkz: Şekil 8)



Şekil 8. The Pay & Sit (Öde ve Otur) Bankı (Brunsing, 2014)

5. Sonuçlar ve Tartışma (Result and Discussion)

Çalışmada, uygulanan iki aşamalı metodoloji, birinci aşamada konuya içkin kavramlara ait tanımlamaların netleştirilmesini sağlamıştır. Konu, hakkında türetilen terimler arasında az da olsa farklılıkların olduğu anlaşılmıştır. Bu farklılar, dışlayıcı mimarlık konusunu hangi disiplin özelinde tartıştığımızı belirtmeyi gerektirmiştir. Bu bakımdan dışlayıcı mimarlık ve örtük yaşçılık ilişkisinin birbirine içkin kavramlar olduğu anlaşılmıştır. Konuyu tartıştığımız mimarlık ve sosyoloji disiplinleri özelinde, dışlayıcı mimarlık ve örtük yaşçılık kavramlarının diğer kavramlardan öne çıktığı söylenebilir.

İkinci aşamada mevcut kamusal mekân ve mobilya uygulamalarına ait görseller, teorik altyapıya uygun biçimde içerik analizi yöntemiyle değerlendirilmiştir. Yapılan içerik analizi sonucunda elde edilen görseller, dışlayıcı mimarlık-örtük yaşçılık ilişkisinin kamusal alanın kontrol altında tutulmasının istendiği kapitalistleşmiş toplumlarda daha uç düzeyde mimari örnekler verdiği anlaşılmıştır. Her ne kadar mimarlık disiplini kapsayıcılığı önerse de uygulama sahasında, kapsayıcı niteliği olan örnekler, oldukça az sayıdadır. Bu durumda, tasarım disiplinlerinin insan merkezli anlayışından uzaklaşarak, insansız tasarım-insan sonrası tasarım gibi yeni yaklaşımların gelişmekte olduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, tasarımcıların insan-merkezli tasarım anlayışına geri dönmeleri gerektiği konusunda bir uyarı niteliği taşımaktadır. Bununla birlikte dışlayıcı mimarlığı sadece ırkçılık/evsizlik gibi bir ayrımcılık sorunu olmadığı ancak önem derecesi olarak geri planda kaldığı söylenebilir.

Sonuç olarak elde edilen bulgular doğrultusunda, kamusal alanda dışlayıcı mimarlık uygulamalarının sınırlı olmakla birlikte uygulamaların yaygınlaşma potansiyeline sahip oldukları belirlenmiştir. Konu ile ilgili gelecek araştırmaların metodolojik ve teorik bakımdan geliştirilerek, literatürün zenginleştirilmesi gerektiği söylenebilir. Bununla birlikte artan yaşlı nüfusunun gelecek yıllarda aktif yaşlanma politikalarıyla daha fazla toplumsallaşmasını sağlamak için yaşçılık kavramının, ergonomi/mimari ve sosyolojik boyutlarının yanında sosyo-kültürel özellikler bakımından da incelenmesi gerektiği anlaşılmıştır. Dışlayıcı mimarlık türleri ve ayrımcılık konularına mimari tasarım ve sosyoloji gibi ilgili disiplinlerin perspektifinden bakmak, doğru bildiğimiz yanlışları da yeniden sorgulamamızı sağlayacaktır.

Referanslar

- Ataöv, T. (1996). *Çatışmaların Kaynağı Olarak Ayrımcılık*. Ankara: A.Ü. S.B.F. İnsan Hakları Merkezi Yayınları.
- BM, B. M. (2022, 4 21). *İnsan Hakları Derneği*. İnsan Hakları Evrensel Beyanname: <https://www.ihd.org.tr/insan-haklari-evrensel-beyanname/> adresinden alındı
- Brunsing, F. (2014, 6 10). *Quiet Lunch*. Quiet Lunch: <https://www.quietlunch.com/fabian-brunsing-spike-bench/> adresinden alındı
- Buckle, H. (2014, 6 30). *Defensive Versus Inclusive Design: Vancouver's Urban Antidote to London's "Anti-homeless" Spikes*. Land 8 Landscape Architects Network: <https://land8.com/defensive-versus-inclusive-design-vancouvers-urban-antidote-to-londons-anti-homeless-spikes/> adresinden alındı
- Dostoğlu, N., Şahin, E., & Yavuz, T. (2009, Ocak 1). Evrensel Tasarım: Tanımlar, Hedefler, İlkeler. *Mimarlık*, s. 23-32.
- Foucault, M. (1995). *Discipline and Punish: The Birth of the Prison*. New York: Vintage Books.
- Jacobs, J. (2011). *Büyük Amerikan Şehirlerinin Yaşamı ve Ölümü*. İstanbul: Metis.
- Kaya, A. (2007). *Avrupa Birliği ve Türk İş Hukuku Bağlamında Eşitlik İlkesi*. Ankara: Nobel Yayınları.
- Kaya, P. A. (2007). *Avrupa Birliği ve Türk iş hukuku bağlamında eşitlik ilkesi*. Ankara: Nobel Dağıtım.
- Korkut, L. (2009). *Ayrımcılık Karşıtı Hukuk*. Ankara: İnsan Hakları Gündemi Derneği.
- Mace, R. L., Hardie, G. J., & Place, J. P. (1991). *Accessible Environments: Toward Universal Design. Design Intervention: Toward a More Humane Architecture*. New York: Von Nostrand Reinhold.
- Mussett, B. (2019, 7 24). *Vancouver's 'defensive architecture' is hostile to homeless, say critics*. Vancouver is Awesome: <https://www.vancouverisawesome.com/courier-archive/news/vancouvers-defensive-architecture-is-hostile-to-homeless-say-critics-3102287> adresinden alındı
- New York Times. (2019, 11 8). *New York Times*. Hostile Architecture in NYC: <https://www.nytimes.com/2019/11/08/nyregion/hostile-architecture-nyc.html> adresinden alındı
- Ovey, C., & White, R. (2006).
- Özbek, M. (2015). *Kamusal Alan*. İstanbul: Hil Yayınları.
- Özmkas, U., & Yıldırım, K. (2020, Nisan 1). Dışlayıcı Mimari. *Mülkiye Dergisi*.
- Palmore, E. B. (1999). *Ageism Negative and Positive*.
- Ruetas, F. (2022, 1 1). *15 Examples of Hostile Architecture around the World*. Re-thinking the future: <https://www.re-thinkingthefuture.com/designing-for-typologies/a2564-15-examples-of-hostile-architecture-around-the-world/> adresinden alındı
- Sinem, Y. (2021, 11 2). Ayrımcılık Temelli Dışlanma: Türkiye'de Çalışma Hayatında Kadınlar. *SGD-Sosyal Güvenlik Dergisi*, s. 321-346.
- Sociology, P. (2017, 12 4). *hostile-architecture-defensive-design*. Popularsociology: <https://www.popularsociology.net/freevideos/hostile-architecture-defensive-design> adresinden alındı
- T.C. Cumhurbaşkanlığı. (2016, Nisan 6). *TÜRKİYE İNSAN HAKLARI VE EŞİTLİK KURUMU KANUNU*. T.C. Cumhurbaşkanlığı Mevzuat Bilgi Sistemi: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/1.5.6701.pdf> adresinden alındı
- Torontoist. (2018, Şubat 12). *Torontoist*. Torontoist: <https://torontoist.com/2018/02/public-works-defensive-urban-design-spotted-around-toronto/> adresinden alındı
- Türkiye İnsan Hakları ve Eşitlik Kurumu. (2021, Nisan 3). *TİHEK-Türkiye İnsan Hakları ve Eşitlik Kurumu*. Ayrımcılıkla Mücadele ve Eşitlik: <https://www.tihkek.gov.tr/ayrimcilikla-mucadele-ve-esitlik-3> adresinden alındı
- UAF . (2022, 9 21). *Uluslararası Af Örgütü*. Amnesty: <https://www.amnesty.org.tr/icerik/ayrimcilik> adresinden alındı

Yeni Şafak, H. (2022, 9 20). *Fransa'dan göçmenlere karşı insanlık dışı adım: Calais'de meydanlara kaya yığıldılar*. Yeni Şafak Gazetesi: <https://www.yenisafak.com/dunya/fransadan-gocmenlere-karsi-insanlik-disi-adim-calaisde-meydanlara-kaya-yigdilar-3859381> adresinden alındı

Yıldırımalp, S. (2021, Aralık 29). Ayrımcılık Temelli Dışlanma: Türkiye'de Çalışma Hayatında Kadınlar. *SGD-Sosyal Güvenlik Dergisi*, s. 321-346.



Radar Teknolojisi ile Hayati Sinyallerin Tespitinde Geç Füzyon Tabanlı Evrişimsel Sinir Ağı Modeli

Late Fusion Based Convolutional Network Model in Detection of Vital Signals with Radar Technology

Umut Özkaya^{1*}

¹Department of Electric-Electronic-Engineering, Engineering and Natural Science Faculty, Konya Technical Univ., Konya, Turkey.

Başvuru/Received: 10/01/2023

Kabul / Accepted: 25/01/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Bu çalışmada hayati sinyallerin sınıflandırılması için Evrişimsel Sinir Ağları (ESA) ve füzyon teknolojisine dayalı bir yöntem önerildi. Tek boyutlu radar sinyallerinden daha fazla bilgi edinmek amacıyla spektrogram tekniği ile 2 boyutlu veriler elde edildi. GoogleNet, VGG-16 ve ResNet-50 ön eğitilmiş ESA kullanılarak otomatik bir sınıflandırma çerçevesi uygulanmıştır. En yüksek performansa sahip VGG-16 ve GoogleNet ESA yapılarına geç füzyon işlemi uygulanarak test verilerindeki performans artırılmıştır. Önerilen yöntemin performans 92.54% Doğruluk (DOĞ), 92.41% Duyarlılık (DUY), 97.18% Özgüllük (ÖZG), 93.54% Hassasiyet (HAS), 92.66% F1-Skoru ve 90.25% Matthews Korelasyon Sabiti (MKS)'dir. Önerilen yöntem sayesinde tahribatsız algılama teknolojilerinden biri olan radar teknolojisi giyilebilir teknolojilere göre daha ön plana çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler

Radar, Hayati Sinyal, Derin Öğrenme, Evrişimsel Sinir Ağları, Geç Füzyon

Abstract

In this study, a method based on Convolutional Neural Networks (CNN) and fusion technology was proposed for the classification of vital signals. In order to obtain more information from 1-D radar signals, 2-D data were obtained with the spectrogram technique. An automated classification framework has been implemented by using pre-trained Google Net, VGG-16 and ResNet-50 models. The performance in the test data is increased by applying late fusion process to the highest performing VGG-16 and GoogleNet CNN structures. The performance of the proposed method is 92.54% Accuracy (ACC), 92.41% Sensitivity (SEN), 97.18% Specificity (SPE), 93.54% Precision (PRE), 92.66% F1-Score, and 90.25% Matthews Correlation Constant (MCC). Thanks to the proposed method, radar technology, which is one of the non-destructive detection technologies, comes to the forefront compared to wearable technologies.

Key Words

Radar, Vital Sign, Deep Learning, Convolutional Neural Network, Late Fusion

1. Giriş

Obstrüktif Uyku Apne Sendromu (OUAS) dünya çapında görülen bir ölümcül hastalık olup kadınlara nazaran erkek bireylerde uyku bozukluğuna daha çok rastlanmaktadır (Young ve diğ., 1993). OUAS, uyku esnasında bireyin üst hava yolundaki hava akımının kesilmesi ile ortaya çıkar. Ayrıca birey yaşantısının her evresinde belirtilerini gösterme ihtimali bulunmaktadır. İstatistiklerden elde edilen bilgiye göre erkeklerin OUAS rahatsızlığına yakalanma oranı kadınlara göre iki kat fazla olduğu görülmektedir (Leung ve diğ., 2001). OUAS kronik bir rahatsızlık olmasıyla birlikte iskemik kalp hastalığı, artan inme prevalansı, koroner arter hastalığı, Atriyal Fibrilasyon (AF), Kronik Kalp Yetmezliği (KKY) ve kardiyak ani ölüm gibi durumları da tetiklemektedir (Seicean ve diğ., 2013). OUAS rahatsızlığının tetiklenmesini bireydeki kolestrolün artması, hipertansiyon ve tip-2 diyabet gibi etkenler olduğu düşünülmektedir. Bunun yanı sıra OUAS, vücut içerisinde oksijen desatürasyonları, oksidatif stres, kan basıncı, kalp hızı değişiklikleri ve kesintiye uğramış uykuya sebebiyet verdiği ön görülmektedir (Nieto ve diğ., 2012).

OUAS rahatsızlığının tespiti, gece boyunca bireyin bir takım aktivitelerinin polisomnografi cihazı ile izlenmesi ile mümkün olabilmektedir. Polisomnografi sistemi teşhis aşamasında güvenilirlik ve kalite bakımından tercih edilmesine rağmen bireylere sınırlı hareket imkanı sağladığından uzun süreli ve sürekli takibi olumsuz etkilemektedir. Hasta vücudunda birtakım tahriş ve lekelerin oluşmasına sebebiyet verebilmektedir (Lie ve diğ., 2011). Polysomnography izleme tekniğinin bu dezavantajları temassız ölçüm ve takip sistemlerine talebin artmasına yol açmıştır.

Bireyin yaşamsal faaliyetlerinin temassız olarak takip edilebilmesi 1970'li yıllarda Doppler radarlar sayesinde gerçekleştirilebileceği keşfedildi. İlk olarak literatürde temassız olarak solunum ve kalp atım hızlarının değerlendirilmesi üzerine yayınlar ortaya çıktı. Sonrasında ise ideal olmayan ortam şartlarında OUAS sendromunun temassız olarak tespit edebileceği kanıtlandı.

Temassız ölçüm sistemlerinde doğru bir ölçüm elde edebilmek arka plan dağınıklığı, fazsız veya sıfır noktası, DC ofsetleri, hareket artefaktları ve elektromanyetik parazitler gibi etkenlere bağlıdır (Kagawa ve diğ., 2013). Bunun yanı sıra temassız uyku izleme sistemlerinin çalışabilirliğini ortam karmaşıklığı, öngörülemez vücut hareketliliği, arka plan gürültüsü, uyku pozisyon farklılığı ve istenmeyen harmonikler olumsuz bir şekilde etkilemektedir (Kagawa ve diğ., 2011).

Literatürde, Wang ve arkadaşları solunum ve kalp atış hızını analiz etmek için WiFi cihazlarındaki faz farkı verilerini incelemişlerdir (Wang ve diğ., 2017). Quaiyum ve arkadaşları çalışmalarında simülasyon ortamında radar sistemi ile farklı insan hareketlerini tespit etmeye çalışmışlardır (Quaiyum ve diğ., 2018). Saluja ve arkadaşları kalp atışının temassız olarak tespitinde oluşan doğrusal olmayan harmonikleri, makine öğrenmesi yöntemi olan gama filtresi ile elimine ederek doğru bir şekilde ölçüm sağlamıştır (Saluja ve diğ., 2018). Erdoğan ve arkadaşları hayati işaretlerin tespitinde 24 GHz mikrodalga Doppler radar sensörü kullanmışlardır. Elde edilen sonuçların solunum kemeri ile elde edilen sonuçlar ile uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir (Erdoğan ve diğ., 2019). Saluja ve arkadaşları çalışmalarında 5.8 GHz'lik Doppler radar sinyallerindeki harmonikleri denetimli bir gama filtresi ile elimine etmişlerdir (Saluja ve diğ., 2020). Chang ve arkadaşları hayati sinyalin tahmininde derin öğrenme tabanlı Newtonize Ortogonal Eşleştirme Takibi algoritması kullanmışlardır. Önerilen yöntem hem simülasyon hem de gerçek ölçüm verilerinde gösterdiği başarı ile mevcut sistemlere göre üstünlüğünü göstermektedir (Chang ve diğ., 2020). Lai yapmış olduğu çalışmada 24 GHz Doppler radar ile elde edilen hayati işaretlerin tespitinde Derin Sinir Ağları kullanmıştır (Lai ve diğ., 2020). Baldoumas ve arkadaşları çalışmada electrokardiogram ve radar sinyallerinden ortak özellik çıkararak kalp atış sinyallerini %90.82 ile sınıflayabilmektedir (Baldoumas ve diğ., 2021). Cardillo ve arkadaşları radar kendi kendine hareket etkilerini azaltarak hayati sinyallerin tespiti için yeni bir yöntem çerçevesi önermişlerdir. Bu sayede küçük ve büyük çaplı hareketler tespit edilebilmektedir (Cardillo ve diğ., 2021). Slapnicar ve arkadaşları temaslı ve temassız yöntemler ile hayati sinyallerin tespiti için derin öğrenme modeli tasarlamışlardır. Önerilen yöntem ile temaslı ölçümlerde %88, temassız ölçümlerde %83 ve füzyon işlemleri ile %88 doğruluk oranı elde etmişlerdir (Slapničar ve diğ., 2021). Savage ve arkadaşları örüntü tanıma tekniklerinden faydalanarak 75 hasta bireyden elde edilen hayati sinyalleri değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak 85.8% doğruluk, 70% duyarlılık ve 89% özgüllük performans metrikleri elde etmişlerdir (Savage ve diğ., 2016). Tran ve arkadaşları geliştirmiş oldukları uzaktan algılama özelliği olan biyosensor ile kalp atış hızını %91.29 bir doğruluğa ulaşmışlardır (Tran ve diğ., 2015). Zaffaroni ve arkadaşları PSG verileri üzerine SleepMinder'in AHI tahmini ile 89% duyarlılık ve 94% özgüllük elde etmiştir (Zaffaroni ve diğ., 2015).

Bu çalışmada OUAS için geç veri füzyonu tabanlı Evrişimsel Sinir Ağı (ESA) mimarisi önerilmiştir. Bu kapsamda derin öğrenme algoritmaları için oldukça az olan veri miktarı için yüksek performans elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu konu ile ilgili olarak literatürde ESA mimarilerinin eğitimi için büyük ve yeterli miktarda verinin gerektiği belirtilmiştir. Önerilen yöntemde Googlenet ve VGG-16 ESA modelleri ile elde edilen yüksek kalitedeki özellikler üzerinde geç veri füzyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemin katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Önerilen yöntem sayesinde daha az örnek içeren veri kümeleri için yüksek sınıflandırma performansı elde edilir.
- Uçtan uca eğitim için uygundur.
- Mevcut son teknoloji yöntemlere göre daha etkin performans gösterir.

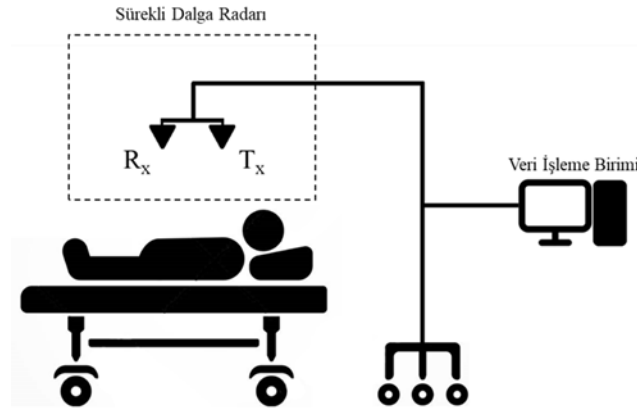
2. Materyal ve Yöntem

2.1. Radar Çalışma Prensibi

Sistemin içerisindeki Altı-Port yapısının en önemli özelliklerinden biri yüksek faz çözünürlüğüne sahip olmasıdır. Alıcı ve verici antenlerinin önünde gerçekleşen bir hareket $\Delta\phi$ şeklinde bir faz değişimine neden olur. Cismin gerçekleştirmiş olduğu yer değişim miktarını Δx , verici anten sinyalindeki dalga boyunu λ kullanarak tespit edilebilir (Schellenberger S. ve diğ. 2020).

$$\Delta x = \frac{\Delta\phi \lambda}{2\pi} \quad (1)$$

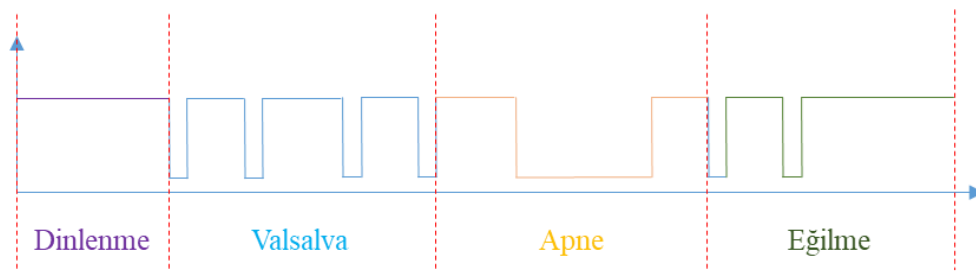
Tasarlanan radar sisteminden In-Phase (I) ve Quadrature (Q) adında iki adet bileşene sahip radar ham sinyalleri elde edilir. Bu sinyaller Texas Instruments ADS1298 sayesinde anlık olarak sayısallaştırılır. I ve Q sinyalleri üzerinde arktanjan demodülasyonu yapılarak $\Delta\phi$ hesaplanır. 2000 Hz örnekleme hızıyla sayısallaştırılan veriler XMC4500 mikro denetleyicisi kullanılarak depolanır. Kanal başına 50 örneğe ulaşıldığı anda Ethernet aracılığıyla ana bilgisayara aktarılır. Şekil 1’de radar ölçüm düzeneği yer almaktadır.



Şekil 1. Radar Ölçüm Sistemi.

2.2. Veri Seti Tanımlaması

Radar ölçüm işlemi belirli bir prosedür çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Ölçüm işleminden önce denekler en az 10 dakika dinlendirilmiştir. Ölçüm sırasında denekler ani hareketlerden kaçınımı ve normal bir şekilde nefes alıp vermeleri istenmiştir. Veri seti içerisinde toplamda dört adet sınıf bulunmaktadır. Bu sınıflar sırasıyla Dinlenme, Valsalva, Apne and Eğilme şeklindedir. Radar ölçümleri en az 10 dakika olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Ölçüm senaryosunun ilk başlarında Dinlenme durumu ortaya çıkmaktadır. Bu esnada denneğin kalp atım hızı 54 BPM’dir. Sonrasında belirli duraklamalar ile birlikte Valsalva üç defa gerçekleşir. Valsalva manevrası 20-21 s süreler civarında kuvvetli bir ekspirasyon olarak görülmektedir. Bu durumda denneğin dolaşım sisteminde hemodinamik değişiklikler gözlemlenir. Apne durumunda denekler nefeslerini iki durum farklı şekilde kullanmaktadırlar. İlk olarak apneden önce tamamen nefes alınır ve nefes verilir. Bu durumlar uzun süre tanımlanarak gerçekleşir. Ölçüm kapsamında Eğilme durumu iki şekilde gerçekleştirilir. Bunlar sırasıyla Yukarı ve Aşağı Eğilmedir. Yukarı eğilme işleminde denek masası eğimli bir şekilde kaldırılarak otonom sinir sistemi tetiklenmesi sağlanır. Bu durumda kan basıncı ve kalp atım hızında önemli bir değişim olur. Radar ölçüm işlemi denek masası 700’ye varıncaya dek devam eder. Sonrasında Aşağı Eğilme işlemi gerçekleştirilir. Denek masası yatay konuma gelince kadar bu işlem uygulanır. Yukarı Eğilme işleminde olduğu gibi otonom sinir sistemi aktiviteleri gerçekleşir. Şekil 2’de radar ölçüm sınıf sinyalleri yer almaktadır.



Şekil 2. Radar Ölçüm Sinyalleri.

2.3. Derin Öğrenme

Yapay zeka alanında son olarak ortaya çıkan derin öğrenme kavramı derin bir bilgi ağı planını temsil eder. Derin öğrenme modelleri, problemin çözümü için uzman bilgi seviyesini elde etmeyi amaçlar. Daha yüksek performansların elde edilmesi eğitim örneklerinin fazla olması ve daha derin ağların tasarlanması ile mümkündür. ESA mimarisi günümüzde çoğu problemin çözümü için kullanılır (Öztürk, 2020). ESA, farklı boyutlardaki matris veya vektör formlarını ideal bir şekilde analiz eder. Bu bölüm kapsamında daha çok 2D-ESA mimari yapılarına yer verilmektedir. ESA mimarisi farklı katmanlardan oluşur. Bu kapsamda katman özellikleri bu bölümde ele alınmıştır.

ESA mimarisinin temel katmanlarından biri evrişim katmanıdır. Mimari içerisinde farklı sayıda ve boyutta çekirdeklere sahip evrişim katmanları yer alır. Bu çekirdek parametreleri güncellenebilir özelliğe sahip olup çözülmesi istenen problem ile ilgili özellikleri öğrenir. Evrişim katmanında 2 boyutlu bir evrişim işlemi uygulanır. Bu işlemin en önemli avantajlarından biri parametre paylaşımının gerçekleştirilmesidir. Bu sayede mimarideki toplam parametre sayısında düşüş sağlanır. Havuzlama katmanı ise ESA mimarisinde kullanılan diğer önemli katmanlardan biridir. Evrişim katmanını veya Rektifiye Edilmiş Doğrusal Birim (REDB) takiben havuzlama katmanının kullanımı görülmektedir. Alt örnekleme işlemi havuzlama katmanı tarafından sağlanır. Bu çalışmada maksimum havuzlama katmanı kullanılmıştır. Diğer önemli katmanlardan biri de REDB'dir. Evrişim katmanını takiben REDB katmanının kullanımı çok sıkça rastlanır. REDB katmanı ile tasarlanan ESA mimarisinin doğrusal olmayan bir özellik kazanması amaçlanır. REDB katmanı elde edilen negatif değerleri sifıra eşitler. ESA mimarisinde yer alan tam bağlı katman klasik bir yapay sinir ağı görevi görür. ESA mimarisi ile elde edilen yüksek seviyedeki özellikler tam bağlı katmandaki düğümler ile işleme tabi tutularak sınıflama işlemi gerçekleştirilir. Temelde üç ana katmandan oluşan ESA mimarisinde hesaplamalar için aşağıdaki denklem kullanılır.

$$f(I_{sonra}) = havuzlama_{n \times n}(\sigma(w * [D_{in}] + b)) \quad (2)$$

Denklem 2'de yer alan I_{sonra} sonraki katmanlar için girdiyi temsil eder. $havuzlama_{n \times n}$ ise $n \times n$ boyutunda havuzlama işlemini ifade eder. σ , w ve b değişkenleri REDB işlemi, evrişim çekirdeği bias değerlerini ifade eder. Sınıflama amacıyla kullanılan ağ yapılarının sonunda softmax bulunur. Denklem 3'de m sınıf için olasılıksal bir hesaplama gerçekleştirilir.

$$P_j = \frac{e^{x_j}}{\sum_1^m e^{x_m}} \quad (3)$$

ESA mimarisi için belirtilen temel katmanlara yeni katman yapıları önerilmiştir. Önerilen yöntemin açıklanabilmesi için bu katman özellikleri yeterli olacaktır. VGG-16 mimarisi toplamda 16 adet güncellenebilir ağırlıklara sahip katmanlardan oluşur (Jaderberg ve diğ., 2015). Bu katmanların 13 tanesi evrişim katmanı olup geri kalan 3 tanesi de Tam Bağlı Katman (TBK) katmanıdır. Tüm evrişim katmanları 1 adıma sahip 3×3 boyutunda filtreler sahiptir. Havuzlama katmanları ise 2 adımda 2×2 pencereden oluşur. İki TBK 4096 düğümden oluşurken son TBK 1000 düğümden oluşur. Toplamda 138 milyon eğitilebilir değişken yapısında bulundurulur. Ön eğitilmiş ağlardan biri olan ResNet-50 mimarisi ek bağlantılardan oluşur. VGG-16 mimarisine göre daha derin bir yapıya sahip olmasına rağmen daha az güncellenebilir parametreler içerir. Toplamda 50 adet ağırlık katmanı yapısında bulundurulur. Son olarak 23 milyon güncellenebilir parametreye sahiptir (Fulton ve diğ., 2019).

2.4. Spektrogram

Sinyaldeki spektral içerik yalnızca Fourier Dönüşümü (FD) kullanılarak elde edilir. Spektrogram, sinyali küçük pencere boyutuyla zaman alanında analiz eden Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) olarak da tanımlanır. Bu işlemler Denklem 4 kullanarak gerçekleştirilir.

$$X[t, f] = \sum_{-\infty}^{\infty} x[r]. \omega[t - \tau]. e^{-j\pi\tau} \quad (4)$$

FD sadece frekans fonksiyonuna sahipken, KZFD hem frekans hem de zaman fonksiyonunu içerir. KZFD işleminden sonra elde edilen sonuç matris formundadır. FD işlemi için frekans alanında çözünürlük sorunu oluşmuyor. KZFD işleminde, sonlu boyuttaki pencerelerin kullanılması ve sinyalin parça parça analizi nedeniyle frekans alanındaki çözünürlük değişir (Giv, 2013). KZFD için küçük bir pencere seçmek, zaman alanındaki çözünürlüğü iyileştirir. Pencere büyük seçilirse, frekans alanında çözünürlük artarken, zaman alanında çözünürlük azalır.

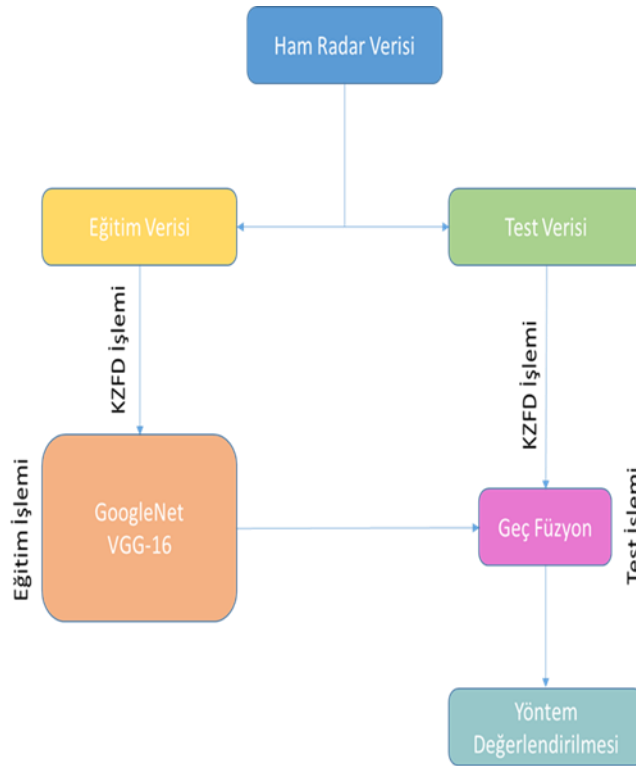
2.5. Geç Füzyon

Geç füzyon işleminde sınıflandırıcıların olasılıksal olarak kararını değerlendirerek gerçekleştirir. Sınıflandırıcılar, farklı ortamların özellikleri için ayrı ayrı evet/hayır gibi veya bir puan veya anlamsal bir kavramın bulunma olasılığı şeklinde bir karar vererek öğrenilir. Sınıflandırma, farklı modalitelerdeki öznitelikler farklı temsillere sahip olsa bile benzer temsile sahip kararlar elde edecek şekilde yapılmaktadır. Bağımsız kararlar, farklı kurallar kullanılarak birleştirilebilir veya çıktı puanlarından öğrenmek için sınıflandırıcılar oluşturulur.

Erken füzyondan ziyade geç füzyon işlemi karar uzayında füzyon gerçekleştirmek daha kolaydır ve verimlidir. Sınıflandırıcılardan alınan kararlar genellikle benzer formattadır. Yeni bilgi kaynaklarından alınan puanlar, yalnızca füzyon bölümünün yeniden eğitilmesiyle nihai karara kolayca eklenebilir. Ayrıca her farklı modalite türü kendi uygun sınıflandırıcısına sahip olabilir. Geç füzyon, basitliği ve ölçeklenebilirliği nedeniyle son teknolojiye yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.6. Önerilen Yöntem

Ham radar sinyallerinden zaman ve frekans ortamında daha fazla bilgi sağlamak amacıyla KZFD işlemi uygulanmıştır. Bu işlemden sonra elde edilen 2-B spektrogram matrisleri farklı ön eğitilmiş ESA ağlarına girdi olarak verilmiştir. Karşılaştırmalı analiz kapsamında üç farklı ön eğitilmiş ESA ağı eğitilmiştir. Bu ağlar içerisinde en başarılı sonuçları elde eden GoogleNet ve VGG-16 modelleri önerilen yöntem çerçevesinde kullanılmıştır. Bu modeller sayesinde eğitim ve test verileri için yüksek seviyede özellikler elde edilmiştir. Bu özellikler uç uca ekleme yöntemi ile birleştirilerek daha fazla bilgi içeren özellik vektörü elde edilmiştir. Bu özellik vektörü sınıflama olasılıklarına göre geç füzyon işlemi uygulanmıştır. Sonrasında sınıflama işlemi ile tahminler gerçekleştirilmiştir. Bu özellikler geç füzyon işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 3'de önerilen yöntem şematize edilmiştir.



Şekil 3. Önerilen Yöntem.

3. Bulgular ve Tartışma

Ham radar verilerinin işlenmesi, ön eğitilmiş CNN ağlarını eğitimi ve geç füzyon işlemi için 2.8 GHz hızında Intel Core i7-7700 HQ işlemci, 16 GB RAM ve NVIDIA GTX 1080 Ekran kartına sahip bir iş istasyonu kullanılmıştır. Tüm işlemlerin gerçekleştirildiği yazılım ortamı için Matlab 2020a programı seçilmiştir.

Karşılaştırmalı analizde kapsamında eğitim gerçekleştirilen ön eğitilmiş ESA ağların performansının değerlendirilmesi amacıyla 6 farklı sınıflandırma metriği kullanılmıştır. Bu ölçütler sırasıyla Doğruluk (DOG), Duyarlılık (DUY), Özgüllük (ÖZG), F1-Skoru, Hassasiyet (HAS) ve Matthews Korelasyon Sabiti (MKS)'dir. Bu metriklerin hesaplanmasında Doğru Pozitif (DP), Doğru Negatif (DN), Yanlış Pozitif (YP) ve Yanlış Negatif (YN) indislerinden yararlanılmıştır.

$$\text{Doğruluk} = (DP + DN)/(DP + DN + YP + YN) \quad (5)$$

$$\text{Duyarlılık} = DP/(DP + YN) \quad (6)$$

$$\text{Özgüllük} = DN/(DN + YP) \quad (7)$$

$$\text{Hassasiyet} = DP/(DP + YP) \quad (8)$$

$$\text{F1 - Skoru} = (2 \times DP)/(2 \times DP + YN + YP) \quad (9)$$

$$\text{MKS} = \frac{DP \times DN - YP \times YN}{\sqrt{(DP + YP)(DP + YN)(DN + YP)(DN + YN)}} \quad (10)$$

Önerilen yöntemde kullanılan hiperparametreler ön eğitilmiş ESA ağlarına göre farklıdır. 500 Epok'a kadar eğitim gerçekleştirilmiştir. En kısa eğitim süresi 3 dak. 18 sn ile GoogleNet'e aittir. VGG-16 modeli 9 dak 55 sn ile en uzun eğitim süresine sahiptir. Karşılaştırmalı performans ölçütleri Tablo 1'de yer almaktadır.

Tablo 1. ESA Modellerinde Performans Karşılaştırması

Yöntem	Performans Metrikleri (%)					
	DOĞ	DUY	ÖZG	HAS	F1-SKORU	MKS
VGG-16	73,13	71,52	89,93	80,54	74,34	65,62
ResNet-50	68,66	69,23	88,45	73,41	69,64	59,42
GoogleNet	76,12	82,71	92,09	79,76	79,07	72,96
Önerilen Yöntem	92,54	92,41	97,18	93,54	92,66	90,25

Yöntemler performans açısından değerlendirildiğinde en düşük performansı ResNet-50 modeli göstermiştir. Bu model ile elde edilen sınıflandırma metrikleri 68,66% DOĞ, 69,23% DUY, 88,45% ÖZG, 73,41% HAS, 69,64% F1-Skoru ve 59,42% MKS şeklindedir. Ön eğitilmiş ağların içerisinde en yüksek performansı ise GoogleNet modelinin eğitimi ile elde edilmiştir. Performans metrikleri 76,12% DOĞ, 82,71% DUY, 92,09% ÖZG, 79,76% HAS, 79,07 F1-Skoru ve 72,96% MKS olarak bulunmuştur. Performans açısından önerilen yöntem ön eğitilmiş ESA ağlarına oldukça yüksek bir fark atmıştır. Önerilen yöntemin performans metrikleri 92,54% DOĞ, 92,41% DUY, 97,18% ÖZG, 93,54% HAS, 92,66% F1-Skoru ve 90,25% MKS'dir.

		Doğruluk				Hata		
Doğru Sınıflar	Apne	12				100%		
	Dinlenme		11	3	1	73.3%	26.7%	
	Eğilme			1	26	96.3%	3.7%	
	Valsalva					100%		
		Doğruluk				Hata		
		100%	91.7%	89.7%	92.9%			
		Hata		8.3%	10.3%	7.1%		
		Apne	Dinlenme	Eğilme	Valsalva			
		Tahmin Edilen Sınıflar						

Şekil 4. Önerilen Yöntemin Eş Oluşum Matrisi

Şekil 4'de önerilen yöntemin eş oluşum matrisindeki bulgular incelendiğinde Apne ve Valsalva sınıf doğruluğunda 100% performans sağlanmıştır. Dinlenme sınıfı için ise 73,3% doğruluk performansı elde edilmiş olup 26,7% hata oranına sahiptir. Eğilme sınıfsal doğruluğu 96,3%'dir. Hata oranı da 3,7% şeklindedir. Tablo 2 dikkate alındığında Literatürde en düşük performans Savage ve arkadaşlarına aittir. Performansı 85,8% DOĞ, 70,0% DUY ve 79,0% ÖZG şeklindedir. En yüksek performans ise Tran ve arkadaşları tarafından 91,29% DOĞ şeklinde elde edilmiştir. Önerilen yöntemin performansı diğer literatürde bulunan çalışmalara göre oldukça yüksektir. Önerilen yöntem ile 1,25% DOĞ, 3,41% DUY ve 3,18% ÖZG'lük artışı sağlanmıştır.

Tablo 2. Tabloda sunulan bilginin açıklaması

Yöntem	Performans Metrikleri		
	DOĞ	DUY	ÖZG
Zhang	90,82%	-	-
Slapnicar ve diğ.	88%	-	-
Savage ve diğ.	85,8%	70%	-
Tran ve diğ.	91,29%	-	-
Zaffaroni ve diğ.	-	89%	-
Önerilen Yöntem	92,54%	92,41%	93,54%

4. Sonuç

Bu çalışmada temel olarak ön eğitilmiş ESA ağlarının üzerine modifikasyonlar gerçekleştirilerek yüksek performanslı radar hayati sinyal sınıflaması yapıldı. Halka açık veri tabanında elde edilen ham radar verileri üzerinde spektrogram işlemi gerçekleştirildi. Bu sayede radar verilerinin zaman ve frekans domain araştırılmış oldu. Elde edilen 2D boyutlu radar spektrogramları ön eğitilmiş ESA ağlarının eğitim ve test işlemi için kullanıldı. En yüksek performansı gösteren VGG-16 ve GoogleNet ESA ağlarından elde edilen yüksek seviyedeki özelliklere geç füzyon işlemi uygulandı. Literatürde yer alan çalışmalara nazaran oldukça yüksek ve kayda değer sonuçlar elde edildi. Gelecekteki çalışmalarda derin öğrenme mimarilerine ek olarak attention network entegrasyonu sağlanabilir. Ayrıca farklı ölçüm cihazlarından elde edilen verilerin birleştirilmesi ile performansı artırılması ön görülmektedir.

Referanslar

Baldoumas G., Peschos D., Tatsis G., Christofilakis V., Chronopoulos S. K., Kostarakis P., Varotsos P. A., Sarlis N. V., Skordas E. S., Bechlioulis A., Michalis L. K., Naka K. K. (2021). Remote sensing natural time analysis of heartbeat data by means of a portable photoplethysmography device, *International Journal of Remote Sensing*, 42 (6): 2292-2302.

Cardillo E., Li C., Caddemi A. (2021). Vital sign detection and radar self-motion cancellation through clutter identification, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 69 (3): 1932-1942.

Chang H., Lin C., Lin Y., Chung W., Lee T. (2020). DL-Aided NOMP: a deep learning-based vital sign estimating scheme using FMCW radar, *IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, Antwerp, Belgium, 1-7.

Erdoğan S., Yılmaz Ş., Öncü A. (2019) Microwave noncontact vital sign measurements for medical applications, *IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, Istanbul, Turkey, 1-5.

Fulton L.V., Dolezel D., Harrop J., Yan Y., Fulton C.P. (2019). Classification of Alzheimer's disease with and without imagery using gradient boosted machines and ResNet-50, *Brain sciences*, 9 (9): 212.

Giv H.H. (2013). Directional short-time Fourier transform, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 399 (1): 100-107.

Jaderberg, M., Simonyan, K., Zisserman, A. (2015). Spatial transformer networks, *Advances in neural information processing systems*, 28: 2017-2025.

Kagawa, M., Ueki, K., Tojima, H., Matsui, T. (2013). Noncontact screening system with two microwave radars for the diagnosis of sleep apnea-hypopnea syndrome, In *Proceedings of the 35th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, Osaka, Japan, 3-7 July, 2052-2055.

Kagawa, M., Yoshida, Y., Kubota, M., Kurita, A., Matsui, T. (2011). An overnight vital signs monitoring system for elderly people using dual microwave radars, In *Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference*, Melbourne, Australia, 5-8 December, 590-593.

Lai W. C. (2020). Design of receiver frontend with deep neural network for doppler radar heart rate detection, *IEEE 5th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM)*, Nanjing, China, 121-124.

Leung, R.S.T., Bradley, T.D. (2001). Sleep apnea and cardiovascular disease, *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 164: 2147-2165.

- Lie, D.Y.C., Ichapurapu, R., Jain, S., Lopez, J., Banister, R.E., Nguyen, T., Griswold, J. A. (2011). 2.4 GHz Non-Contact biosensor system for continuous monitoring of vital-signs. In *Telemedicine Techniques and Applications*; Grasczew, G., Ed.; InTech: Rijeka, Croatia, 211–238.
- Nieto, F.J., Peppard, P.E., Young, T., Finn, L., Hla, K.M., Farré, R. (2012). Sleep-disordered breathing and cancer mortality: results from the wisconsin sleep cohort study, *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 186: 190–194.
- Quaiyum F., Tran N., Phan T., Theilmann P., Fathy A. E., Kilic O. (2018). Electromagnetic modeling of vital sign detection and human motion sensing validated by noncontact radar measurements, *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*, 2 (1): 40-47.
- Öztürk Ş., (2020). Stacked auto-encoder based tagging with deep features for content-based medical image retrieval, *Expert Systems with Applications*, 161 (5).
- Saluja J. J., Lin J., Casanova J. (2018). A supervised learning approach for real time vital sign radar harmonics cancellation, *IEEE International Microwave Biomedical Conference (IMBioC)*, Philadelphia, PA, USA, 67-69.
- Saluja J., Casanova J., Lin J. (2020). A supervised machine learning algorithm for heart-rate detection using doppler motion-sensing radar, *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*, 4 (1): 45-51.
- Savage, H. O., Khushaba, R. N., Zaffaroni, A., Colefax, M., Farrugia, S., Schindhelm, K., Teschler, H., Weinreich, G., Grueger, H., Neddermann, M., Heneghan, C., Simonds, A., Cowie, M. R. (2016). Development and validation of a novel non-contact monitor of nocturnal respiration for identifying sleep-disordered breathing in patients with heart failure, *ESC Heart Failure*, 3: 212– 219.
- Schellenberger S., Shi K., Steigleder T. (2020). A dataset of clinically recorded radar vital signs with synchronised reference sensor signals, *Sci Data*, 7 (291).
- Seicean, S., Strohl, K.P., Seicean, A., Gibby, C., Marwick, T.H. (2013). Sleep disordered breathing as a risk of cardiac events in subjects with diabetes mellitus and normal exercise echocardiographic findings, *Am. J. Cardiol.*, 111: 1214–1220.
- Sindi, H., Nour, M., Rawa, M., Öztürk, Ş., Polat, K. (2021). A novel hybrid deep learning approach including combination of 1D power signals and 2D signal images for power quality disturbance classification, *Expert Systems with Applications*, 2021, 174 (114785).
- Slapničar, G., Wang W., Luštrek M. (2021). Classification of hemodynamics scenarios from a public radar dataset using a deep learning approach, *Sensors*, 21 (5): 1836.
- Tran, V. P., Al-Jumaily, A. A. (2015). Non-contact dual pulse doppler system based real-time relative demodulation and respiratory & heart rates estimations for chronic heart failure patients, *Procedia Computer Science*, 76: 47-52.
- Wang X., Yang C., Mao S. (2017). PhaseBeat: Exploiting CSI phase data for vital sign monitoring with commodity wifi devices, *IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, Atlanta, GA, USA, 1230-1239.
- Young, T., Palta, M., Dempsey, J., Skatrud, J. Webber, S. Badr, S. (1993). The occurrence of sleep-disordered breathing among middle-aged adults, *N. Engl. J. Med.*, 1 (328): 1230–1235.
- Zaffaroni, A., De Chazal, P., Heneghan, C., Boyle, P., Mppm, P. R., McNicholas, W. T. (2009). SleepMinder: an innovative contact-free device for the estimation of the apnoea-hypopnoea index, *Annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society*, 7091-9094.
- Zhang X., Zou J., He K., Su J. (2015). Accelerating very deep convolutional networks for classification and detection, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 38 (10): 1943-1955.



Araç lastiklerinde kord-kauçuk kompozit malzemelerin konstrüksiyon yapısının ve lastik davranışına etkisinin incelenmesi

Investigation of the construction structure of cord-rubber composite materials and their effects on tire behavior in vehicle tires

Onur Karaçay^{1*}, Süleyman Kılıç²

¹Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, 40000 Kırşehir, TÜRKİYE
²Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 40000 Kırşehir, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 25/07/2022

Kabul / Accepted: 21/01/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Günlük hayatımızda ulaşım başta olmak üzere birçok alanda lastik kullanılmaktadır. Kullanılan aracın özelliklerine bakılmaksızın araç lastiği emniyet açısından kritik bir öneme sahiptir. Dolayısıyla araç lastiğinin iç yapısı, konstrüksiyonu, lastik taban izi vb. parametrelerin analizinin doğru yapılarak lastiğin emniyetli ve verimli çalışması sağlanmalıdır. Lastiğin yapısı içerisinde yer alan kord ve elastomer malzemeler yük altında farklı mekanik gerinim özelliklerine sahiptirler. Oluşan gerinimin kordun mekanik özellikleri ve yapışma performansına etkisi yapılan çalışmalarla ispatlanmıştır. Bu derlemede, literatürdeki lastik iç yapısında temel bileşen olan kord-kauçuk yapısının mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan deney ve çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca kord kauçuk kompozit malzemesinin makro ve mezoskopik mekanik özellikleri ile ilgili yapılan çalışmalardan örnekler verilmiştir. Lastik yapısının analizi, sonlu elemanlar yöntemi ile lastik kordunun mekanik özellikleri, lastik davranışının yol şartlarında modellenmesi, lastik basıncı değişikliği ile zemin teması üzerine çalışmalar incelenmiştir. İnceleme sonucunda, kord-kauçuk yapısı içinde yer alan malzemelerin mekanik özellikleri, malzeme yapısını analiz etmede kullanılan test yöntemleri, lastik yapısının modellenmesi, kord kauçuk yapışma analizi, kord gerinim analizi, lastik zemin ilişkisi konuları üzerine bir derleme yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Araç lastiği, kord, kauçuk, konstrüksiyon, lastik davranışı”

Abstract

In our daily life, tires are used in many areas, especially transportation. Regardless of the characteristics of the vehicle used, the vehicle tire has a critical importance in terms of safety. In order for the tire to work safety and efficiently, the internal structure of the tire, its construction, the tire footprint etc. The analysis of the parameters must be done correctly. The cord and elastomer materials in the tire structure have different mechanical strain properties under load. The effect of the resulting strain on the mechanical properties and adhesion performance of the cord has been proven by studies. In this study, the experimental and simulation studies to determine the mechanical properties of the cord-rubber structure, which is the main component in the tire inner structure, are mentioned. In addition, examples from the studies on the macro and mesoscopic mechanical properties of the cord rubber composite material are given. In the analysis of the tire structure, studies on the mechanical properties of the tire cord, the modeling of the tire behavior under road conditions, the change in tire inflation pressure and the ground contact were examined with the finite element method. As a result of the examination, a review was made on the mechanical properties of the materials in the cord-rubber structure, the test methods used to analyze the material structure, the modeling of the tire structure, the cord rubber adhesion analysis, the cord strain analysis, the tire-ground relationship.

Key Words

“Tire, cord, rubber, construction, tire behavior”

1. Giriş

Kompozit malzemeler ve malzeme analizinde kullanılan test yöntemleri gelişen teknoloji ile birlikte büyük önem kazanmıştır. Araç lastiklerinin modellenmesi, lastiğin yapısal davranışlarının incelenmesi, kord-kauçuk kaplama yapısı konularında çalışmalar yapılmaktadır. Kord-kauçuk kaplama yapısı deney ve simülasyon yardımıyla analiz edilerek kompozit malzemenin iç yapısındaki bozulma incelenmiştir (Su vd., 2021a). Lastik iç yapısının temel bileşeni olan kord-kauçuk kompozit yapısı, lastik modellemesinde kritik bir öneme sahiptir. Lastik üzerine gelen yük miktarı, lastiğin kullanım yeri, lastiğin saklama koşulları, lastik kullanım süresi gibi birçok parametre lastik iç yapısını etkilemektedir. Günümüzde lastik iç yapısını analiz etmede bazı test yöntemleri de kullanılmaktadır. Bu testlerin başında Rubber Cord Adhesion Inflation Test (RCAIT) lastik kauçuk-çelik kord kırılmasını inceleyen test gelmektedir. Yapılan çalışmalar, kauçuk davranış modelleme ve tanımlama test yöntemi RCAIT sırasında ortaya çıkan SERR (Strain Energy Release Rate) değerinin güvenilir bir sonucu olduğunu göstermektedir (Kane vd., 2021a).

Literatürde malzeme kuvveti, gerinimi kavramını kullanarak kord takviyeli elastomerlerin dayanıklılık analizi üzerine çalışmalar mevcuttur. Malzemenin mekanik özelliklerini incelemeye sonlu elemanlar modelleme yöntemi temel alınarak analiz çalışması yapılmaktadır. Lastik üretim aşaması zor ve maliyetli olduğundan sonlu elemanlar simülasyon yöntemi, yapılan çalışmalarda kritik bir öneme sahiptir. Lastik davranışını ve lastik iç yapısındaki bileşenleri modelleme sırasında doğru tanımlayarak gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek mümkündür. Zhao ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; sonlu eleman simülasyon yöntemi ile kauçuk-kord kompozitlerinin tek eksenli gerinim verilerinin karşılaştırılması ve kord açısının, kauçuk kord kompozitinin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda anizotropik hiperelastik yapı modeli kauçuk-kord kompozitinin gerinim özelliğini doğru tahmin eden sonuçlar elde edilmiştir (Zhao vd., 2020a).

Lastik bileşenlerini analiz etmede malzeme modellemesi önemli bir etkiye sahiptir. Malzemelerin şekillendirme özellikleri, bileşik oluşturma kabiliyetleri, mukavemet değerleri modelleme sırasında doğru tanımlanmalıdır. Lastik modellemesinde özellikle Yeoh ve Marlow modellemeleri kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar özellikle lineer olmayan Marlow modelinin avantajlarını göstermektedir. Marlow modeli parametrelerinin tanımlanması ve lastik FEA'nın (Finite Element Analysis) hesaplama verimliliğinde önemli gelişmeler sağlamıştır (Korunović vd., 2019a).

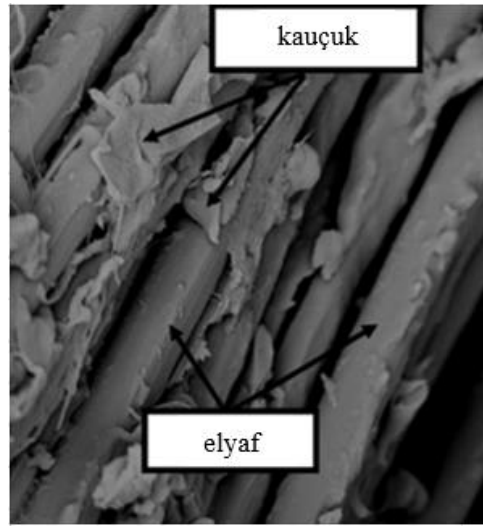
Bu çalışma 8 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde kord-kauçuk yapısının mekanik özellikleri, ikinci bölümde kord-kauçuk test yöntemleri incelenmiştir. Üçüncü bölümde kord-kauçuk yapısını oluşturan malzemeler, dördüncü bölümde sonlu elemanlar yöntemi ile lastik yapısına değinilmiştir. Çalışmanın beşinci bölümünde yapısal model oluşturma, altıncı bölümde yapışma analizi, yedinci ve sekizinci bölümde sırasıyla lastikte gerinim analizi ve lastik zemin teması incelenmiştir.

2. Kord-Kauçuk Yapısının Mekanik Özellikleri

Kord-kauçuk bütünleşik yapısı kauçuk ürünlerin güvenlik performanslarını doğrudan etkileyen kord-kauçuk kompozit malzemesinin mekanik özelliklerinde önemli bir rol oynar. Su ve arkadaşları (Su vd., 2021b) yaptıkları çalışmada; mekanik özellikler için deney ve simülasyon sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Kord-kauçuk kompozit malzemesi için bindirme yapısının kırılma mekanizmasını analiz eden bir kohezyon bölgesi modeli oluşturulmuştur. Çalışmanın sonucunda lastik içindeki kord-kauçuk kompozit yapısının iç yapısındaki bozulmanın gerilmede önemli bir etkiye sahip olduğu ve kord-kaplama yapısının sertlik değerinin kırılmadan bağımsız olduğu tespit edilmiştir. Literatürde yer alan bir diğer çalışmada (Dong vd., 2019); farklı sıcaklıklarda karmaşık kord kauçuk kompozitin makro ve mezoskopik mekanik özellikleri incelenmiştir. Tabiatıta yer alan tüm yapılar makroskopik, mikroskobik ve mezoskopik olarak üç ana gruba ayrılır. Makroskobik yapılarda, parçacık hareketleri istatistiksel olarak tanımlanabilecek boyutlara sahiptir. Mikroskobik yapıların boyutları atomik mertebededir. Mezoskopik yapılar ise mikroskobik ve makroskobik yapıların boyutları arasındaki ara ölçüde yer alır. Kauçuk kompozit yapısının iç kısmı normal gerilmeleri ağısı yapıdadır. Anizotropik hiperelastik yapı modelinde, farklı sıcaklıklar altında karşılık gelen hiperelastik malzeme parametreleri elde edilir. Deneysel sonuçlarla tutarlı gerinim denklemleri, yüzeydeki kordun temsili hacim elemanı kauçuk kompozit oluşturulmuştur. İlgili homojenizasyon anizotropik yapısal parametreler farklı sıcaklıklarda sayısal olarak elde edilebilmektedir. Karmaşık kompozit kauçuğun mekanik özellikleri farklı sıcaklıklarda, sayısal simülasyon ve deney yoluyla karakterize edilebilmektedir. Yapılan çalışmalar, gelişmiş kord tasarımı için yol gösterici öneme sahip olan karmaşık kumaş kauçuk kompozitinin farklı sıcaklıklarda mekanik özelliklerini analiz etmede etkili bir yöntem sunmaktadır. Yapılan kord kauçuk kompozitler için mekanik özelliklerini karakterize etmede anizotropik hiperelastik modellemeler kullanılmıştır. Kordun makroskopik mekanik özellikleri sayesinde farklı sıcaklıklarda kauçuk kompozit elde edilmektedir. Anizotropik hiperelastik modelden daha sonra mezoskopik yüzey kord kauçuk kompozitinin mekanik modeli oluşturulmuştur. Farklı sıcaklıklarda homojenizasyon anizotropik yapı parametreleri elde edilmiştir. Son olarak, farklı sıcaklıklarda kordun kauçuk kompozitin mekanik özellikleri sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Kauçuk malzemenin nominal geriniminin, aynı gerinim büyüklüğü altında sıcaklığın artmasıyla arttığı görülmektedir. Yüzey kumaş kauçuk kompozitine uygulanan farklı sıcaklıklarda sayısal simülasyon sonuçlarının, deneysel sonuçlarla tutarlı olduğu görülmüştür. Ayrıca, analiz sonuçlarına göre sıcaklığın artmasıyla kord malzemesinin modülünün azaldığı görülmüştür. Sıcaklığın artmasıyla kauçuk malzemenin mekanik özellikleri artmaktadır. Kord-kauçuk yapısında, yüzey kordunun yoğun dağılımı nedeniyle, yüzey kord kompozit malzemesinin mekanik özellikleri, kauçuk malzemeye göre daha fazla etkiye sahiptir.

Silika takviyeli elastomerler, çeşitli kauçuk uygulamalarında, lastik yapısı içinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğal protein polimerinin, silika takviyeli kauçuğun mekanik özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir. Kimyasal yapıda oluşan kürlenme süresinde artan hidrolize protein eklenmesiyle çapraz bağ yoğunluğu oluşmaktadır. Alkali protein, asidik silisin vulkanizasyon üzerindeki olumsuz etkisini azaltmaktadır. Kauçuk içeren kompozit yapıların havada 200°Cye kadar stabil olduğu yapılan termal testlerde ortaya konmuştur. Silika ve hidrolize protein kauçukta tamamlayıcı bir etkiye sahiptir. Hidrolize protein partikülleri; silika ve polimer ile etkileşimlerinden dolayı silika takviyeli kauçuk kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanılmaktadır. Kauçuk kompozitlerin çapraz bağlanması sürecinde, kompozit yapıya silika ve polimer parçacıklarının eklenmesi kürlenme süresini önemli ölçüde azaltmaktadır. Yapılan çalışmalar neticesinde %20 silikanın, silika polimer partikülleri ile değiştirilmesi ile kompozit yapıda çapraz bağ yoğunluğunu önemli ölçüde artırdığı görülmüştür (Jong, 2019).

Kord-kauçuk kompozit yapısı, dögüsel yüklere maruz kaldığında kritik yorulmalar oluşabilmektedir. Tonatto ve arkadaşları yaptıkları çalışmada polyeester ve poliamid malzemede dögüsel sıkıştırma/çekme şekil değıştirme davranışını Şekil 1’de olduğu gibi incelemiştir. Çalışmada çekme kuvvetinin, frekansının ve gerinim seviyesinin izlenmesine, kontrolüne izin veren özel bir döner kasnak ekipmanı kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda hibrit kordların, polyeester ve poliamid kordlara göre daha yüksek kalıntı mukavemeti gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, kordların morfolojik analizinde, oluşan hasarın sıkıştırma gerinimine maruz kalan kordlarda mikro bükülmeden kaynaklandığı tespit edilmiştir.

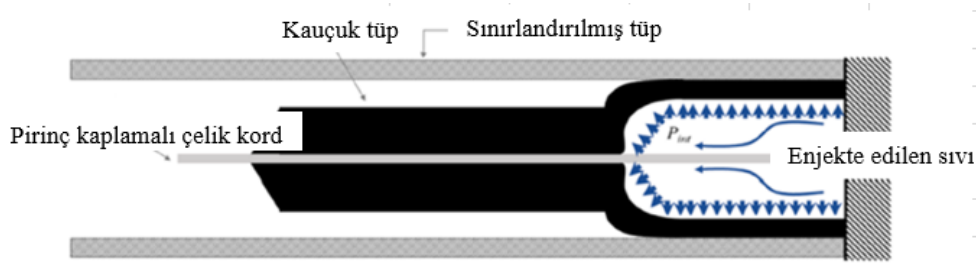


Şekil 1. Kord-kauçuk kompozit yapısı (Tonatto vd., 2017)

Literatürde, takviyeli ve düz polimer formülasyonlarının mekanik davranışı, eğilme ve basınç testleri ile çalışmalar mevcuttur. Eğilme ve basınç dayanımı iyileştirmeleri, güçlendirilmiş PM (Polymer Mortar) deneme formülasyonu için önemli bir etkiye sahiptir. Lastikte kullanılan kauçuk elyafların miktarının, mekanik özelliklerde daha yüksek artışlara sebep olabileceği düşünülmektedir (Sousa vd., 2017).

3. Kord-Kauçuk Test Yöntemleri

Kord-kauçuk kompozit yapısını analiz etmede farklı test yöntemleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Rubber Cord Adhesion Inflation Test (RCAIT) lastik kauçuk-çelik kord ayrılmasını incelemek için son yıllarda önerilen bir test yöntemidir. Kauçuk-metal yapışmasında doğrusal olmayan malzemelerin analizinde ve lastik endüstrisinde standart prosedürler olarak çeşitli kırılma mekaniği testleri önerilmiş ve kullanılmıştır. Bu testler temel olarak tel çekme testleri ve soyma testleri olarak iki gruba ayrılır. Kane ve arkadaşları Şekil 2’de görüldüğü gibi RCAIT’in testini açıklamış ve testin temsili sonuçlarını paylaşmışlardır.

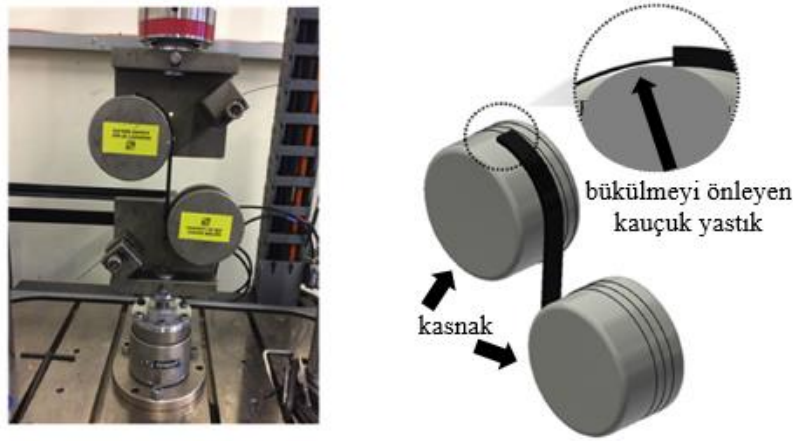


Şekil 2. Kord-kauçuk yapışma şişirme testinin şematik gösterimi (Kane vd., 2021b)

Test, iki tip kauçuk karışımı ve iki tip kord dikkate alınarak farklı sistemlerin yapışkan performansını değerlendirmek için kullanılır. Ek olarak, akışkan enjeksiyon hızının, çatlak ilerlemesini tetikleyen akışkan basıncı üzerindeki etkisi deneysel olarak değerlendirilmiştir. Yapılan deney kauçuk davranışının gerinim hızına duyarlılığı ile ilişkilidir. Bu sonuçlar, test sisteminin kapasitesini göstermektedir. Farklı kauçuk-metal kord sistemlerinin yapışkan performansını ayırt etmek ve ölçmek için RCAIT uygulanır. Özellikle kauçuk modelinde G'nin hesaplanmasına duyarlılığı ve yükleme hızının çatlak yayılımı üzerindeki etkisi konularında doğrulayıcı sonuçlar vermektedir. Test (RCAIT) sırasında meydana gelen ayrılma enerjisi G olarak ifade edilir.

Ayrıca çalışmada deneysel veriler kullanılarak kritik SERR (Strain Energy Release Rate) değeri belirtilmiştir. Daha sonra, basit bir deneysel veri setinden kauçuk ve tüp şişirme davranışını belirlemek için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Hiperelastik kalın duvarlı silindirin şişmesini tahmin etmeye yönelik ve çok çeşitli hiperelastik modellere uygulanabilen çözümleme tekniği sunulmuştur. Bu model, çatlak sırasında ölçülen durağan basıncın fonksiyonunu ortaya çıkartır. Yapılan çalışmalarda kauçuk davranış modelleme ve tanımlama test yöntemi RCAIT sırasında ortaya çıkan SERR (Strain Energy Release Rate) değerinin güvenilir bir sonucu olduğunu göstermek için tasarlanmıştır. Yapılan testte bir model oluşur ve bu model, çatlak sırasında ölçülen durağan basıncın bir fonksiyonu olarak teorik kritik SERR'yi (Strain Energy Release Rate) değerlendirmek için kullanılır.

Yorulma testi, kord-kauçuk kompozit malzemelerinden üretilen bileşenler tipik tekrarlanan yüklere maruz kaldığından, önemli bir ilgi konusu olmuştur. Literatürde yer alan çalışmada, tek bir karbon kord takviyeli hidrojene nitril üzerinde ilk yorulma testleri uygulanmıştır. Bütadien kauçuk (CC-HNBR) model kompozit, kord-kauçuk kompozitlerinin yorulma testi için rutin olarak kullanılan geleneksel kamalı çeneler ile yapılmıştır. Tao ve arkadaşları Şekil 3'te görüldüğü gibi kord-kauçuk yorulma testini uygulamışlardır. Test sırasında çekme yorulma davranışını karakterize etmek için toplam uzunluğu 240 mm olan kord-kauçuk numuneleri kullanılarak kordon uçları her bir kasnakta 2,5 tur dolanacak şekilde kullanılmıştır. Ayrıca kenar bölgelere bükülmeyi önlemek için kauçuk yastık uygulaması yapılmıştır. Malzemede oluşan deformasyon termal görüntüleme kullanılarak izlenmiştir. Meydana gelen yapı sonrasında modlar taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak analizi yapılmıştır. Test sonuçları incelendiğinde laboratuvar yorulma testi sırasında kord deformasyonunu hâkim olduğu çekme yorulma davranışı gözlenmiştir. Geliştirilen test metodolojisinin kord-kauçuk kompozitlerinin içsel yorulma davranışının karakterizasyonu için uygun olduğu görülmüştür (Tao vd., 2018).



Şekil 3. Kord-kauçuk yorulma testinin şematik gösterimi (Tao vd., 2018)

4. Kord yapısını oluşturan malzemeler

Kordun yapısını oluşturan malzemelerin seçiminde, malzemenin mekanik özelliklerinin iyi bilinmesi doğru materyali seçmede önemli bir yer tutmaktadır. Aramid elyaflar (aromatik poliamidler), yüksek performanslı mühendislik elyafları arasındadır. Poliamidler arasında yüksek mukavemet, yüksek modül, iyi ısı ve alev direnci özelliklerine sahiptir. Yüksek performanslı aramid elyafların sunduğu özellikler ve kullanıldıkları çok sayıda uygulama göz önüne alındığında, bu elyafların ileri ve modern teknolojilerde tercih sebebi olmaktadır. Akato ve arkadaşları yaptıkları çalışmada mühendislik tasarımı ve malzeme seçimi için aramid elyaflardan Kevlar, Nomex, Technora ve Twaron malzemelerinin mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Kevlar malzemesinin çok sert zincirlere sahip bir paraamid elyaf türü ve olağanüstü mekanik özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Bu özellikler, malzemenin yüksek anizotropisinden dolayı yalnızca bir yönde oluşmaktadır. Kevlar yapısının aksine, Nomex ise tamamen aromatik bir poliamid yapıya sahiptir. Nomex aleve veya yüksek ısı kaynağına maruz kaldığında termal ve boyutsal olarak

kararlı bir yapı gösterir. Technora ise kopolimer zincirlerinin daha yüksek esnekliği ile bilinmektedir. Diğer aramid elyaflara göre gevşek kristal yapısı nedeniyle daha düşük kristallığe sahiptir. Twaron, yüksek performanslı elyaflar arasında yoğunluk değeri en yüksek olan malzemedir. Diğer önemli özelliği ise yanma ve erimeye karşı diğer elyaflara olan üstünlüğüdür. Kevlar ve Nomex'e ile kıyaslanan mekanik özelliklere ve maliyet etkinliğine sahip alternatif elyafları değiştirmek için kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Moleküler ağırlık, diğer birçok faktörden etkilendiğinden, özellikle iyileştirilmesi açısından birçok araştırmaya konu olmuştur (García vd., 2010). Örneğin; sert çubuk polimerden elde edilen ve Magellan Systems International tarafından üretilen M5 elyafları yüksek basınç dayanımına sahiptir. Literatürde yer alan çalışmalarda iki hidroksil grubu tarafından oluşturulan hidrojen bağları Kevlar'ın basınç dayanımının iyi olmaması, sınırlama faktörleri ve onu iyileştirme çabaları bilinmektedir. Yeni yüksek performanslı elyafların bir başka örneği, ticari olarak Zylon olarak bilinen poli (p-fenilen-2,6 benzobisoksazol - PBO)'dur. Yanabilirlik verileri, PBO'nun tutuşma süresinin Twaron'dan üç kat, Nomex'den dört kat daha iyi olduğunu göstermektedir. Minimum ısı yayma oranına sahip Nomex'in bu özellikleri PBO elyafların olağanüstü elastisite modülü ve çekme mukavemeti sağlar. Polyester bazlı elyaflar, kabul edilebilir gerilme modülüne sahip aramid elyaflara kıyasla maliyet açısından tercih sebebidir. Tablo 1'de mekanik özelliklerine göre yüksek performanslı aramid malzemeler kıyaslanmıştır.

Tablo 1. Yüksek performanslı elyafların mekanik özelliklerinin karşılaştırması (Akato & Bhat, 2017)

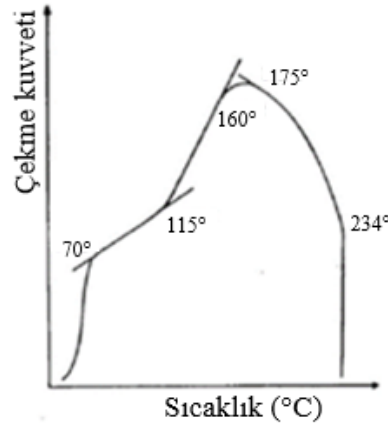
Özellik	Kevlar	Nomex	Technora	Twaron
Yoğunluk (g/cc)	1.44	1.38	1.39	1.45
Su kullanım hızı / nem oranı (%)	3.9	5.2	4.0	5.01
Gerilme (GPa)	2.9-3.0	0.59-0.86	3.4	2.4-3.6
Elastisite Modülü (GPa)	70-112	7.9-12.1	72	60-120
Uzama (%)	2.4-3.6	20-45	4.6	2.2-4.4
Yanıcılık (O ₂ index)	29	29	25	29-37

Naylon elyafların, kimyasal yapılarındaki poliamid bağları arasındaki hidrojen bağları sayesinde moleküller arası çekimlerde kuvvetli elyaflar oluşturmaktadır. Hidrojen bağları malzemenin iç yapısında çekirdeklenme bölgeleri oluşturmaktadır. Naylonların geçiş sıcaklığı 40°C ile 60°C arasındadır. Naylon elyafların gerilme miktarı termo mekanik analiz ile tespit edilmektedir. Naylon elyaf üretiminin çoğunu Naylon-6 ve Naylon-66 reçineleri oluşturur. Naylon elyaflar birçok alanda kullanılmaktadır. Halılar, tekstiller, iplikler, misinalar ve lastik kordları gibi birçok uygulamada bulunur. Naylon elyaflar, sürekli organik yapıdadır. 1947 yılından günümüze ticari lastiklerde kullanılmaktadır. Nylon ve polyester malzemeler diğer elyaflara göre nemden daha az etkilenmektedir. Kevlar malzemesine göre Nylon-66 ve polyester daha düşük maliyetlere sahiptir. Polyester ve Nylon-66 malzemelerinin olumsuz yanı ise diğer elyaflara göre yüksek sıcaklık değerlerinde daha çok kısalmalarıdır.

Tablo 2. Lastik kordlarında kullanılan elyaf malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırması (DuPont, 1971)

Özellik	Kevlar49	Nylon-66	Polyester	HS Polyethylene
Yoğunluk (lb/in)	0.052	0.042	0.050	0.065
Çekme kuvvetine karşı direnç (10 ³ psi)	435	143	168	375
Elastisite Modülü (10 ⁶ psi)	16.3	0.8	2.0	17
Kopma anında uzama (%)	2.4	18.3	14.5	3.5
Kopma esnekliği (10 ⁶ in)	8.37	3.4	3.36	10.7
Ayrışma Sıcaklığı (°C)	472-482	254	256	149

Judovits ve arkadaşları yaptıkları çalışmada diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı (DSC) ile Naylon-6.6 malzemesinin sıcaklık ve çekme kuvveti ilişkisini incelemiştir. Polimer yapılarında olduğu gibi Nylon-6.6 malzemesi de sıcaklık ve çekme kuvveti etkisiyle uzama davranışı göstermektedir. Şekil 4'de görüldüğü gibi Nylon-6.6 malzemesi 70°C'ye kadar yüksek bir çekme oranına sahiptir. 70°C ile 115°C aralığında ise daha yavaş bir çekme oranı olduğu görülmüştür. Plastik şekil değişimi ise 175°C'den 234°C'ye kadar izlenmiştir. Bu durum naylon elyafların kristal boyutları ile ilişkilidir. Termal analiz test sonuçları; malzeme içeriğindeki daha düşük naylon sayısının, malzemede daha yüksek erime noktasına neden olduğunu göstermektedir. Diğer yapılan testlerde ise tek sayılı naylonların, sıralı çift sayılı naylonlara kıyasla daha yüksek bir erime noktasına sahip olduğu kanıtlanmıştır.



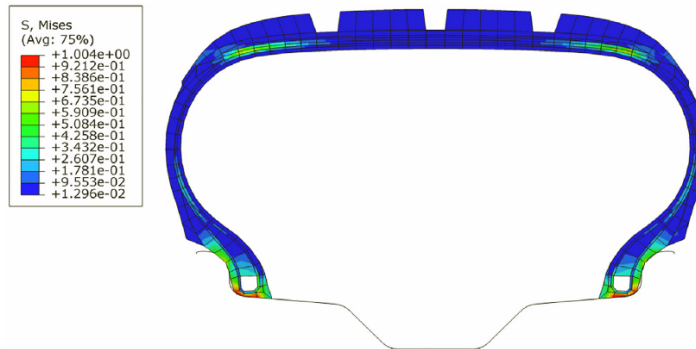
Şekil 4. Naylon-6.6 sıcaklık ile çekme kuvveti ilişkisi (Judovits, 2020)

Elastomer malzemelerin molekülleri zincire benzer yapıdadır. Molekül yapısı ısıya maruz kaldığında vulkanizasyon etkisiyle kimyasal değişim meydana gelir. Elastomerlerin mekanik yapısı ve performansında vulkanizasyon prosesi önemli bir etkiye sahiptir. Vulkanizasyon, çapraz bağlanma etkisiyle kauçuğun yapısında kimyasal olarak geri dönüşümsüz elastik özelliklerde bir yapı oluşmasıdır. Lastik yapısında sırt kauçuğu vulkanizasyonunun özellikle arazi (OTR) lastikleri için önemli olduğu bilinmektedir. Zirai alanda bulunan anızlar kesilme, kopma gibi araç lastiklerine zarar verebilmektedir. Dolayısıyla zirai araç lastikleri anız direncine karşı dayanıklı olmalıdır. Literatürde yapılan çalışmada, lastik sırt vulkanizasyon işleminin anız direnci üzerinde, kısa aramid elyafı ve iki farklı reçinenin etkisi incelenmiştir. Lastik yapısı içinde aramid elyaf oranının artırılması bileşiğin modülünü artırdığını ortaya çıkarmıştır. Reçine dolgulu bileşimler, esnek bir yapıda olduğu için zincir oryantasyonu yoluyla lastik üzerindeki gerinimi dağıtmaktadır. Elyaf dolgulu bileşimler ise reçine dolgulu bileşimlere göre daha iyi kesilme direnci göstermiştir (Saha vd., 2021).

Literatürde yerini alan bir diğer çalışmada, yüksek performanslı elyaflardan kevların anti-darbe mekanizmasını araştırılmıştır. STF (Shear Thickening Fluid) emdirilmiş Kevlar (STF/Kevlar) kumaşın mekanik özelliği ve enerjiyi absorbe etme gücü Hopkinson basınç çubuğu (SHPB) sistemi kullanılarak yüksek gerilme hızında gerçekleştirilmiştir. STF kumaş numunesinin sayısı ve darbe hızının, STF/Kevlar kompozit yapısının mekanik performansını etkilediği görülmüştür. Çalışmanın sonucunda, STF kumaşının yüksek viskozitesi nedeniyle kumaş iplikleri arasındaki sürtünmeyi artırdığı görülmüştür (Cao vd., 2017).

5. Sonlu elemanlar yöntemi ile lastik yapısının incelenmesi

Lastik iç yapısının incelenmesinde ve lastik hareketini tahmin etmede sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılmaktadır. Bilindiği gibi lastikler, güçlendirilmiş elastomerlerden yapılmış kompozit bir yapıya sahiptirler. Lastik ve benzeri kompozit yapıların performansını tahmin etmede sonlu elemanlar analizi zaman ve maliyet açısından avantaj sağlamaktadır. Bu analizleri doğrulamak için lastik bileşenlerinin mekanik davranışını tanımlamada seçilen malzeme modellerinin geçerli olması gerekmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda, lastik kompozit yapısının malzeme modellemesinde, Yeoh ve Marlow gibi çeşitli malzeme modelleme analizleri kullanılmaktadır. Korunovic ve arkadaşları Şekil 5'de gösterildiği gibi doğrusal olmayan malzeme modellerinden Marlow modelinin avantajlarını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir.

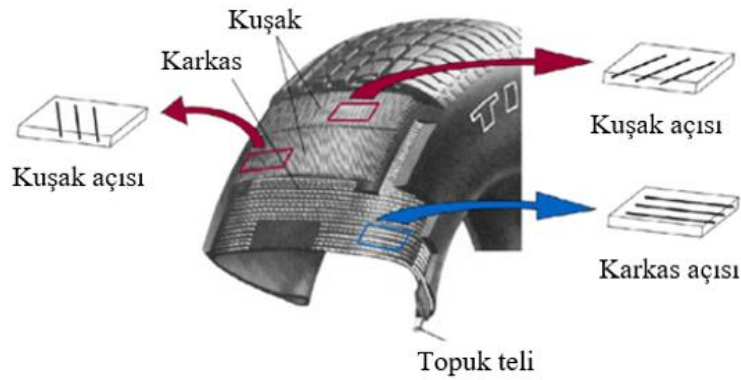


Şekil 5. Marlow malzeme modellemesi ile lastikte gerinim analizi (Korunović vd., 2019b)

Sonlu elemanlar analizinde; Yeoh modeli kullanılarak elde edilen gerilme değerleri ile Marlow modeli kullanılarak elde edilen gerilme değerleri kıyaslandığında fark %50 kadardır. Bu farkın komşu karkasın farklı bir davranışından kaynaklandığı analiz

edilmiştir. Marlow malzeme modelinde tek eksenli hacimsel davranışı tanımlayan test verisi ile analiz yapılmıştır. FEA(Finite Element Analysis) yazılımında malzeme modeli parametreleri doğrudan belirtilebilir veya yazılımın uygun matematiksel değerleri otomatik olarak seçmesi sağlanabilir. Lastikler araç altında genellikle tek eksenli gerilmeye maruz kalırlar. Bu nedenle Marlow modelinde girdi olarak yalnızca tek eksenli test verileri kullanılır. Yeoh modelinde benzer şekilde tek eksenli davranış incelenmiştir. Yeoh yazılımında Marlow'a benzer şekilde malzeme katsayılarını programa tanımlayabilir veya programın otomatik olarak belirlemesi sağlanabilir. Tek eksenli Marlow modeli test verilerini doğru bir şekilde takip ettiği için en doğru sonuçları verdiği değerlendirilmiştir. Günümüzde sonlu elemanlar analizi yardımıyla lastik kord modelleri, lastiklerin ayrıntılı analizi ve kord modellerinin performansını doğrudan karşılaştıran çalışmalar yapılmaktadır. Aramid kordlar, çelik kordlara alternatif olarak hafiflik avantajı ile tercih sebebidir.

Literatürde, lastik yapısının doğrusal olmayan ve doğrusal kord malzeme modellemesi yöntemi kullanılarak analizi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Gerçekçi bir lastik modeli üzerinde gerçekleştirilen örneklerle FEA kullanılarak lastik kordu modellemesi ve ilgili temel ilkelerin yanı sıra, lastik kordunun tipik mekanik özellikleri açıklanabilmektedir. Doğrusal malzeme modelleme, basit ve hızlı hesaplama yöntemi ile yapısal analizi ortaya çıkarmaktadır. Fakat kordun doğrusal olmayan davranışını analiz etmede bu yöntem yetersiz kalmıştır. Yeoh modellemenin; düzgün uyum sağlayan eğrileri, doğrusal olmayan davranış gösterdiği görülmüştür. Ancak sıkıştırma lastik kordunun gerilme-gerinim eğrisinin spesifik şeklini doğru bir şekilde tahmin edemediği görülmüştür. Marlow modelleme ise yalnızca gerinim verilerine dayalı olarak doğru veriler ortaya koymaktadır. Marlow modelleme, daha fazla hesaplama kaynağına ihtiyaç duymaktadır. Marlow model parametrelerinin tanımlanması sırasında verileri sadeleştirme seçeneğinin kullanılması, lastik FEA'nın hesaplama verimliliğinde önemli gelişmeler sağlamıştır. Bu nedenle, lastik modellemesi için yapılan hesaplamalarda doğrusal olmayan kord malzeme modellerinin kullanımı önemli bir etkiye sahiptir. Radyal yapıda bir otomobil lastiğinde Şekil 6'da görüldüğü gibi karkas, topuk teli, kuşak temel bileşenleri bulunmaktadır. Lastik gövde katlarında genellikle nylonndan yapılmış tek filamentli kord yapısı kullanılır.



Şekil 6. Radyal lastiğin yapısal bileşenleri (Korunović vd., 2019b)

Sonlu elemanlar yöntemi ile bir başka çalışma konusu da yol teması olmayan lastiklerde davranış modellemesi olmuştur. Araştırmacılar tarafından seçilen kamyon lastikleri 9.00R20 ve 9.00-20 için karmaşık sonlu eleman modelleri geliştirilmiş sonlu elemanlar modellemesi üzerine çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada; lastiklerin radyal titreşimleri için rezonans frekanslarının değerleri elde edilmiştir. Rezonans frekans değerleri yardımıyla lastiklerin radyal model davranış üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, rezonans frekansları ve mod sırası arasındaki ilişki neticesinde radyal lastiğin birinci dereceden frekansı dışında yarı doğrusal olduğu görülmüştür. Yol temasının olmadığı, lastiklere şişirme basınçları uygulanan durumda iki farklı lastik yapısı radyal ve çapraz konstrüksiyonda rezonans frekans değerleri karşılaştırılmıştır. Çapraz konstrüksiyona sahip olan lastiğin, artan dikey sertlik nedeniyle daha yüksek rezonans frekans değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir (Moiescu vd., 2018).

Gupta ve arkadaşları (Gupta vd., 2021) yaptıkları çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi ile kauçuk lastik – ray temas davranışının sayısal analizini yapmışlardır. Çalışmada ANSYS yazılım programı aracılığıyla sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Yapılan çalışmanın amacı sonlu elemanlar analizi yapmak, şişirme basıncını değiştirerek lastik ve janttaki eşdeğer gerilme verilerinin belirlenmesidir. Von-Mises gerilmeleri yorumlanarak kauçuk lastik – ray arasındaki eşdeğer sürtünme gerilmeleri analiz edilmiştir. Sonlu elemanlar modellemesi ile elde edilmiş sonuçlar, lastiğin modelini doğruladığı belirlenmiştir. Ayrıca analiz verilerine göre gerilmelerin ve deformasyon değerlerinin mühendislik değerleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Sonlu elemanlar yöntemi ile lastik zemin davranışının incelenmesi literatürde bir başka araştırma konusu olmuştur. Yapılan çalışmada lastikte güç kaybı olduğunda, lastiğin şişirme basıncına ve toprak nem içeriğine etkisi araştırılmıştır. Buna ek olarak lastikteki güç kaybını analiz etmek için lastik-zemin etkileşiminin sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Çalışmanın sonucunda lastik üzerindeki dikey yükün artmasının lastiğin toprakla temas hacmini artırdığı ispatlanmıştır. Ayrıca lastik üzerinde oluşan dikey

yüklerin, kayma yüzdesini azaltmada ve yuvarlanma direncini artırmada etkili olduğu görülmüştür (Farhadi vd., 2020). Binek araç lastiklerinde yuvarlanma gürültüsü değeri dB birimi cinsinden lastik etiketinde bulunmak zorundadır. Lastik yuvarlanma gürültü değeri aralığı uluslararası lastik otoriteleri tarafından belirlenmiştir. Örneğin; düşük ses seviyesinde çalışan lastiklerde bu değer 67-71 dB gürültü aralığındadır. Literatürde, sonlu elemanlar yöntemi ile lastik yuvarlanma gürültüsünün simülasyonu üzerine çalışmalar yapılmıştır. Lastiklerden yayılan gürültünün analizi için fiziksel tabanlı bir hesaplama modeli oluşturulmuştur. Lastik dinamiği ve ses radyasyonunun incelenmesi için temel sayısal yöntemlerin kullanılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Oluşturulan hesaplama modeline ek olarak, lastik/yol sisteminin ayrıntılı bir analizi, lastiğin yapısal parametreleri, sürüş hızı, yol pürüzlülüğü, vb. tüm bileşenlerin doğru bir şekilde tanımlanması gerekliliği değerlendirilmiştir (Farhadi vd., 2020).

6. Kord-kauçuk kompozitleri için yapısal model oluşturma

Kompozit yapılarda yapısal modelleme ile malzemenin mekanik davranışları tahmin edilebilmektedir. Farklı çalışma koşullarında, doğrusal olmayan anizotropi ile kauçuk malzemenin mekanik davranışlarını karakterize etmek için, kauçuk ve kord arasındaki etkileşime yapısal bir model geliştirilmiştir. Toplam gerinim enerjisi üç parçaya ayrıştırılır. Kauçuktan, korddan ve kauçuk ile kord arasındaki etkileşimden gelen gerinim enerjisidir. Parçacık sürüşü optimizasyonu ve Newton yineleme yöntemine dayalı olarak, model parametreleri için bir optimizasyon algoritması önerilmiştir. Parçacık sürüş optimizasyonu bir problemi çözebilmek amacıyla sürüşteki her bir parçayı çözüm olabilecek şekilde değerlendirir. Sürüşteki en iyi sonucu veren parçacık, sürüşün içinde en iyi olarak tanımlanır. Newton yineleme yöntemi ise sonuca ulaşabilecek gerçek köke yakın bir değeri tahmin ederek başlar. Sonrasında ise karmaşık fonksiyon ve denklemler ile sistem genişletilerek devam eder. Elde edilen parametreler ile kauçuk-kord kompozitlerinin mekanik davranışları geliştirilen model ile tahmin edilmekte ve tahmin sonuçları test verileri ile iyi bir uyum göstermektedir. Bilim insanları tarafından önerilen model, sonlu eleman simülasyon sonuçları ile kauçuk-kord kompozitlerinin tek eksenli gerinim verilerinin karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır (Zhao vd., 2020b).

Kord-kauçuk kompozit yapısının kırılma duyarlılığı üzerindeki etkisini belirlemek için farklı tipte çelik kord takviyeleri kullanılmaktadır. Kırılma duyarlılığı, malzemenin çekme kuvvetine maruz kaldığında göstermiş olduğu tepki olarak tanımlanır. Elastomerler düşük elastisite modülüne sahip kauçuklardan meydana gelir. Bu elastomer yapılar farklı tipte çelik kord takviyeleri ile güçlendirilmiş yapı elde edilebilir. Örneğin; 3+7*0.22 çelik kord takviye yapısı yedi adet 0.22mm çapında üç demet teli ifade eder. Günümüzde kullanım amacına göre farklı tipte çelik kord takviyeli yapılar tercih edilebilir. Çelik kord takviye yapısının analizinde Neo-Hooke malzeme modeli geniş uygulanabilirliği ve düşük sayıda malzeme parametresi girdisi nedeniyle tercih sebebi olmaktadır. Neo-Hooke modelinde malzemenin gerinim-gerilim tepkisini tespit etmek için enerji fonksiyonu kullanılır (Eşitlik 1) (Popa vd., 2020).

$$\psi(\bar{\mathbf{b}}) = \frac{\mu}{2} \cdot \left(I_{\bar{\mathbf{b}}} - 3 \right), \quad (1)$$

Modelde μ : kayma modülü, $I_{\bar{\mathbf{b}}}$: Cauchy-Green sabiti, $\bar{\mathbf{b}}$: Kirchoff gerilim değerini ifade eder. Cauchy-Green sabiti, malzemenin hareketiyle ilgili nicelik değeridir. Malzeme hareket alanını sağ ve sol olarak tanımlar. Kirchoff gerilim değeri malzeme davranışını simetrik olarak kabul etmez, asimetric yapıda malzeme hareketlerini ifade eden indeks değeridir.

Kompozit, bükülmüş takviye kordlarının karmaşık geometrisini belirlemek için genişletilmiş sonlu elemanlar yöntemi kullanılabilir. Malzeme yapısına göre modelleme yapılırken basit bir sayısal algoritma oluşturma önemlidir. XFEM (Extended Finite Element Method), yardımcı ile kord üretim tekniği ve malzeme kuvveti konseptine dayalı bir yapı oluşturulabilir. Günümüzde araştırmacılar kord takviyesi tipinin kompozitin genel kırılma davranışı üzerindeki etkisini belirlemek için yerel modellerle statik analizler yapmaktadırlar. Doğrulanmış deneyler ve verilerle problemi analiz etmek için yapısal model oluşturma iyi bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır.

Araç lastiği kordlarının şekillendirme sırasındaki mekanik davranışlarını anlamak için birçok araştırma yapılmıştır. Barry ve arkadaşları (Barry vd., 2020) yaptıkları çalışmada, şekillendirme işlemi sırasında örgülü bir kordun mekanik davranışına katkıda bulunan faktörleri incelemişlerdir. Malzeme özellikleri LS-DYNA programı ile modellenmiş olup ortotropik malzeme modelinin eksenel çekme testi yapılmıştır. Elde edilen veriler deneysel verilerle karşılaştırılmış gerçek test sonuçlarının deneysel verilerle iyi bir ilişki içinde olduğu tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, deneyde meydana gelen düşük gerinimlerdeki doğrusal olmayan verilerin, doğrusal malzeme modelleme ile elde edilemeyeceği ispatlanmıştır.

Kord takviyeli kauçuk kompozitlerin anizotropik hiper-viskoelastik davranışları literatürde araştırma konusu olmuştur. Yapılan çalışmada, ağısı kumaş takviyeli kauçuk kompozitler için anizotropik hiper-viskoelastik yapı modeli geliştirilmiştir. Yapı modeli oluştururken sıcaklığın etkisi de dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda, kord takviyeli kauçuk kompozitlerin farklı sıcaklıklarda hiperelastik ve viskoelastik davranışlarını karakterize etmede etkili bir model sunmuşlardır (Yang vd., 2018). Malzeme davranışını

tahmin etmede hiperelastik modelin gerçeğe yakın sonuçlar ortaya çıkardığı gösterilmiştir. Kauçuk kompozitlerin viskoelastik davranışını temsil eden matematiksel model Prony serisi Eşitlik 2’de görülmektedir (Yang vd., 2018).

$$W_{hyperelastic} = C_{10}(I_1-3) + C_{01}(I_2-3) + \frac{k_1}{2k_2} \sum_{j=4,6} \left[e^{k_2(I_j-1)^2} + \frac{k_2}{4}(I_j-1)^2-1 \right] \quad (2)$$

Viskoelastik davranış eşitliğinde C_k , g_i , malzeme sabit değerlerini ifade etmektedir, τ_i malzemenin gevşeme süresidir. N Prony serisindeki terim sayısıdır. Viskoelastik davranışı temsil eden malzeme modeli Prony serisinde sıcaklık etkisi dikkate alınmamıştır. Kauçuk kompozitlerin hiperelastik davranışının matematiksel modellemesi Eşitlik 3’te belirtilmiştir (Yang vd., 2018).

$$C_k(t) = C_k^0 \left[1 - \sum_{i=1}^N g_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \right] \quad (3)$$

$$C_k^\infty = C_k^0 \left(1 - \sum_{i=1}^N g_i \right)$$

Hiperelastik davranış eşitliğinde C_{10} , C_{01} , g_i malzeme sabiti değerlerini, k_1 , MPa biriminde gerilmeyi ifade ederken k_2 ise boyutsuz bir parametre değeridir.

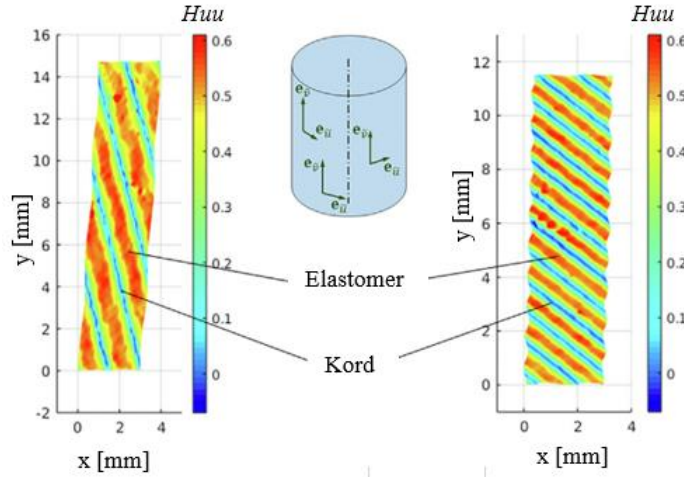
Literatürde yer alan bir diğer çalışmada kord kauçuk contanın kesit şekli tasarlanmış ve optimize edilmiştir. Kord kauçuk contanın temel performansına göre optimizasyon kısıtlamaları değerlendirilmiştir. Optimizasyon hedefi ve ilgili hesaplama yöntemleri çapraz kordun kauçuk contanın kesit şekilleri, gaz basınç farkları, sıcaklıklar ve çok amaçlı optimizasyon tasarımı altında elde edilmektedir. Sonuçlar şekil optimizasyon yönteminin, kord kauçuk contanın tasarımı ve üretimi için önemli bir kılavuza sahip olduğunu göstermiştir (Dong vd., 2021).

7. Kord-kauçuk yapışma analizi

Kauçuk kaplı kumaşlar, işlenebilirlik kabiliyetleri ve mekanik özellikleri nedeniyle birçok alanda tercih sebebi olmaktadır. Kauçuk kaplı bir kumaşın yapışma mukavemetinin iyileştirilmesi, kuru üç bileşenli bir sistemin hidratlı silikat (HRH), nitril kauçuğun (NBR) bir naylon korda yapışması üzerindeki etkisi Darwish ve arkadaşları tarafından incelenmiştir (Darwish vd., 2000). Literatürde yer alan çalışmalarda polyesterin hidrofobik doğası nedeniyle etilen propilen dien monomer (EPDM) ve polyester kumaş arasındaki yapışma mukavemetinin düşük olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca uzun yağlı alkid reçinesinin (LAR) EPDM kauçuk ve polyester kumaş için en iyi yapışma artırıcı olduğunu bilinmektedir. Bununla birlikte, LAR kullanımı, yüksek gaz geçirgenliği, düşük termal kararlılık, yüksek yanıcılık ve ultraviyole (UV) ışınlar karşı bozulmasına karşı düşük direnç gibi bazı dezavantajları vardır. Polimerin üstün bariyer özellikleri, alev geciktiriciliği vb. özellikleri mevcuttur. Morfolojik çalışmalara dayanarak, nano dolgu maddelerinin bir polimer matrisi içine dağılmasında iki farklı faz bulunmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda; nano kilin hidrofobik bir EPDM elastomeri ile uyumsuzluk gösterdiği bildirilmiştir. Bu nedenle, EPDM ve nanokil arasındaki daha iyi etkileşim için, polimerin maleik anhidrit ile aşılması gerektiği ortaya konmuştur. Lastiğin yapısındaki kauçuk ile metal kordlar arasındaki yapışma önemli bir etkiye sahiptir. Kauçuk-metal yapışmasını değerlendirmek için kullanılan standart testler, lastik yapısının iç ara yüzey davranışını tahmin etmede yetersiz kalmaktadır.

8. Kord gerinim analizi

Kord ve elastomer malzemeler yük altında farklı mekanik gerinim özelliklerine sahiptirler. Poliamid kord takviyeli kord-kauçuk kompozitlerini kapsayan bir çalışmada; Lehmann ve arkadaşları numunelere iç basınç, sıkıştırma ve burulma içeren bir yükleme prosedürü uygulaması ile kord-kauçuk gerinim analizi yapmışlardır (Lehmann&Ihlemann, 2020). Numunelerin yüzeyindeki deformasyon analizleri Şekil 7’de görüldüğü gibi 3D dijital görüntü korelasyonu uygulanmıştır.



Şekil 7. Gerinim dağılımı (sol: kord açısı 10° / sağ: kord açısı 35°) (Lehmann&Ihlemann, 2020)

Teğetsel gerinim değerleri, DIC (Dijital Image Correlation) nokta verilerinin B-spline yaklaşımı kullanılarak özel bir değerlendirme prosedürü ile belirlenmiştir. Yapılan deneyler neticesinde kord ve elastomer bölümleri arasında büyük gerinim farklılıkları olduğu analiz edilmiştir.

Tekstil kordların üretimi sırasında kord üzerinde çözülme gerinimi meydana gelir. Üretimde meydana gelen bu gerinim, kordun fiziksel, büzülme özelliklerini ve yapışma performansını etkiler. Ayrıca, kord geriniminin lastik homojenliği üzerinde etkisi olduğu da bilinmektedir. Lastik endüstrisinde en yaygın kullanılan tekstil malzemeler poliamid, polyester, aramid ve rayondur. Elyaf uygulamaları ve aromatik poliamidler veya alifatik poliamidler olarak sınıflandırılabilir. PA6.6 (POLIAMID 6.6) en çok kullanılan yüksek modüllü, düşük modüllü çeşitleri ile yorulmaya dayanıklı ve yapışkan sentetik ipliktir. Kordların kullanım amacı hasarlara ve yorulmaya karşı direnci arttırmaktır. Herhangi bir tekstil malzemesinin işlenmesinde gerinim en önemli parametrelerden birini temsil etmektedir.

Literatürde tekstil kordların üretim sürecinde oluşan çözülme kuvveti değerleri üzerine çalışma yapılmıştır. Çalışmada 0.27m çapında poliyamid kord malzemeleri iki grup halinde bobine sarılmıştır. Test çalışması iki grup halinde yapılmış ve farklı çekme kuvvetleri uygulanmıştır. Kordun çözülme kuvveti değerlerini elde etmek için test makinesindeki kelepçelere kord numuneleri bağlanarak tekstil kordlar kopana kadar çekme kuvveti uygulanmıştır. Test sonucunda birinci grup altı adet kord numunesinin ortalama çözülme kuvveti değerinin 14,17 N olduğu görülmüştür. İkinci grup tekstil kordlarda dört adet numunenin ortalama çözülme kuvveti değerinin ise 21.32 N olduğu görülmüştür. Birinci grup için 14,17 N ortalama kord çözülme kuvveti için küçük şerit üzerindeki kauçuk boşluklar tespit edilmiştir. İkinci grup için ise 21,32 N'luk çözülme kuvveti değerlerine ulaşıldığında ise özellikle şerit uçlarında kauçuk kopmaları meydana geldiği tespit edilmiştir (Costa vd., 2019).

9. Lastik konstrüksiyonu ve şişirme basıncının lastik zemin temasına etkisi

Araç lastiklerinde zeminle temas eden yüzey, lastiğin sırt bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Zeminle direk temas halinde olan sırt bölgesinin kimyasal bileşimi, konstrüksiyon yapısının lastiğin mukavemetinde etkisi büyüktür. Lastik şişirme basınç değeri de lastiğin zeminle temasını doğrudan etkileyen parametredir. Araç lastiklerinde ideal lastik kullanım basıncı değeri lastik yüzeyinde belirtilmektedir. Bazı araçlarda bu değer kapı iç kısmında bulunmaktadır. Lastik basınç değeri, aracın taşıma kapasitesi, aracın maksimum ulaşabileceği hız vb. parametreler dikkate alınarak belirlenmektedir. Literatürde lastik şişirme basıncının lastiğin zeminde bıraktığı iz (taban izi) ile ilişkisini inceleyen çalışmalar mevcuttur. Damme ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, modern geniş konstrüksiyona sahip lastiklerin düşük şişirme basıncı altında toprak zeminde bıraktığı izi incelemişlerdir. Lastik ve zemin arasındaki etkileşim zemin üzerinde oluşan gerinim dağılımı için önemlidir. Çalışmada benzer boyutlara sahip üç tip geniş, düşük şişirme basınçlı lastiğin zemin üzerinde oluşturduğu iz (taban izi) profili incelenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında taban izinin belirli lastik yapısından etkilenmediği görülmüştür. İkinci aşamada ise lastik için önerilen en düşük şişirme basıncında test yapılmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise benzer çekiş gücüne sahip lastiklerin farklı ağırlık ve çekiş gücü altında testleri yapılmıştır. Test sonuçları değerlendirildiğinde, lastik konstrüksiyon yapısının lastiğin zemin üzerinde bıraktığı izde sınırlı bir etkisinin olduğu görülmüştür. Lastik merkez bölgesi altında hiçbir fark olmadığı fakat arka akstaki lastiklerde +0,2m derinlikte +0,3m taban izi farkı olduğu test edilmiştir. Lastik yükünün azaltılması ve buna bağlı düşük şişirme basıncının zeminde oluşan taban izinde küçülme analiz edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, toprak gerilmesini azaltmak için lastik tasarımının ve kullanımının geniş bir temas alanına sahip olması gerektiği, lastikte düşük şişirme basıncında çalışması gerektiği değerlendirilmiştir (ten Damme vd., 2020). Günümüzde zirai alanda ağır tonajlı tarım makinelerinin kullanımı, toprak zeminde istenmeyen büyüklükte sıkıştırmaya sebep olabilmektedir. Bu

durum zirai mahsuller için bir risk oluşturmaktadır. Lastik ile zemin arasındaki temas, gerinme dağılımı kontrol altında olmalıdır. Lastiği oluşturan bileşenler ve konstrüksiyon yapısı özellikleri toprak gerilmesini etkilemektedir. Benzer yapıda olan lastikler incelendiğinde; yeni lastiğin eski lastiğe (kullanılmış lastik) oranla toprak sıkıştırma miktarının daha az olduğu ispatlanmıştır. Benzer boyutlara ve şişirme basınçlarına sahip ancak farklı yapıya sahip lastikler için toprak sıkıştırma miktarının farklı olacağı değerlendirilmiştir. Oluşan toprak gerilmesinin lastiğin genişliği, uzunluğu ve şişirme basıncıyla ilişkili olduğunu bilinmektedir. Ayrıca zemindeki gerilme dağılımının; lastik konstrüksiyon yapısı çapraz, radyal gibi belirli lastik yapısıyla veya bir lastiğin çelik kuşaklı olması durumuyla ilgili olduğu düşünülmektedir (ten Damme vd., 2019).

Günümüzde lastik zemin arası gerilme dağılımını FRIDA modeli yardımıyla analiz etmek mümkündür. FRIDA modellemesinde lastik zemin temas alanı elips bir yapı olarak değerlendirilir ve bu yöntemle lastik zemin teması ilişkisinin doğru bir şekilde tanımladığı görülmüştür. Schjønning ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, FRIDA modelleme yardımıyla iki farklı yapıda olan; çekiş gücü yüksek (traction) ve standart tarım uygulamaları (implement) lastiklerin zemin temasını incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda, tavsiye edilen şişirme basıncında çekiş gücü yüksek lastiklerin yüzey teması %14 iken, standart tarım uygulamaları (implement) lastiklerin zemin yüzey temasının %18 olduğu görülmüştür (Schjønning vd., 2015).

10. Sonuç

Bu çalışmada, kord-kauçuk kompozit malzemelerin araç lastikleri konstrüksiyon yapısı ve lastik davranışına etkisi konularında yapılan çalışmalar incelenmiş ve sonuçları derlenmiştir. Lastik yapısında kritik öneme sahip olan kord-kauçuk kompozit yapısının analizinde kullanılan test yöntemleri incelenmiştir. Test sonuçları incelendiğinde kauçuk içeren kompozit yapıların havada 200°Cye kadar stabil olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca silika ve hidrolize proteinin kauçukta tamamlayıcı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Günümüz lastik teknolojisinde hidrolize protein partikülleri; silika ve polimer ile etkileşimlerinden dolayı silika takviyeli kauçuk kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanılmaktadır.

Literatür çalışmaları incelendiğinde sonlu elemanlar yöntemi ile lastik yapısının incelenmesinde Yeoh ve Marlow gibi çeşitli malzeme modelleme analizlerinin kullanıldığı belirtilmiştir. Marlow modeli test verilerinin doğru sonuçları verdiği değerlendirilmiştir. Günümüzde sonlu elemanlar analizi yardımıyla lastik kord modelleri, lastiklerin ayrıntılı analizi ve kord modellerinin performansını doğrudan karşılaştıran çalışmalar yapılmaktadır. Literatürde tarım faaliyetlerinde kullanılmakta olan lastiklerde şişirme basıncının lastiğin zeminde bıraktığı iz (taban izi) ile ilişkisini inceleyen çalışmalar mevcuttur. Damme ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, modern geniş konstrüksiyona sahip lastiklerin düşük şişirme basıncı altında toprak zeminde bıraktığı izi incelemişlerdir. Zirai lastik kullanımında, toprak gerilmesini azaltmak için lastik tasarımının ve kullanımının geniş bir temas alanına sahip olması gerektiği, lastikte düşük şişirme basıncında çalışması gerektiği değerlendirilmiştir. Zirai lastik üreticilerinin, düşük maliyet, zeminde daha geniş taban izi, düşük basınçta daha fazla yük taşıyabilmek amacıyla IF (Improved Flexion) ve VF (Very High Flexion) lastikler üzerinde arge çalışmalarının yapılması gerekliliği değerlendirilmiştir.

Referanslar

- Akato, K., & Bhat, G. (2017). High performance fibers from aramid polymers. In Structure and properties of high-performance fibers (pp. 245-266)
- Barry, C., Panerai, F., Bergeron, K., Stapleton, S. & Sherwood, J., (2020). Mesomechanical Modeling of Braided Cords. *Procedia Manufacturing*, 47 162-168.
- Cao, S., Chen, Q., Wang, Y., Xuan, S., Jiang, W. & Gong, X., (2017). High Strain-Rate Dynamic Mechanical Properties of Kevlar Fabrics Impregnated with Shear Thickening Fluid. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 100 161-169. 10.1016/j.compositesa.2017.04.015
- Costa, C., Silva, F., Campilho, R., Neves, P., Godina, R. & Ferreira, S., (2019). Influence of Textile Cord Tension in Cap Ply Production. *Procedia Manufacturing*, 38 1766-1774.
- Darwish, N., Lawandy, S., El-Shazly, S. A. & Abou-Kandil, A., (2000). Effect of Bonding Systems on the Adhesion of Nitrile Rubber to Nylon Cord. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 39 (5): 793-806.
- Dong, Y., Yao, X. & Xu, X., (2021). Cross Section Shape Optimization Design of Fabric Rubber Seal. *Composite Structures*, 256 10.1016/j.compstruct.2020.113047
- Dong, Y., Yao, X., Yan, H., Yuan, L. & Yang, H., (2019). Macro- and Mesoscopic Mechanical Properties of Complex Fabric Rubber Composite under Different Temperatures. *Composite Structures*, 230 10.1016/j.compstruct.2019.111510

DuPont. (1971). Technical Guide for Kevlar® Aramid Fiber.

Farhadi, P., Golmohammadi, A., Sharifi Malvajerdi, A. & Shahgholi, G., (2020). Tire and Soil Effects on Power Loss: Measurement and Comparison with Finite Element Model Results. *Journal of Terramechanics*, 92 13-22. 10.1016/j.jterra.2020.09.004

García, J. M., García, F. C., Serna, F. & José, L., (2010). High-Performance Aromatic Polyamides. *Progress in polymer science*, 35 (5): 623-686.

Gupta, A., Pradhan, S. K., Bajpai, L. & Jain, V., (2021). Numerical Analysis of Rubber Tire/Rail Contact Behavior in Road Cum Rail Vehicle under Different Inflation Pressure Values Using Finite Element Method. *Materials Today: Proceedings*, 47 6628-6635. 10.1016/j.matpr.2021.05.100

Jong, L., (2019). Improved Mechanical Properties of Silica Reinforced Rubber with Natural Polymer. *Polymer Testing*, 79 10.1016/j.polymertesting.2019.106009

Judovits, L. (2020). Thermal Analysis of Aliphatic Nylon Fibers. In *Thermal Analysis of Textiles and Fibers* (pp. 223-245).

Kane, K., Jumel, J., Lallet, F., Mbiakop-Ngassa, A., Vacherand, J. M. & Shanahan, M. E. R., (2020). Experimental Study of the Rubber Cord Adhesion Inflation Test. *Engineering Fracture Mechanics*, 224 10.1016/j.engfracmech.2019.106783

Kane, K., Jumel, J., Mbiakop-Ngassa, A., Lallet, F., Vacherand, J.-M., & Shanahan, M. E. (2021). Rubber cord adhesion inflation test: Effect of constitutive rubber model on evaluation of Gc. *Engineering Fracture Mechanics*, 244, 107547.

Korunović, N., Fragassa, C., Marinković, D., Vitković, N. & Trajanović, M., (2019a). Performance Evaluation of Cord Material Models Applied to Structural Analysis of Tires. *Composite Structures*, 224 111006.

Lehmann, T. & Ihlemann, J., (2020). Strain Analysis of Cord-Rubber Composites Using Dic. *Materials Today: Proceedings*, 32 183-186. 10.1016/j.matpr.2020.04.537

Moisescu, A.-R., Anghelache, G. & Cristea, G., (2018). Investigation of Radial Modal Behaviour Using Finite Element Analysis for Truck Tyres without Road Contact. *Procedia Manufacturing*, 22 99-106.

Popa, C., Gebhardt, C., Raje, N., Steenwyk, B., & Kaliske, M. (2020). Investigation of cord-rubber composite durability by the material force method. *Engineering Fracture Mechanics*, 229, 106909.

Saha, S., Vineet, K., Bhowmick, A. K., Deuri, A. S. & Vaidya, D. M., (2021). Stubble Resistance of Rubber Vulcanizates: Influence of Short Fiber and Resin. *Polymer Testing*, 94 10.1016/j.polymertesting.2020.107048

Schjønning, P., Stettler, M., Keller, T., Lassen, P. & Lamandé, M., (2015). Predicted Tyre–Soil Interface Area and Vertical Stress Distribution Based on Loading Characteristics. *Soil and Tillage Research*, 152 52-66. 10.1016/j.still.2015.03.002

Sousa, S. P. B., Ribeiro, M. C. S., Cruz, E. M., Barrera, G. M. & Ferreira, A. J. M., (2017). Mechanical Behaviour Analysis of Polyester Polymer Mortars Reinforced with Tire Rubber Fibres. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 29 (1): e162-e166. 10.1016/j.ctmat.2016.07.009

Su, B., Liu, S., Zhang, P., Wu, J. & Wang, Y., (2021a). Mechanical Properties and Failure Mechanism of Overlap Structure for Cord-Rubber Composite. *Composite Structures*, 274 114350.

Tao, Y., Windslow, R., Stevens, C. A., Bilotti, E., Peijs, T. & Busfield, J. J. C., (2018). Development of a Novel Fatigue Test Method for Cord-Rubber Composites. *Polymer Testing*, 71 238-247. 10.1016/j.polymertesting.2018.09.001

ten Damme, L., Stettler, M., Pinet, F., Vervaet, P., Keller, T., Munkholm, L. J. & Lamandé, M., (2019). The Contribution of Tyre Evolution to the Reduction of Soil Compaction Risks. *Soil and Tillage Research*, 194 10.1016/j.still.2019.05.029

ten Damme, L., Stettler, M., Pinet, F., Vervaet, P., Keller, T., Munkholm, L. J. & Lamandé, M., (2020). Construction of Modern Wide, Low-Inflation Pressure Tyres Per Se Does Not Affect Soil Stress. *Soil and Tillage Research*, 204 10.1016/j.still.2020.104708

Tonatto, M. L. P., Forte, M. M. C. & Amico, S. C., (2017). Compressive-Tensile Fatigue Behavior of Cords/Rubber Composites. *Polymer Testing*, 61 185-190. 10.1016/j.polymertesting.2017.05.024

Yang, H., Yao, X.-F., Yan, H., Yuan, Y.-n., Dong, Y.-F. & Liu, Y.-H., (2018). Anisotropic Hyper-Viscoelastic Behaviors of Fabric Reinforced Rubber Composites. *Composite Structures*, 187 116-121. 10.1016/j.compstruct.2017.12.026

Zhao, Z., Mu, X. & Du, F., (2020a). Constitutive Model Research for Rubber-Cord Composites Used in Rubber Track. *Materials Today Communications*, 23 100937.



Memristor-Based Hyperchaotic System and DNA Encoding Based Image Encryption Application on LabVIEW

Muhammet Emin Şahin^{1*}

¹Department of Computer Engineering, Yozgat Bozok University, Yozgat, TURKEY

Başyuru/Received: 20/01/2023

Kabul / Accepted: 29/01/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Abstract

The growth of multimedia and communication tools has sped up the data transfer thanks to technological advancements, and ensuring image security has become a crucial doubt, particularly during the transmission and storage of the images. So, when images are sent via a public network, they should be encrypted before being sent to the receiving part. In this study, a memristor-based encryption system with Deoxyribonucleic acid (DNA) coding is proposed on the LabVIEW platform to ensure information security. Firstly, memristor based hyperchaotic system is used for chaotic sequence. The images are encrypted using the DNA and XOR arithmetic process on the LabVIEW platform. A memristor-based hyperchaotic system and the combination of techniques used aim to encrypt the image securely. Additionally, security tests; histogram analysis, correlation analysis, differential attack, and entropy analysis, are performed on the proposed system and the results are presented. The aforementioned methods are thoroughly examined and tested to determine their efficacy. It has been determined that the proposed encryption schemes are effective and can therefore be used in real-time applications.

Key Words

“chaos, DNA coding, image encryption, memristor, security tests”

1. Introduction

Encryption is one of the most important techniques that ensure the secure transmission of digital images and videos transmitted via the network. The unique properties of image or video such as bulk data capacity, strong correlation of adjacent pixels and high data redundancy require encryption algorithms that can address fundamental issues like data storage, speed and security.

Chaotic systems are extremely sensitive to input parameters; a small change in these factors might result in an entirely different output for chaotic maps. Various image encryption applications utilizing chaotic systems are mentioned in the literature (H. Li et al., 2019; Z. Li et al., 2021; Maazouz et al., 2022). This is because chaotic signals have favourable pseudorandom, initial-value sensitive, and long-term unpredictability features, which increase the confusion and dissemination of encrypted data. When studies in the literature are examined; Wenwu Yu and Cao suggested a novel encryption technique based on a chaotic Hopfield neural network with variable delay time (W. Yu and Cao, 2006). Patidar et. al. presented a specially designed symmetric encryption system for color images based on the substitution-diffusion model obtained utilizing chaotic standard maps and chaotic logistic maps (Patidar et al., 2010). Zhi Liang Zhu came up with another chaos-based encryption scheme that uses bitwise permutations of the image to encrypt it (Zhu vd., 2011).

It comes from the concept of DNA cryptography with the evolution of DNA computation. DNA computing provides tremendous parallelism and consumes minimal energy. DNA encryption is a type of encryption that has been created in recent years by considering the completion feature of DNA, its double helix feature and, its ability to be synthesized and transported in different environments (biological, digital). Based on current technology, it is used as an extra step in encryption algorithms that are already in use.

It is not true in encryption processes that the more difficult the encrypted text is to decrypt, the better. In addition, encryption, data transmission, and decryption processes each consume processing energy on existing computers. The better the hard decryption/complexity of the encryption is compared to other algorithms with the current number of transactions, the more useful this encryption algorithm is. A number of image coding techniques using DNA techniques have been proposed in the literature (Chen et al., 2020; Gasimov and Mammadov, 2020; Guesmi et al., 2016; Zhang et al., 2010).

X. Lai et al. proposed asymmetric encryption and signature cryptography based on DNA computation and traditional public key cryptography (Lai et al., 2010). H. Liu et al. proposed an image coding scheme using DNA complement rules and chaotic maps Liu et al., 2012). Q. Zhang et al. described a way for encrypting images using DNA-XOR processes (Zhang and Wei, 2013). An image encryption application is proposed for a chaotic system based on memristors by Zhang et al. (Zhang et al., 2022). Combining the DNA algorithm with an image encoding algorithm, the new system is used to encode the chaotic sequence images, and the results are presented. Using the memristive chaotic system proposed in the study by L. Luo et al., a color image encryption scheme based on DNA coding was proposed, and the scheme's security was tested using statistical analyses and various attacks (L. Luo et al., 2022). In addition, DNA coding and a color image encryption scheme are implemented on the chaotic system ARM platform.

In this paper, a memristor-based encryption system with DNA coding is proposed on the LabVIEW platform to ensure information security. Memristor-based hyperchaotic system is used to construct the algorithm. The images are finally encrypted using DNA and XOR arithmetic on the LabVIEW platform. The security tests (histogram analysis, correlation analysis and NPCR and UACI test and entropy analysis) of the obtained study are performed and the results are presented.

2. Material and Methods

2.1. Memristor-based hyperchaotic system

The memristor is an element whose resistance is characterized by a non-linear relationship between load and flux, presented by L.Chua (Chua, 1971). Memristor-based chaotic systems have attracted the attention of many researchers due to their rich dynamic behavior and therefore they have been widely used in the literature in recent years (Sun et al., 2018; Sahin et al., 2021; Sahin et al., 2021). In this study, a memristor-based chaotic system is preferred for the encryption part. 5D memristive hyperchaotic system has been obtained in the literature (F. Yu et al., 2020). Equation 1 provides the mathematical expression of the utilized hyperchaotic system based on memristor.

$$\begin{aligned}
 x &= -ax + yz \\
 y &= by - xz \\
 z &= xy - cz + dw(f + 3gu^2) \\
 w &= xy - ew \\
 u &= -z
 \end{aligned} \tag{1}$$

The system parameters of the memristor-based hyperchaotic circuit are selected as $a=10$, $b=12$, $c=30$, $d= 2$, $e=4$, $f=0.1$, $g=0.01$, and initial states (2, 1, 1, 2, 2). Phase portraits of the circuit are obtained on the LabVIEW platform and are given in Figure 1. Phase portraits of the memristor-based chaotic circuit is shown in Figure 2.

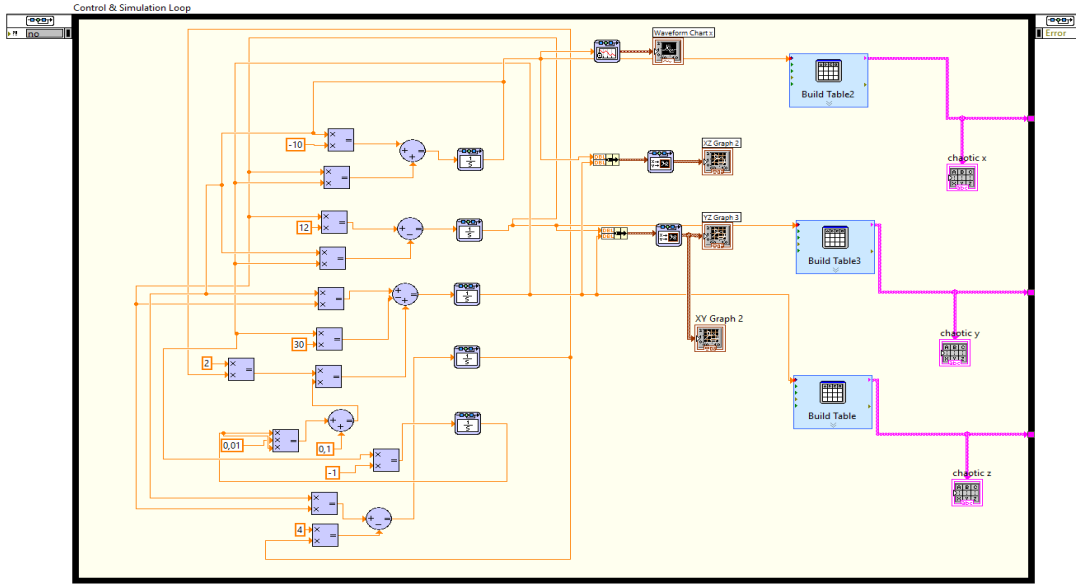


Figure 1. Memristor-based hyperchaotic circuit design on the LabVIEW

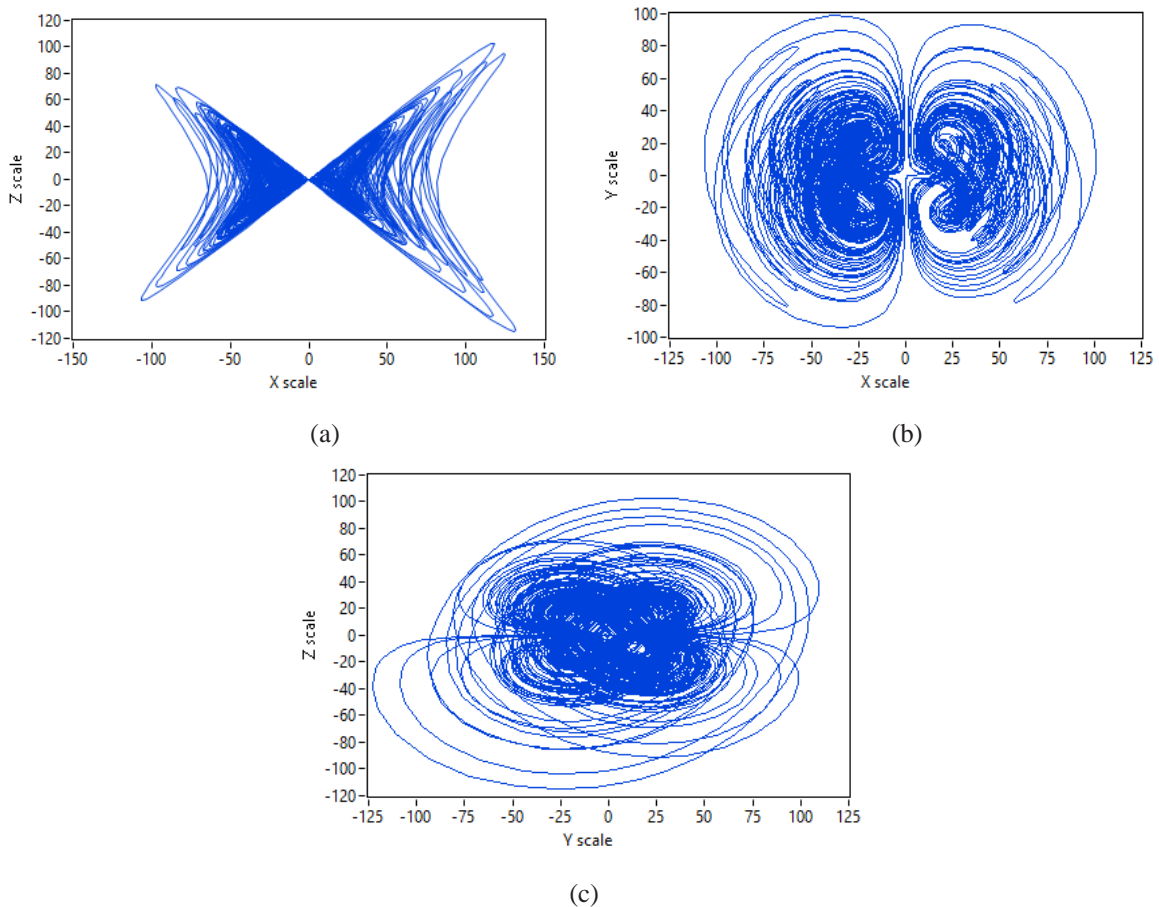


Figure 2. Phase portraits of the memristor-based hyperchaotic circuit (a) x - z plane, (b) x - y plane and (c) y - z plane

2.2. Scheme of Encrypted System

Deoxyribonucleic acid (DNA) is a genetically encoded nucleic acid. It is a genetic trait necessary for the vitality and biological development of all unicellular or multicellular organisms. The most important role of DNA is to ensure that the genetic characteristics of organisms are passed down from generation to generation (Çelik, 2016).

DNA contains the information necessary to build other components of the cell (such as proteins and Ribonucleic acid). The deoxyribonucleic acid that carries the biological genetic information is called a gene. Deoxyribonucleic acid sequences have functional properties such as defining the shape of chromosomes and regulating how genetic information is used in which cells and under what conditions. There are four types of nucleic acid bases in a DNA sequence: Adenine (A), Thymine (T), Cytosine (C), and Guanine (G) (Wen et al., 2019). However, when only four bases are treated according to the principle of complementary base pairs, only eight kinds of coding combinations emerge. A and T, as well as C and G, are essentially complementary to one another. Table 1 presents DNA coding rules.

Table 1. DNA coding rules

Rules	1	2	3	4	5	6	7	8
A	00	00	01	01	10	10	11	11
T	11	11	10	10	01	01	00	00
G	01	10	00	11	00	11	01	10
C	10	01	11	00	11	00	10	01

3. Experimental Results

There are two important situations in image encryption, which are diffusion and permutation. When the pixel values in an image are close to one another, an image emerges. Figure 3 depicts a block diagram of an encrypted system, whereas Figure 4 shows the corresponding images.

The closer the pixel-to-pixel correlation is to zero, the more meaningless the image is. The encryption process specifies this meaningless image. Thanks to features such as complexity found in chaotic systems, the mixing and diffusion steps in the encryption process can be easily completed. First, the x , y and z memristor base chaotic sequences are taken from the hyperchaotic circuit. Then the chaotic sequence x from these taken sequences is used for image mixing. Then, the y -chaotic sequence is used as an XOR, and the z -chaotic sequence is used as the key for the DNA-based encryption process. In this way, our images are encrypted as a result of the structure that goes through three processes.

Step 1 The image from the LabVIEW environment is loaded in $M*N$ size.

Step 2 Obtaining chaotic sequence values from a memristor-based hyperchaotic system.

Step 3 Normalizing the x , y and z chaotic sequence values in the designed memristor-based chaotic circuit model (between 0-255). Here x' , y' and z' contain normalized chaotic sequences these are our keys.

Step 4 The generated x' sequence is used for the confusion step (confusion refers to making the relationship between the key and the cipher text as complex as possible).

To mix the image pixels, $X1_sort$ array is created from the x' array.

$X1_sort = \text{sort}(x')$;

The image matrix is mixed using the $X1_sort$ array. For example, chaotic array $x' = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ is replaced by the position of x_1 in $X1_sort$ and taking a pixel from the image matrix whose position in the array x' is the same as x_1 , this pixel is replaced using the position equal to the position of x_1 in the array $X1_sort$.

In this way, the mixing step is done.

Step 5 Use the generated y' array for the diffusion step (diffusion refers to the property, that redundancy in the statistics of the plain text is dissipated in the statistics of the cipher text), the diffusion step process is created by XOR method the generated chaotic array with the image pixels.

Step 6 The generated z' chaotic sequence is used for DNA encoding. During the DNA process, the chaotic values obtained from the z' chaotic sequence and the image pixels are coded with DNA and then subjected to the XOR method using the procedures in Table 2. The encoded sequence is DNA decoded using the rules in Table 1. After this step, the encrypted image is obtained.

Table 2. DNA-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

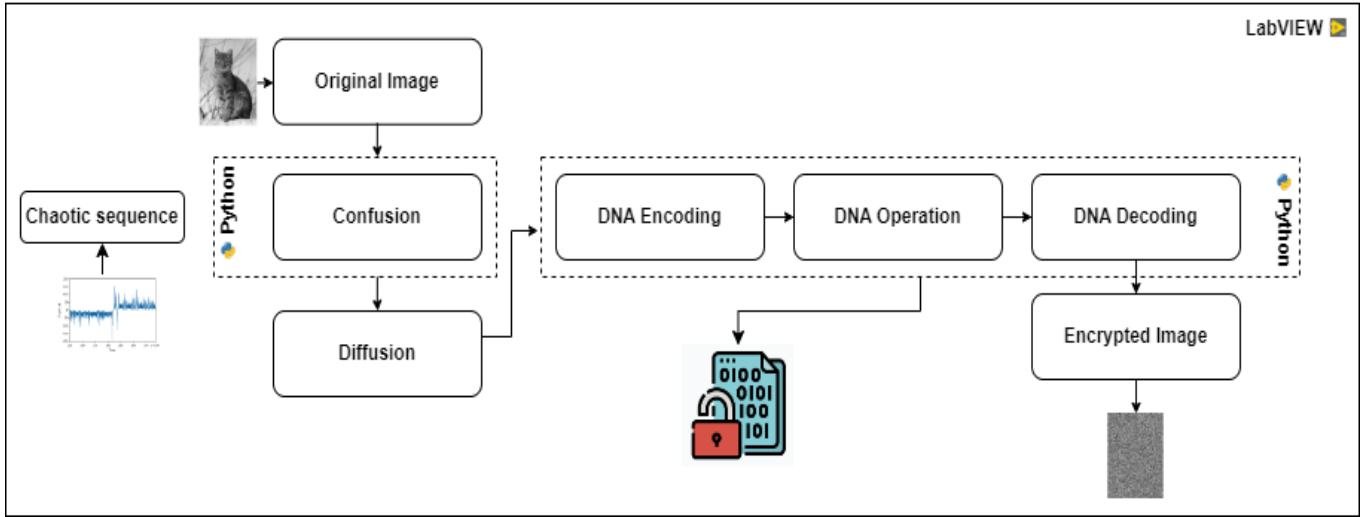


Figure 3. Block diagram of encrypted system

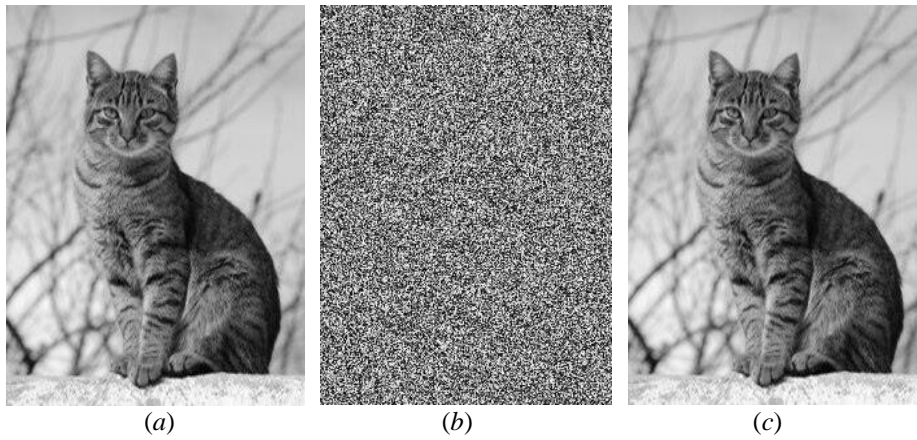


Figure 4. (a) Original image (b) Encrypted image (c) decrypted image

3.1. Security Analysis

Histogram Analyses

The image histogram demonstrates the distribution of pixel values in the image. When the histogram of an encrypted image is uniform, each grayscale has the same probability, the encryption technique is more resistant to statistical attacks. Therefore, the optimal histogram plot of an obtained encrypted picture should be in a format that is fully distinct from the original plain image (Chen et al., 2018; Wang et al., 2012).

Figure 5. (a) shows the histogram distribution graph of the original image. Histogram distribution graphs of the encrypted images in Figure 5. (b) and the decoded images are shown in Figure 5. (c). It has been determined that the original images histogram graph in Figure 5. (a) and the histogram graphs of the solved image in Figure 5. (c) are the same. Examining the histogram graphs obtained by the study reveals a balanced distribution of encryption techniques and a suitable histogram distribution for the system.

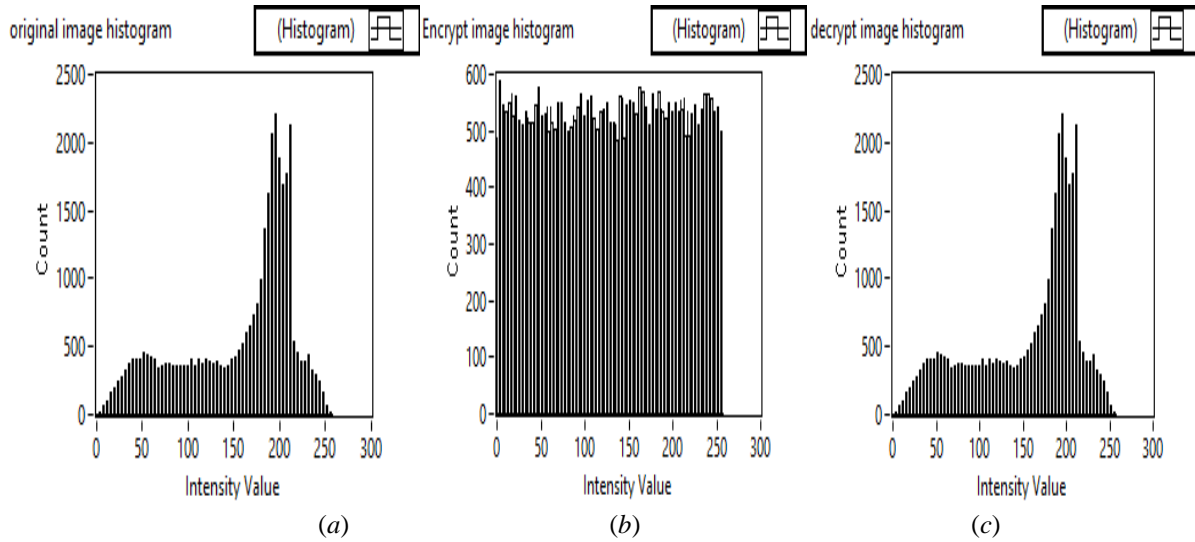


Figure 5. Histogram plot of (a) original image (b) encrypted image and (c) decrypted image

Correlation Analysis

In a plain image, the values of adjacent pixels (horizontal-vertical and diagonal) are very close to each other and the correlation coefficient between them is very high. Therefore, when creating an image encryption algorithm, it is crucial to remove as much correlation as possible between adjacent pixels (Yang et al., 2021). Correlation between adjacent pixels is high in a flat image. In a good encryption, correlation values are expected to decrease to a certain level. The correlation graphs of the original image, the encrypted image and the decoded images for the encryption operations performed are given in Figure 6. Table 3 demonstrates the correlation results of the proposed system.

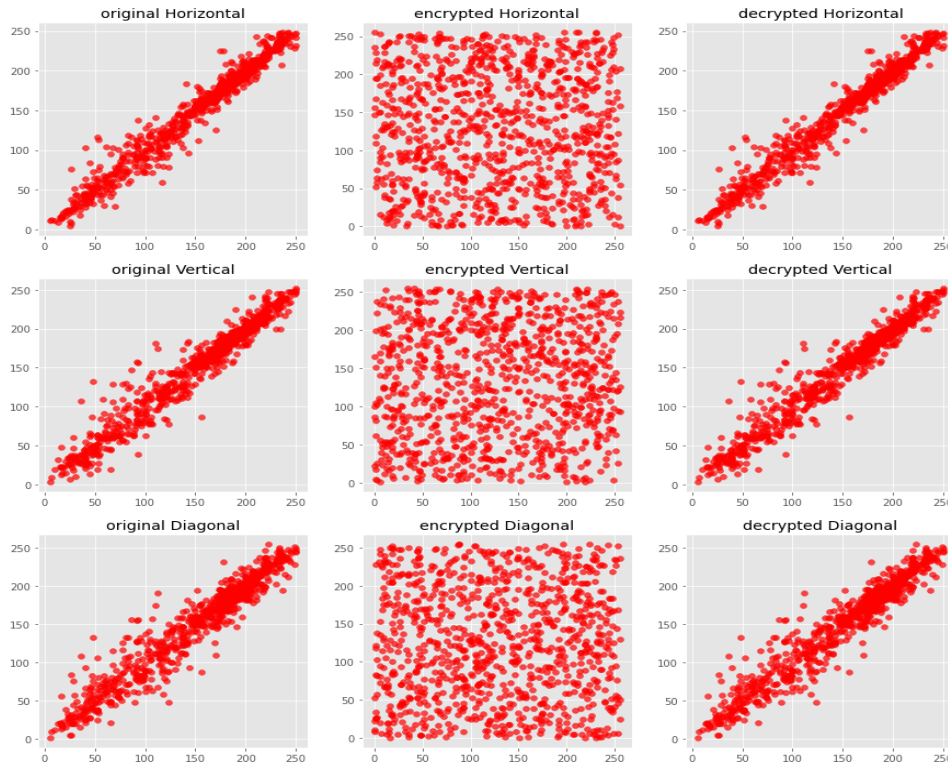


Figure 6. Horizontal, vertical and diagonal correlation scatter plots of the original encrypted and decrypted image

NPCR and UACI test and entropy analysis

Differential cryptanalysis, which was introduced by Biham and Shamir, examines how small modifications to the original image affect the encrypted images (Biham and Shamir, 1991). Table 4 shows the NPCR and UACI test results calculated as a result of the differential attack tests of the developed encryption algorithms.

Table 4. NPCR and UACI values

NPCR	UACI
0.99631	0.31885

The information entropy analysis value of the designed system is very close to the optimum value of eight. The entropy value of the analysed encryption algorithm is observed to be satisfactory. Information entropy analysis results of encryption algorithms are shown in Table 5.

Table 5. The entropy values of the original, encrypted and decrypted image

Original Image	Encrypted Image	Decrypted Image
7.52625	7.99722	7.52625

4. Discussion

The hyperchaotic system used is extremely dependent on the encryption key because of the great sensitivity of chaotic functions. A hyperchaotic memristor-based system is used to perform image encryption in this study. In this regard, it is appropriate for image encryption. The findings demonstrate that the suggested system has adequate security against intrusions and the usage of encrypted photos without authorization. The increasing amount of data being published in widely used digital media makes the need to create new encryption solutions urgently necessary. The established methods will become less credible when hackers and unauthorized users research and examine the old and existing approaches. Therefore, exploiting common surroundings and creating new, attack-resistant approaches might boost confidence.

5. Conclusion

Chaotic systems, due to their randomness and sensitive dependence on initial conditions, provide permutation and diffusion features, which are the basic requirements of cryptological applications. In this study, the memristor-based chaotic system, become increasingly popular in recent years, is favoured. It has been shown in the literature that encryption applications performed only with chaotic systems have some vulnerabilities and are not sufficiently resistant to attacks. LabVIEW is used to implement a chaotic system and a DNA-based encryption application for the purposes of this study. On the implemented encryption applications, histogram analysis, correlation analysis, differential attack (NPCR and UACI tests) and entropy analysis are performed as security analysis. When the security analysis results are evaluated, it has been determined that the proposed encryption algorithm provides a very good correlation distribution, the NPCR value is close to a hundred and the entropy value is close to eight.

Acknowledgment

This work is part of a research project supported by TUBITAK 3501 (Grant number: 122E004).

References

- Biham, E., & Shamir, A. (1991). Differential cryptanalysis of DES-like cryptosystems. *Journal of CRYPTOLOGY*, 4(1), 3-72.
- Chen, J., Chen, L., & Zhou, Y. (2020). Cryptanalysis of a DNA-based image encryption scheme. *Information Sciences*, 520, 130-141.
- Chen, J., Zhu, Z. L., Zhang, L. B., Zhang, Y., & Yang, B. Q. (2018). Exploiting self-adaptive permutation–diffusion and DNA random encoding for secure and efficient image encryption. *Signal Processing*, 142, 340-353.
- Çelik, Y. (2016). Nükleobazlar ve nükleositlerde tautomer kararlılığının moleküler modelleme yöntemleriyle belirlenmesi ve mutasyon etkisinin araştırılması (Master's thesis, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Gasimov, V. A., & Mammadov, J. I. (2020). DNA-based image encryption algorithm. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 734, No. 1, p. 012162). IOP Publishing.
- Guesmi, R., Farah, M. A. B., Kachouri, A., & Samet, M. (2016). A novel chaos-based image encryption using DNA sequence operation and Secure Hash Algorithm SHA-2. *Nonlinear Dynamics*, 83(3), 1123-1136.

- Lai, X., Lu, M., Qin, L., Han, J., & Fang, X. (2010). Asymmetric encryption and signature method with DNA technology. *Science China Information Sciences*, 53(3), 506-514.
- Li, H., Wang, Y., & Zuo, Z. (2019). Chaos-based image encryption algorithm with orbit perturbation and dynamic state variable selection mechanisms. *Optics and Lasers in Engineering*, 115, 197-207.
- Li, Z., Peng, C., Tan, W., & Li, L. (2021). An effective chaos-based image encryption scheme using imitating jigsaw method. *Complexity*,
- Liu, H., & Wang, X. (2012). Image encryption using DNA complementary rule and chaotic maps. *Applied Soft Computing*, 12(5), 1457-1466.
- Luo, H. L., et al. "Coexisting behaviors of chaotic system with tri-stable locally active memristor and its application in color image encryption." *The European Physical Journal Plus* 137.5 (2022): 1-22.
- Maazouz, M., Toubal, A., Bengherbia, B., Houhou, O., & Batel, N. (2022). FPGA implementation of a chaos-based image encryption algorithm. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*.
- Patidar, V., Pareek, N. K., Purohit, G., & Sud, K. K. (2010). Modified substitution–diffusion image cipher using chaotic standard and logistic maps. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15(10), 2755-2765.
- Sun, Junwei, et al. "Autonomous memristor chaotic systems of infinite chaotic attractors and circuitry realization." *Nonlinear Dynamics* 94.4 (2018): 2879-2887.
- Wang, X., Teng, L., & Qin, X. (2012). A novel colour image encryption algorithm based on chaos. *Signal Processing*, 92(4), 1101-1108.
- Wen, H., Yu, S., & Lü, J. (2019). Breaking an image encryption algorithm based on DNA encoding and spatiotemporal chaos. *Entropy*, 21(3), 246.
- Yang, Y., Wang, L., Duan, S., & Luo, L. (2021). Dynamical analysis and image encryption application of a novel memristive hyperchaotic system. *Optics & Laser Technology*, 133, 106553.
- Yu, F., Liu, L., Qian, S., Li, L., Huang, Y., Shi, C., ... & Wan, Q. (2020). Chaos-based application of a novel multistable 5D memristive hyperchaotic system with coexisting multiple attractors. *Complexity*, 2020.
- Yu, W., & Cao, J. (2006). Cryptography based on delayed chaotic neural networks. *Physics Letters A*, 356(4-5), 333-338.
- Zhang, Jie, et al. "Hyperchaotic circuit design based on memristor and its application in image encryption." *Microelectronic Engineering* 265 (2022): 111872.
- Zhang, Q., & Wei, X. (2013). A novel couple images encryption algorithm based on DNA subsequence operation and chaotic system. *Optik*, 124(23), 6276-6281.
- Zhang, Q., Guo, L., & Wei, X. (2010). Image encryption using DNA addition combining with chaotic maps. *Mathematical and Computer Modelling*, 52(11-12), 2028-2035.
- Zhu, Z. L., Zhang, W., Wong, K. W., & Yu, H. (2011). A chaos-based symmetric image encryption scheme using a bit-level permutation. *Information Sciences*, 181(6), 1171-1186.



Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ile Tek ve Çok Katmanlı Grafen Sentezi ve Karakterizasyonu

Synthesis and Characterization of Single and Multilayer Graphene by Chemical Vapor Deposition Method

Erhan Özkan^{1*}

¹Dikkan Arge Merkezi, Bornova, İzmir, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 26/12/2022

Kabul / Accepted: 31/01/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Bu çalışmada son yılların keşfedildiği zamandan itibaren üstün özellikleri sayesinde dünya çapında endüstrinin yönünü değiştirmeyi başaran ve bu sebeple oldukça ilgi çeken malzeme durumuna gelen grafenin sentezlenmesi ve karakterizasyonuna ait detaylı bilgiler paylaşılmıştır. Karbon atomlarının hekzagonal şekilde dizildiği nano ölçekteki iki boyutlu bir formu olan grafenin; fayda-maliyet, yatırım ve zaman parametreleri ele alındığında şu ana kadar gerçekleştirilen en uygun üretim yöntemi olan kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile sentezlenmesinde; büyüme sıcaklığı, altlık malzeme, tavlama süresi, basınç, kullanılan gazların kalitesi ve akış miktarları gibi birçok parametre etkilidir. Bu parametrelerin kombinasyonlarına göre grafen yapısı farklılıklar göstermektedir. Bu çalışma kapsamında tek katmanlı ve çok katmanlı grafen sentezlenmesinin detayları araştırılmıştır. Tek katmanlı ve çok katmanlı üretilen grafen filmlerin karakterizasyonunda Raman Spektroskopisi kullanılmıştır. Filmlerin yapı kontrolü Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Tek katmanlı ve çok katmanlı grafen film tabakalarının üretimi ve karakterizasyonu için gerekli olan parametreler tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

"Grafen, CVD, Tek Katmanlı Grafen, Çok Katmanlı Grafen, Raman, SEM."

Abstract

In this study, detailed information about the synthesis and characterization of graphene, which has been able to change the direction of the industry around the world thanks to its superior properties since its discovery in recent years, and has therefore become a very interesting material, has been shared. Graphene, which is a two-dimensional form at the nanoscale in which carbon atoms are arranged hexagonally; when the cost-benefit, investment and time parameters are taken into consideration, it is synthesized by chemical vapor deposition method, which is the most suitable production method so far; many parameters such as growth temperature, substrate material, annealing time, pressure, quality of the gases used, and flow rates are effective. Graphene structure differs according to the combinations of these parameters. In this study, the details of synthesizing single-layer and multi-layer graphene were investigated. Raman Spectroscopy was used in the characterization of monolayer and multilayer graphene films. The structures of the films were checked by Scanning Electron Microscopy (SEM). The necessary parameters for the producing and characterization of single-layer and multi-layer graphene film layers were determined.

Key Words

"Graphene, CVD, Single Layer Graphene, Multilayer Graphene, Raman, SEM."

1. Giriş

Karbonun doğada farklı allotropik yapıları bulunmaktadır. Amorf yapıdaki karbon kömür olarak bilinirken kübik kristal yapıdaki karbon elmas, hekzagonal kristal kafes yapısı grafit olarak adlandırılmaktadır. Grafite hekzagonal yapıdaki katmanlı karbonlar birbirlerine zayıf Van der Waals bağları ile tutunurken, altıgen yapısı içerisinde yer alan karbonlar ise birbirlerine güçlü kovalent bağlar ile tutunurlar. Grafen, grafitteki zayıf Van der Waals bağlarının deformasyona uğrayarak meydana gelen iki boyutlu yapı olarak keşfedilmiştir. Altıgen yapıdaki iki boyutlu karbon atomlarının bu formu grafene üstün özellikler katmaktadır. Tek katmanlı grafen helyum atomları dahil tüm atomlara geçişi sağlayamayacak mertebede yoğundur. Grafen; ısıyı bakırdan on kat daha iyi iletirken, elektronların hızları ise silisyuma (silikon) göre yüz kat daha hızlıdır (Barkan, 2022).

Hekzagonal yapıda birbirlerine güçlü kovalent bağları ile bağlanmış olan karbon atomları grafeni şimdiye kadar bilinen en güçlü malzeme haline getirmiştir (Johnson, 2019). Çelikten yaklaşık 100 ila 300 kat daha güçlü olan grafen, karbonun bir diğer allotropu olan elmasa kıyasla ısıyı daha iyi iletmektedir. (Ambrosi ve ark., 2012). Metrekaresi 0,77 mg (miligram) ağırlığındaki grafen, esnekliği ve üst düzey yapışma özelliği ile karmaşık şekilli malzemelerin yüzeylerinde kaplama olarak kullanılabilir (Jing ve ark., 2013).

Grafenin üstün özellikleri bu malzemeyi malzeme biliminin odak noktası haline getirmiş olmakla birlikte seri üretimi için teknik ve ekonomik Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir. Geim ve Novoselov 2011 yılında kendilerine Nobel ödülü kazandıran çalışmada yapışkan bir bant ile grafitin katmanlarını basit bir şekilde ayırmış ve en yüksek kalitedeki grafeni elde etmişlerdir ancak bu tekniğin oldukça uzun süre alması sebebiyle bir mikrometre grafenin üretim maliyeti 1000 dolar mertebelerine ulaşmaktadır (Peplow., 2013). Üretim süresini hızlandırmak ve maliyetleri aşağıya çekmek adına grafenin alternatif üretim yöntemlerinin araştırmaları devam etmiş ve günümüzde kimyasal buhar biriktirme (CVD-Chemical Vapour Deposition) yöntemi yaygın olarak tercih edilmiştir. CVD yöntemi ile karbon kaynağı olarak metan gazı ve altlık malzeme olarak folyo formundaki bir metalin üzerinde 1000 °C sıcaklıkta grafenin sentezlenmesi sağlanır. Sentezlenen grafen kimyasallar yardımıyla polimer veya silika bir tabakaya aktarılır. Bu yöntem ile grafen tabakaların büyüklüğü yüksek miktarda santimetrekarelere ulaşabilir, dolayısıyla da grafenin bir metrekare maliyeti 100.000 doların altına düşebilmektedir ancak bu yöntem ile elde edilmiş olan grafen çeşitli kusurlar barındırmaktadır. CVD ile yüksek maliyetli titanyum, kadmiyum ve nikel gibi metallerin daha düşük maliyetli folyolar ile kullanımı 2015 yılında Glasgow Üniversitesi ve Bilkent Üniversitesi'nin ortak çalışmaları ile geliştirilmiştir. (Jeffrey., 2015) ancak CVD uygulamalarında gerekli olan yüksek sıcaklık mertebelerinin endüstriyel süreçler açısından çok yüksek bulunması sebebiyle sıcaklığı düşürme çalışmaları devam etmektedir (Millholland, 2018).

Her yeni malzemenin ürün yaşam eğrisinin başında yaşamış olduğu sıkıntılar grafen için de geçerlidir. Örnek olarak 1950'li yıllarda keşfedilen karbonfiber malzemesi yaklaşık kırk yıl sonra yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve üretim tekniklerinin geliştirilmesini beklemek zorunda kalmıştır. (Spanos ve ark., 2015). Çok yeni bir teknoloji olan grafenin üretim parametrelerinin standartlaştırılması ve maliyetlerinin düşürülmesi için çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu çalışmaların neticesinde grafen üretim maliyetlerinin çok yakın bir zamanda düşmesi beklenmektedir. Örnek olarak Çin ve Singapurlu bilim insanları 2018 yılında gerçekleştirdikleri çalışma neticesinde organik çözücü miktarındaki iyileştirmeler ile grafenin üretim maliyetlerinin yaklaşık yüz kat düşürecek bir yöntemi kazandırdıklarını yayımlamışlardır (Dong ve Chen, 2018). Kansas State Üniversitesi'nde gerçekleştirilen bir çalışma ile grafen "patlatma" tekniği ile üretilerek patent alınmıştır. Bu yöntemde sıkıştırılmış hidrokarbon gazı oksijen ile temas edip bir buji yardımıyla patlatılmış ve grafen tabakaları elde edilmiştir. Oldukça basit ancak riskler barındıran bu yöntem grafenin seri bir şekilde üretilmesinin önünü açmıştır. (Galeon, 2018).

2018 yılında Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde yüksek kaliteye sahip grafen şeritlerin seri üretimini sağlayacak bir sistem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu şeritler ile deniz suyunun arıtılması, biyolojik ayırma, protein, büyük çaplı iyon ve nanopartikülleri filtreleyebilecek kapasitede olduğu tespit edilmiştir (Chu, 2018). CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) tarafından 2007 senesinde grafen üretimi için CVD'ye benzer bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde atmosferik kontrollü bir ortama gerek kalmadan soya yağından oda sıcaklığında grafen katmanları elde edilmiş ve "GraphAir" olarak tescillenmiştir (CSIRO, 2017). Seul Üniversitesi ve Graphane Square Inc. Şirketi'nin 2018 yılında tamamladıkları ortak proje neticesinde grafen ve grafen gibi iki boyutlu malzemeleri üretebilmek için lazer yazıcıların kullanılması mümkün hale gelmiştir. Oldukça ilgi uyandıran bu sıra dışı yöntemde lazer yazıcıların tonerinde grafit, kaplanacak olan altlık malzemelerde ise kâğıt yerine bakır folyolar tercih edilmiştir. Bu şekilde üretilen grafen kaplı bakır folyolar geliştirilerek "rulodan ruloya yöntemi" ile grafenin seri üretimine farklı bir bakış açısı getirilmiştir.

Yukarıda detaylı olarak aktarılan durumlardan da anlaşılacağı üzere grafenin seri üretimin yapılabilmesi için arayışlar halen sürmektedir. Günümüzde ülkemizin de dahil olduğu araştırmalardan sorumlu 250'den fazla firma grafen sentezi ve grafenin seri üretimi için çalışmalarına devam etmektedir. Bu firmalarda gerçekleştirilen çalışmalarda farklı sentez yöntemlerinin tercih edilmesi sebebiyle farklı kalitede ve fiziksel şartlardaki grafen ürünleri pazara sunulmaktadır. Gerçekleştirilen bir araştırmaya göre 60'tan fazla grafen çeşidi pazarda yer almaktadır. Bu ürünlerin ise 45'ten fazla varyantının olduğu ortaya konulmuştur ancak bu varyantların tek bir ortak noktası bulunmamaktadır. Piyasaya sürülen ürünlerin %60'ında katman sayısı tanımlanmamaktadır (Narayanan ve ark., 2012). Bu durumun handikabı ise grafen tedarik eden firmaların giriş kalite kontrollerini üst düzey bir laboratuvarında yapma

zorunluluğunun olmasıdır. Bu tespitleri yapabilen laboratuvarların test ve analiz maliyetleri numune başına 15.000 dolar seviyelerine çıkabilmektedir (Liu ve ark., 2014).

Bu çalışmanın özgün tarafı literatürdeki mevcut çalışmalardan farklı olarak kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile farklı metal altlıklar ve parametreler kullanılarak tek katmanlı ve çok katmanlı grafen tabakaların üretimi ve karakterizasyonunun bir arada sunulmuş olmasıdır. Bu şekilde aynı deney düzeneğinde gerçekleştirilen sentezler ile parametre ve altlık malzemelerin katmanlara olan etkisi somut bir olarak ortaya konulmuş ve mukayese kriterleri net bir şekilde sunulmuştur. Elde edilen grafen tabakaların karakterizasyonunun gerçekleştirilebilmesi için transfer baskı tekniğinden faydalanılmıştır. Grafen tabakasının yapısal karakterizasyonu Raman spektrometresi ile gerçekleştirilmiş olup tek katmanlı ve çok katmanlı mikro yapılar Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile tespit edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Tek katmanlı ve çok katmanlı grafen üretimi FirstNano EasyTube 101 marka kimyasal buhar biriktirme sisteminde gerçekleştirilmiştir. Şekil 1’de kurulu kimyasal buhar biriktirme sistemi gösterilmiştir.



Şekil 1. Kimyasal Buhar Biriktirme Sistemi

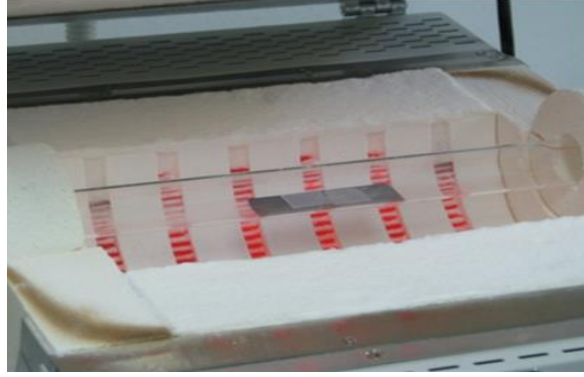
Yüksek saflık derecesindeki metan gazı (CH_4) karbon kaynağı, yüksek saflık derecesine sahip hidrojen gazı (H_2) indirgeyici, Argon gazı (Ar) taşıyıcı, 0,025 mm kalınlıkta ve %99,8 saflıkta bakır folyo ile %99,7 saflıkta nikel folyo katalizör olarak kullanılmıştır.

2.1. Tek Katmanlı Grafen Film Sentezi

İnce bakır levhalardan (0,025 mm kalınlıkta) 5cm x 5cm ölçülerinde altlık malzemeler kesilerek hazırlanmıştır. Bakır altlık malzemelerin üzerinde gerçekleşecek sentezleme öncesinde folyoların yüzey temizliği kritik bir öneme sahiptir. Folyolar üzerinde sentezlenecek grafen ince film kaplamaların kararlı, homojen ve pürüzsüz bir yapıda olması gerekmektedir. Bu amaçla bakır folyolar aseton, izopropanol ve saf su ultrasonik banyolarından geçirilerek ön hazırlıklar yapılmış sonrasında azot gazı ile atmosferik ortamda kurutulmuştur. Ön temizleme işleminin ardından bakır altlık malzemeler vakum odasına alınmıştır. Tek katmanlı grafen sentezinin parametreleri için literatürden ve önceki çalışmalarımızdan yararlanılmıştır. Bakır yüzeyindeki oksitleri gidermek amacıyla 50 mili Tor basınç, 100 sccm hidrojen gazı altında sistemin 1035 °C’ye ulaşması beklenmiştir. Sistemin bu sıcaklığa ulaşması ve bakır yüzeyindeki oksitlerin temizlenmesi 85 dakika sürmüştür. Sistem sıcaklığı 1035 °C’ye ulaşması sonrasında grafen sentezi için 1 dakika süresince 10 sccm metan gazı karbon kaynağı olarak sisteme yüklenmiştir. Sonrasında metan gazı kapatılarak sistemin oda sıcaklığına kadar soğutulması sağlanmıştır, bu işlem 30 dakika sürmüştür.

2.2. Çok Katmanlı Grafen Sentezi

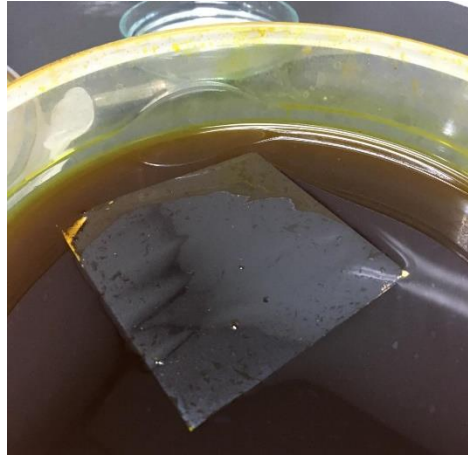
0,025 mm kalınlığa sahip nikel folyolar 5cm x 5cm ebadında kesilmiştir. Çok katmanlı grafen sentezinin parametreleri için literatürden ve önceki çalışmalarımızdan yararlanılmıştır. Yüzeyin aktif hale gelmesi için 20 mili Tor basınç elde edilinceye kadar sisteme 1000 sccm argon gazı yüklenip sıcaklık 875 °C’ye gelinceye kadar 100 sccm argon ve 100 sccm hidrojen gazı sisteme verilmiştir. Fırın 35 dakikada oda sıcaklığından 875 °C’ye gelecek şekilde ayarlanmıştır. 875 °C’de 25 dk. 35 sccm metan gazı karbon kaynağı olarak fırına iletilmiştir. 25 dk sonunda grafen üretimi tamamlanmış olup fırın ve metan gazı beslemesi kesilmiştir. Fırının oda sıcaklığına gelmesi 15 dk sürmüştür. Şekil 2’de bu işlemin gerçekleştiği ortam gösterilmiştir.



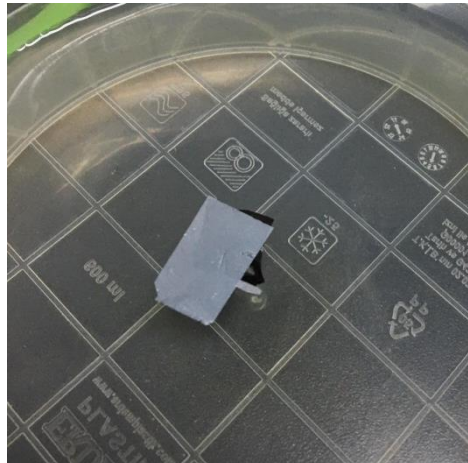
Şekil 2. CVD'de Grafen Sentezi

2.3. Transfer Baskı Tekniği ile Grafen Katmanlarının Altlıklardan Ayrıştırılması

Bakır üzerinde tek katmanlı ve nikel üzerinde çok katmanlı olarak sentezlenen grafen katmanının altlık malzemelerden ayrılması amacıyla transfer baskı tekniği kullanılmıştır. Bu yöntemde kimyasal buhar biriktirme metodu ile sentezlenen grafen filmlerin üzeri yaklaşık olarak 1 μm kalınlığında fotodirenç ile kaplanır. Daha sonra elastomerik bir malzeme olan PDMS polimeri fotodirenç kaplı bakır folyo üzerine uygulanır. Bu basamaktan sonra bakır tabakası 1M'lık FeCl_3 çözeltisi içerisinde eritilir. Bakır tamamen eridikten sonra PDMS istenilen altlık üzerine uygulanarak ısıtılır. PDMS in yüzey enerjisi sıcaklık ile ters orantılı olduğu için üzerinde bulunan filmi altlık üzerine bırakır. Şekil 3'te tek katmanlı grafen filminin altlıktan ayrışması yer almaktadır.



Şekil 3. Tek Katmanlı Grafenin Bakır Altlıktan Ayrışması



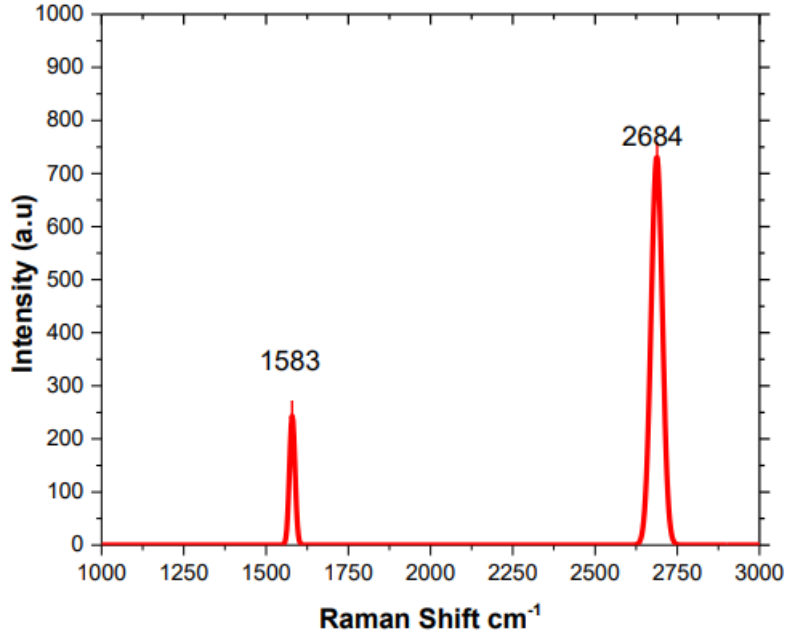
Şekil 4. Çok Katmanlı Grafen Tabakasının Nikel Altlık Malzemesinden Ayrıştırılması

3. Bulgular ve Tartışma

Bakır folyo ve nikel folyo üzerindeki grafen ince film tabakalarının karakterizasyonu için aşağıdaki analizler gerçekleştirilmiştir.

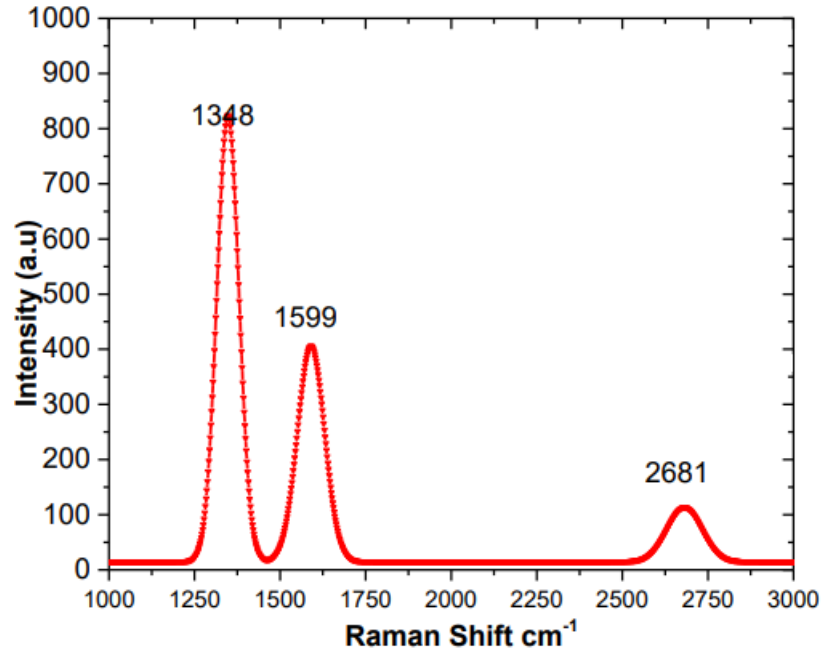
3.1. Raman Spektroskopisi Analizleri

Şekil 5, bakır üzerinde sentezlenen grafen numunesinin Raman saçılmasını göstermektedir. Bu spektrumda 2 tane phonon modu vardır. Bu phonon modları sırasıyla G (~1550 cm⁻¹), ve 2D (~2700 cm⁻¹) olarak isimlendirilmektedir. D bandı grafen üzerinde bulunan kusurlardan dolayı oluşmaktadır ancak sentezlenen bu filmde D bandı gözlenmemiştir. Bu da büyütülen örnekte kusursuz yakın grafen yapısının elde edildiğinin bir ispatıdır. 2D piki ise ikinci derece bir Raman sinyalidir. Momentumu çok yüksek olan zone boundary phononlarının Raman spektrumudur. Bu pikin spektral genişliği ve şiddeti bize büyütülen örneğin tabaka sayısı hakkında fikir vermektedir. 2D pikinin şiddeti G pikinin şiddetinin iki katından daha fazla olduğu görülmektedir. Bu da bize büyütülen grafenin tek katmanlı olduğunu göstermektedir. Daha önce verilen bilgilerden yola çıkarak Şekil 5'te verilen değerler incelendiğinde bu adımda gerçekleşen en iyi değer, $I_{2D}/I_G = 3,20$ ve FWHM = 30 cm⁻¹ değerine sahip 60 dakikalık büyütme işlemine ait olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Kimyasal buhar biriktirme metodu ile bakır tabaka üzerinde büyütülmüş grafen tabakasının Raman saçılma spektrumu

Nikel üzerine sentezlenen ince filmlerin spektrumunda birden fazla sayıda pik görülmüştür. D pikinin oluşması kusurların varlığının bir göstergesidir. Artan tabaka sayısı G pikinin şiddetini artırırken 2D pikinin şiddetinin azalmasına sebep olmuştur. Bu da sentezlenen ince film grafen tabakalarının çok katmanlı bir yapıda olduğunu göstermektedir. Şekil 6'da bu durumun gözlendiği Raman spektrumu yer almaktadır. G ve 2D bantları tespit edilmiştir. Bu film için D bandı gözlenmemiş ve dolayısıyla kusursuz grafen yapısının elde edildiği düşünülmektedir. Çok katmanlı grafen yapısının FWHM değerleri G ve 2D için sırasıyla 92,9 cm⁻¹ ve 119,6 cm⁻¹ olarak hesaplanmıştır. I_{2D}/I_G oranı 0,265 tespit edilmiştir.



Şekil 6. Nikel Altlık Üzerinde Sentezlenmiş Grafene Ait Raman Spektrumu

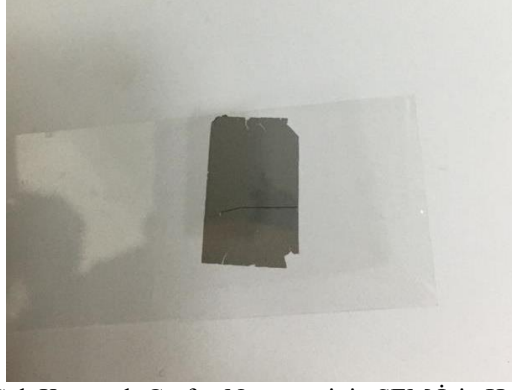
3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu Analizleri

Tek katmanlı ve çok katmanlı olduğu tespit edilen grafen tabakaları SEM öncesinde numune hazırlıkları gerçekleştirilmiştir. Şekil 7’de tek katmanlı grafenin SEM öncesi hazırlık aşaması gösterilmiştir.



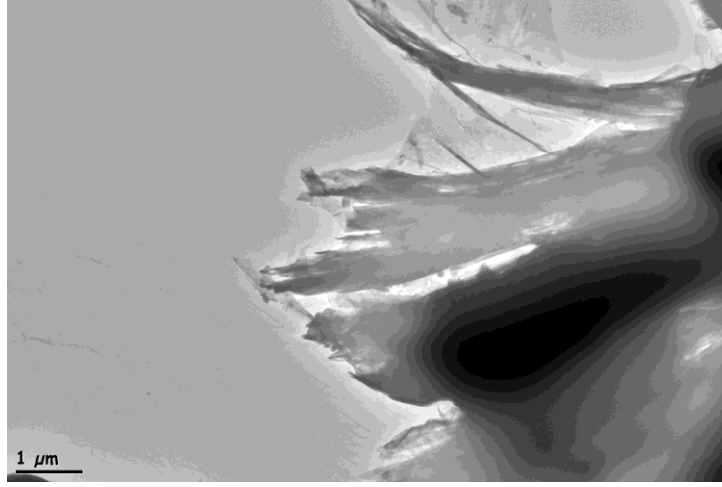
Şekil 7. Tek Katmanlı Grafen SEM Numunesi

Çok katmanlı grafen numunesinin SEM öncesindeki hazırlıkları Şekil 8’de gösterilmiştir.



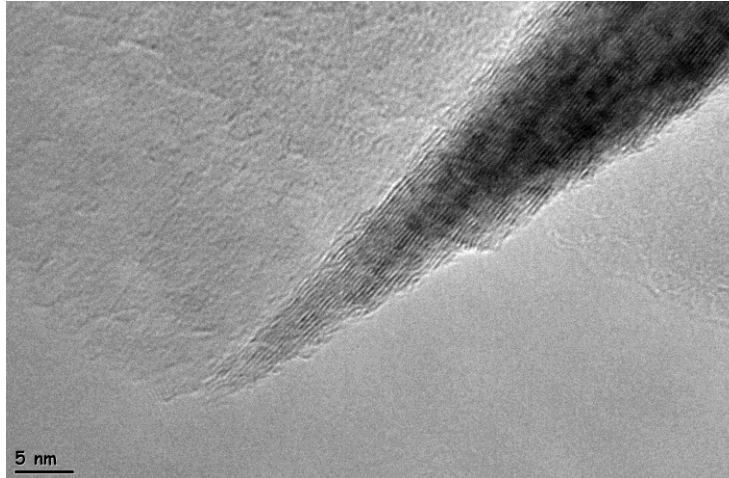
Şekil 8. Çok Katmanlı Grafen Numunesinin SEM İçin Hazırlanması

Mikroyapılar FESEM JEOL JSM 7900F görüntüleme cihazı ile gerçekleştirilmiş olup tek katmanlı grafen mikro yapısı Şekil 9’da yer almaktadır. Grafen tabakalarının kenarlarından katlanması SEM görüntülerinde açık bir şekilde görülmektedir. Bu kırışıklıkların karboksil ve hidroksil gibi oksijen içeren fonksiyonel grupların kalıntıları veya transfer aşamasında altlık malzeme-grafen arasındaki boşluklardan kaynaklandığı tahmin edilmektedir ayrıca soğutma esnasında bakır altlık üzerinde sentezlenen grafen film tabakasının termal genleşme farklarından olması da muhtemeldir.



Şekil 9. Tek Katmanlı Grafen Mikro Yapısı

Şekil 10’da çok katmanlı grafen mikro yapısı yer almaktadır, nikel altlık üzerinde sentezlenen çok sayıdaki katman net bir şekilde gözlenmektedir. Katmanlar arasında tek katmanda olduğu gibi herhangi bir katlama gözlenmemiş olup katmanların istifleri birbirinden ayırt edilebilmektedir. Burada altlık malzeme ile grafen film tabakaları arasında herhangi bir termal genleşme olmaması sebebiyle katlamaların olmadığı düşünülmektedir.



Şekil 10. Çok Katmanlı Grafen Mikro Yapısı

4. Sonuç

Yapılan bu çalışma neticesinde CVD tekniği ile bakır folyolar üzerine tek katmanlı ve nikel folyolar üzerine çok katmanlı ince grafen filmlerin sentezlenmesi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. İnce grafen filmlerin yapısal karakterizasyonu için Raman Spektrometresi ve Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışmadan elde edilen analiz sonuçları neticesinde, CVD tekniği kullanılarak bakır folyolar üzerinde tek katmanlı ince grafen filmler elde edilmiş olup nikel folyolar üzerinde ise çok katmanlı ince grafen filmler sentezlenmiştir.

Bakır ve nikel altlık üzerinde grafen sentezlenmesi farklı mekanizmalara dayanmaktadır. Karbonun bakır içerisindeki çözünürlüğü çok düşüktür. Kimyasal adsorpsiyon/çökeltme veya yüzey büyüme mekanizması tek katmanlı grafen oluşum mekanizmasını dahi iyi açıklamaktadır. Bu büyüme epitaksiyel değildir. Karbonun nikel içerisindeki çözünürlüğünün daha yüksek olması ile epitaksiyel büyüme sağlanmaktadır. Grafenin epitaksiyel büyüme için en ideal altlığın nikel olmasının sebebi de bu mekanizmayla açıklanmaktadır.

Yüksek sıcaklıkta karbon metal içerisinde çözünebilmektedir. Karbonun metal içerisinde çözünme oranına göre grafen büyüme mekanizması farklıdır. Nikel içerisinde karbonun çözünürlüğü oldukça yüksektir, 1000 °C de nikel içerisinde karbon yüksek miktarda çözünür. Daha sonra metan gazı kesilerek örnek hızlı bir şekilde soğutulur. Karbonun çözünürlüğü sıcaklık ile ters orantılıdır. Soğuyan örnek üzerinde ince bir karbon tabakası yoğunlaşmaya başlar. Nikel içerisinden gelen karbon yüzeyde grafen büyümesini sağlamaktadır. Bu mekanizmada nikel içerisinde çözülmüş karbon miktarı ve soğutma hızı çok önemlidir. Karbon nikelin içerisinden geldiği için birden fazla grafen tabakası oluşmaktadır. Karbonun bakır içerisindeki çözünürlüğü ise nikeldekine oranla oldukça düşüktür. Bakır üzerinde grafen büyüme mekanizması yüzeye fiziksel olarak tutunan karbon atomlarının yüzeyde grafen tabakası oluşturması prensibine dayanır. Yüzeyde biriken karbon atomları grafen tabakasını oluşturur ve grafen oluşuktan sonra reaksiyon durur. Bakır üzerinde grafen büyütülmesi daha kontrollüdür ve tek katman şeklinde büyüme gerçekleşir. Tek katmanlı grafen üretimi 1035 °C'de gerçekleşirken çok katmanlı grafen 875 °C'de sentezlenmiştir.

Bu makale neticesinde elde edilen en büyük bulgu, farklı altlık malzemeleri kullanılarak gerçekleştirilecek çalışmaların grafenin yeni kullanım alanlarının önünü açacak olmasıdır. Özellikle altın üzerinde grafen büyütülmesi konusundaki akademik çalışmalar plazmonik sensörler konusuna yeni bir bakış getirmiştir. Bu çalışmaların olumlu neticelenmesi sonucunda grafen birçok sektörün beklentisine cevap verebilecek ucuz, erişimi ve üretilmesi kolay bir hammadde haline gelecektir.

Referanslar

Abdelkader, M. R., Al-Salaymeh A., Al-Hamamre, Z. And Sharaf F.” A Comparative Analysis of The Performance of Monocrystalline and Multiycrystalline PV Cells in Semi-Arid Climate Conditions: The Case of Jordan “, Jordan Journal Of Mechanical And Industrial Engineering, Volume 4 Number 5, Pages 543-552, 2010.

Al Badwawi, R., Issa, W. R., Mallick, T. K., &Abusara, M. (2019). Supervisory control for power management of an islanded AC microgrid using a frequency signaling-based Fuzzy Logic Controller. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 10(1), 94-104.

Arcos-Aviles, D. et al. "Battery management fuzzy control for a grid-tied microgrid with renewable generation." IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2012.

Arcos-Aviles, D., Pascual, J., Marroyo, L., Sanchis, P., Guinjoan, F., "Fuzzy Logic-Based Energy Management System Design for Residential Grid-Connected Microgrids," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. PP, no.99, pp.1-1 doi: 10.1109/TSG.2016.2555245.

Bergmann, R.B., Berge, C., Rinke, T.J., Schmidt, J., Werner, J.H. “Advances In Monocrystalline Si Thin Film Solar Cells by Layer Transfer “Solar Energy Materials &Solar Cells, Volume 74 Issues 1-4, Pages 213-218, 2002.

Copeland, B.J., (2017), Artificial intelligence (AI), Encyclopedia Britannica, Erişim tarihi: 12.Kasım.2022.

Erkul, A., “Monokristal, Polikristal ve Amorf-Silisyum Güneş Panellerinin Verimliliğinin İncelenmesi ve Aydınlatma Sistemi Uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, (2010).

Ghazali, A., Rahman, A.M. “The Performance of Three Different Solar Panels for Solar Electricity Applying Solar Tracking Device Under the Malaysian Climate Condition “Energy and Environment Research, Volume 2 Number 1, Pages 235-243, 2012.

Kıyancıçek. E., “Fotovoltaik Sistemlerin Boyutlandırılması İçin PSV2 Paket Programının Gerçekleştirilmesi” Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, Türkiye, (2013).

Kiam Heong, A., Chong, G., and Li, Y. "PID control system analysis, design, and technology." IEEE transactions on control systems technology 13.4 (2005): 559-576.

Özsoy., M.F., "Hibrit Rüzgâr-Güneş Enerji Üretim Sistemi ile Bir Elektrik Laboratuvarının Genel Aydınlatma Tasarımı" Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Afyonkarahisar, Türkiye, (2011).

Russel S., Norvig P., Artificial Intelligence, A Modern Approach, Prentice Hall, 2nd Edition, 2003.

T. Butz, Fourier Transformation for Pedestrians. Cham, New York, NY, USA: Springer, 2015.

Tektaş M. vd., Yapay Zekâ Tekniklerinin Trafik Kontrolünde Kullanılması Üzerine Bir İnceleme, Marmara Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, 2002.

Zhou, Haihua, et al. "Composite energy storage system involving battery and ultra-capacitor with dynamic energy management in micro grid applications." IEEE transactions on power electronics 26.3 (2010): 923-930.



Makine Öğrenmesi İle Ataletsel Navigasyon Sistemlerinde Doğruluğun İyileştirilmesi

Improving Accuracy of Inertial Navigation Systems with Machine Learning

Fatih Şahin¹, Faruk Ulaşım²

¹ Durali Alıç Mah. 925 Sok. 2/12 06480 Ankara, TÜRKİYE

² Sağlık Mahallesi Hacılar Kasabası Hacılar Hüseyin Aytemiz Meslek Yüksekokulu 71300 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 10/06/2022

Kabul / Accepted: 31/01/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Ataletsel navigasyon sistemleri, genellikle bünyesindeki Ataletsel Ölçüm Biriminden (AÖB) aldığı algılayıcı verilerini kullanarak hava, kara ve deniz araçlarının konumlarını bulabilmesine yardımcı olmaktadır. Son dönemlerde bu teknoloji ayağa veya vücudun çeşitleri yerlerine entegre edilerek giyilebilir hale getirilmektedir, fakat bu sistemlerin en büyük dezavantajı, kullanılan sensörler nedeniyle hataların zamanla artmasıdır. Bu hataları minimize etmek konum doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır. Ayağa takılı ataletsel ölçüm birimi ile yapılan ataletsel navigasyon sistemlerinde (ANS), sıfır hız algılama (SHA) işleminin doğru tespit edilmesi ölçüm hatalarını düşüren en önemli etkidir. Bu çalışmada, SHA'yı daha doğru bir şekilde yapabilmek için Tekrarlayan Sinir Ağı (TSA/RNN) yöntemi olan uzun kısa süreli bellek (UKSB/LSTM) kullanılmıştır. Bu yöntem sensör verilerini kullanarak sıfır hız algılama için ikili bir sınıflandırma yapmaktadır. Önerilen yöntemle yapılan ANS ölçümleri farklı ortamlar için uygulanmış ve standart ANS' den daha yüksek hassasiyette ölçümler yaptığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

“Ataletsel Navigasyon, Ataletsel Algılama, Ataletsel Ölçüm Birimi, Ölü Hesaplama, Sıfır Hız Algılama, Makine Öğrenmesi”

Abstract

Inertial navigation systems help various air, land and sea vehicles to find their positions by using the sensor data received from an Inertial Measurement Unit (IMU). Recently, this technology has become wearable by integrating to the feet or various parts of the body, but the biggest disadvantage of these systems is that their errors grow with time due to the sensing quality of sensors used. Minimizing these errors is of great importance in terms of location accuracy. In inertial navigation systems (INS) made with an inertial measurement unit mounted on the foot, the correct determination of the zero velocity update (ZVA) process is the most important factor reducing the measurement errors. In this study, long short-term memory (LSTM), a Recurrent Neural Network (RNN) method, was used to detect zero velocity state more accurately. This method makes a binary classification for zero velocity detection using sensor data. INS measurements made with the proposed method have been applied for different environments and it has been observed that it provides measurements with higher precision than standard INS.

Key Words

“Inertial Navigation, Inertial Sensing, Inertial Measurement Unit, Dead Reckoning, Zero Velocity Detection, Machine Learning”

1. Giriş

Günümüzde, herhangi bir cismin konumunu belirlemek için kullanılan en yaygın yöntem GNSS sistemlerinin kullanılmasıdır. Cep telefonlarından araç navigasyon sistemlerine kadar çok geniş bir alanda kullanılan bu sistemler, açık alanlarda yüksek hassasiyette çalışırken, özellikle kapalı alanlarda aynı performansı gösterememektedir. Çünkü kapalı ortamlarda duvar, eşya, insan, vb. çeşitli engeller elektromanyetik dalgaların yayılımını etkileyerek sönümlenmesine neden olmaktadır. Sönümlenen elektromanyetik dalgalar ve diğer telsiz cihazlardan kaynaklanabilecek girişim ya da gürültü konum belirlemeyi zorlaştırmaktadır. (Curran vd., 2009; Gu vd. 2009)

Kapalı ortamlarda konum belirlemek açık ortamlara göre daha zor bir problem olduğundan, işlem karmaşıklığı düşürmek için yeni yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. (Curran vd., 2009; Gu vd. 2009) GNSS sinyallerinin kullanılmadığı kapalı alan konumlandırma için Radyo Frekansı Tanımlama (RFID), Kablosuz Yerel Alan Ağı (WLAN/WIFI) ve Ultra Geniş Bant (UWB) gibi yöntemler kullanılmaktadır.

RFID ile yapılan konum belirleme işlemlerinde, navigasyon sistemi içine gömülü mutlak konum bilgisi kullanılmaktadır. Bir nesnenin kimliğini (örn. seri numarası) ve diğer özelliklerini kablosuz olarak iletmek için radyo dalgalarını kullanan RFID (radyo frekansı tanımlama), nesnelerin veya kişilerin hareketlilik takibine olanak tanıyan, gelişmekte olan bir konumlandırma teknolojisidir. Bir metreden daha az sınırlı bir tespit aralığı sunduğundan, RFID kapsamlı konumlandırma için değil, seçici bir nesne tanımlaması için uygundur. Bunun dışında uygun maliyetlidir, bakımı kolaydır ve hem tanımlama hem de konum sağlar. Bu, RFID aracılığıyla konumlandırmayı özellikle endüstriyel ortamlardaki (örneğin varlık yönetimi) izleme çözümleri için uygun hale getirir (Fu vd., 2009). WLAN sistemlerinde RSSI (Received Signal Strength Intensity) yöntemi ile konum bulma teknolojisi ise daha çok hastaneler, üniversiteler, vb. umuma açık olan yerlerde yaygın olarak konum belirlemede kullanılan bir yöntemdir. Kapalı mekânlardaki mevcut WLAN altyapısının kullanılarak konum belirlemenin yapılabilmesi maliyeti düşürmektedir. WLAN sinyal gücüne bağlı olan konum tahminlerinin doğruluğu kapalı ortamdaki engellerden olumsuz etkilenmektedir (Gu vd. 2009).

Bir diğer yöntem olan Ultra geniş band (UWB) sensör teknolojisi, kısa menzilli yüksek band genişliği iletişimde kullanılan bir radyo teknolojisidir. UWB, 500 MHz'den daha yüksek bant genişliğine sahiptir ve bu nedenle sinyaller genellikle birden fazla yolla alıcıya ulaşmaktadır. Bununla birlikte, yüksek bant genişliği farklı frekansların farklı zamanlarda kullanılmasına olanak tanımaktadır ve bu sayede çoklu yol problemlerine ve bozucu etkilere karşı bir çözüm olarak kullanılabilir. RFID, UWB ve WLAN gibi yöntemlerle yapılan konum belirleme işlemleri, kapalı alan içerisinde bir altyapı kurulumu gerektirmektedir (kapalı alanın olduğu yere kurulacak sensörler). Bundan dolayı alternatif bir yaklaşım ise, küçük, düşük güçlü, ucuz olma ve herhangi bir harici altyapıya veya işaret noktasına dayanmama avantajına sahip olan, genellikle bir AÖB olarak yapılandırılan ataletsel sensörleri kullanmak olabilir, fakat bu yöntemin de avantajları ve dezavantajları vardır.

Ataletsel navigasyon sistemleri, çeşitli sensörleri kullanarak, seyir halindeki uçak, kara araçları, füzeler, deniz araçları gibi çeşitli araçlar ile son yıllarda giyilebilir sensörler yardımıyla konumlarını bulmasına yardımcı olmaktadır. Ataletsel navigasyon sistemleri hâlâ başlangıç aşamasında olmasına rağmen, bu algoritmaların insan konumlandırma alanına aktarılması, acil durum ortamlarında personeli koordine etmek için hayati önem taşıyabilmektedir. Örneğin itfaiyeciler gibi ilk müdahale ekipleri için, ekip üyelerinin konumlarını gerçek zamanlı olarak takip etme yeteneği, daha etkili müdahale stratejilerini kolaylaştırabilmektedir ve beklenmedik olaylar veya yaralanmalar durumunda personelin çıkarılmasını hızlandırabilmektedir (Fischer vd., 2010). Ataletsel sensör tabanlı sistemler ortamdaki ve yüksek veri hızı ile sürekli navigasyon bilgisi sağlayabilmektedir. AÖB'leri tipik olarak sırasıyla açısal hız ve doğrusal ivmeyi ölçen birbirine dik yerleştirilmiş üç hız dönüölçer ve yine birbirine dik yerleştirilmiş üç ivmeölçer içermektedir. İvmeölçer, üç ekseninde üç ayrı analog sinyal üretmektedir. Bu nedenle jiroskoplar ve ivmeölçerler tek başına güvenilir ve kararlı veri sağlanamamaktadır ve tek başına kullanıldığında belirli bir süre sonra kaymaktadır. (Nilsson vd., 2012)

Mikroelektromekanik sistemler (MEMS) kullanan nispeten ucuz ataletsel sensörleriyle uygulanan yaklaşımlar yalnızca kısa süreler için doğrudur, çünkü işlenmemiş sensör tahminleri ve gürültüler hızla daha düşük kalitede tahminlere yol açmaktadır. ANS ile konum alınan sistemlerde, hataların zamana bağlı büyümesi nedeniyle büyük konum hatalarıyla karşılaşabilmektedir. Bu hatalar sensör kaynaklı veya uygulanan yöntem sebebiyle oluşan hatalardır. Sonuç olarak, düşük maliyetli AÖB hatasını düzeltmek için harici sensörlerden sık sık ölçüm güncellemeleri yapılmadıkça, konumlandırma uygulamaları için kullanımı nispeten sınırlı olmaktadır. Öte yandan, önemli sayıda kısıtlamaya sahip kapalı ortamlarda, ortamın haritası hakkında ön bilgi, hata büyümesini önemli ölçüde azaltmaya yardımcı olabilmektedir.

Navigasyon sistemlerinin güvenilirliğini artırmak için, sadece sensör derecesini yükseltmek yerine, bir navigasyon sisteminde başka sensörler veya ölçümler kullanmak daha verimli bir yol olmaktadır (Skog vd., 2010). Görüntü sensörleri (örneğin, kamera, hiper-spektral sensörler ve lazer mesafe bulucu gibi), haritalama ve ortam tespiti için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, kameranın yönünün tahmini, aydınlatma koşulları ve çerçevelerdeki özelliklerin benzersizliği ile sınırlıdır. Son zamanlarda, ANS'yi ayakbağı'ya takma konsepti, yaya navigasyonu için düşük maliyetli ANS'yi mümkün hale getirmektedir. Bu, ayağın yerdeyken kısa bir süre sabit kalması gerektiği gibi önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bir yaya ister yürüyor, koşuyor, ya da isterse merdiven çıkıyor olsun, atılan

her adımda, ayakkabıya takılan bir AÖB'nin hata düzeltilmesi için sıfır hız ölçümü sağlayabilen bir duruş aşaması vardır. Bu yaklaşıma SHA denir.

Literatürde yaygın olarak kullanılan SHA yöntemi, takip edilen kişinin yürürken ölçülen birikimli hatanın bastırılması amacıyla ayağın yere temas ettiği andaki duruş durumunu tespit etmektedir. Bu süre boyunca hız hataları Kalman filtresine gönderilir. Genel olarak tahmin teorisi ve özel olarak Kalman filtreleme, çeşitli sensörlerden gelen bilgileri birleştirmek için teorik bir çerçeve sağlamaktadır. Filtre, dahili navigasyon durum değişkenlerinin düzeltilmesi için ANS'ye geri beslenen "duruş" aşamasından faydalanarak hataları tahmin etmektedir. SHA işlemi yalnızca kullanıcının hızını düzeltmekle kalmaz, aynı zamanda konum ve yönelim hatalarını kısıtlamaya ve sensör hatalarını tahmin etmeye de yardımcı olur. Bu nedenle, ANS ölçümlerinde tekrarlanan bu düzeltmeler, hata büyümesini azaltabilir ve konum kaymasını en aza indirebilir. Sonuç olarak, her adımda duruş aşamasını doğru bir şekilde belirlemek ve ardından AÖB hata düzeltilmesi için SHA'yı uygulamak çok önemlidir. Doğru bir şekilde tanımlanırsa, sıfır hız güncellemeleri konumlandırma tahminlerini önemli ölçüde iyileştirebilmektedir. Bununla birlikte, yanlış pozitif algılamalar (sensörlerin olması gerekenden daha fazla değer algılamaları), kullanıcının yörüngesinin uzunluğunun daha az alınmasına neden olurken, yanlış negatif algılamalar (yani, örnekleme veya sensör kaynaklı olarak bazı ölçümlerin alınmaması) hızlı ve sınırsız hata büyümesine yol açmaktadır.

Doğru ve güvenilir sıfır hız tespiti, güncel bir araştırma problemidir. Yürüme, koşma ve merdiven çıkma periyotlarını içeren genel hareket sırasında mevcut sistemlerin yüksek doğrulukta konumlandırma yapabilmesi için önemli ilerlemeler kaydedilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada sıfır hız durumlarını doğrudan sınıflandırmak için bir RNN türü olan uzun kısa süreli bellek (LSTM) sinir ağı eğitilmiş ve eşik ayarlama ihtiyacı ortadan kaldırılmıştır. Bununla birlikte ham veriler kullanılarak elde edilen sıfır hız destekli ANS çözümüyle karşılaştırılarak doğrulukları kıyaslanmıştır. Farklı rotalarda elde edilen konum verileri ve sıfır hız destekli bir ANS'nin hareket tahminlerini önemli ölçüde iyileştirdiği nicel verilerle gösterilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Standart bir ANS'de, AÖB lineer ivmeleri ve açısız hızları ölçer, bunlar daha sonra navigasyon çerçevesine döndürülür ve zamanın bir fonksiyonu olarak durum güncellemeleri sağlamak için integral alınmaktadır. MEMS tabanlı nispeten ucuz ataletsel sensörler ile bu yaklaşım, sensör hataları ve gürültü hızla giderek daha düşük kalite tahminlerine yol açtığından, yalnızca kısa süreler için doğrudur.

Ataletsel sensör kaymasıyla başa çıkmak için kullanılan tekniklerden birisi (harici yardım veya mevcut haritalar gerektirmeyen), AÖB'yi bir insanın ayağına monte etmek ve sıfır hız güncelleme amacıyla kullanmaktır. Bu güncellemeler insanın ayağının yerde düz olduğu ve navigasyon eksen takımına göre sabit olduğu hareket kısmı sırasında meydana gelen hız durum değişkeninin sahte ölçümleridir. Genişletilmiş Kalman filtresi (EKF) gibi bir Bayes filtresi aracılığıyla ANS'ye bu tür sahte ölçümleri dahil ederek, konum bulma, ayak hareketleri arasındaki aralıklarla sınırlandırılır (Foxlin vd., 2005).

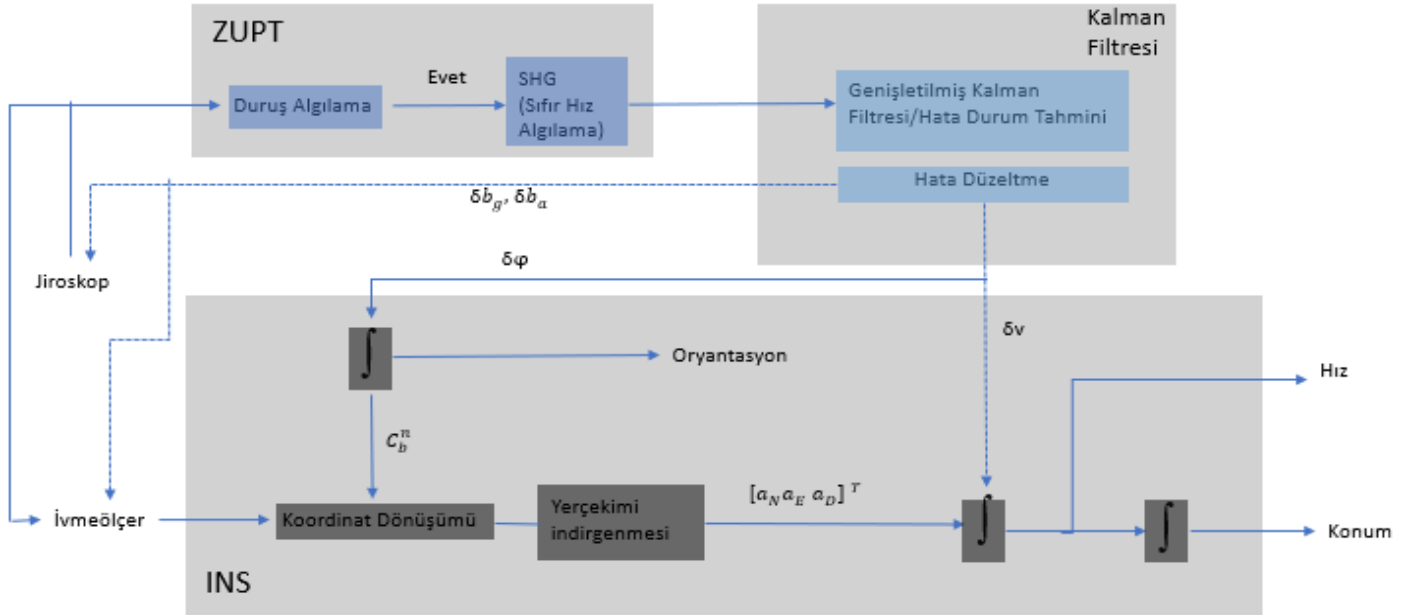
Sıfır hız algılamının tipik yöntemi, ayağın sabit olduğu zamandaki noktayı/noktaları tahmin etmek için AÖB okumalarını kullanan bir olabilirlik oranı testidir (LRT). LRT tipik olarak iki koşulun buluşsal bir göstergesidir: (1) Ölçülen AÖB doğrusal ivmesinin büyüklük olarak eşit ve yerel yerçekimi vektörüne zıt yönde olması ve (2) ölçülen açısız hız normunun sıfır olması. Uygulamada, bu koşullar hiçbir zaman tam olarak yerine getirilmeyecektir; daha ziyade, bu deneysel yöntemler, bir eşikleme prosedürünün uygulanabileceği ölçülebilir bir ölçü içinde kodlanmaktadır.

Eşik parametresi, tipik olarak, minimum konum hatasına (Skog vd., 2010) yol açan değer seçilerek belirli bir veri kümesi için ayarlanır ve ardından gelecekteki deneyler sırasında sabitlenmektedir. Bununla birlikte, sabit bir eşik yalnızca tek tip hareketler için uygundur ve bu, doğası gereği "dinamik" olan hareketler sırasında dedektörün etkinliğini sınırlamaktadır. Dinamik hareketler, ayak zeminle temas ettiğinde çeşitli hızlanma ve açısız hız profilleri ile sonuçlanmaktadır. Sıfır hız algılama deneysel yöntemleri bu miktarlara bağlı olduğundan, dinamik hareketler boyunca güvenilir bir şekilde çalışması için tek bir sabit eşik dedektörünü ayarlamak zorlaşmaktadır. Çok düşük bir eşik, ayak altında sabitken tespitlerin rapor edilememesine yol açarken, çok yüksek bir eşik, ayak hareket ederken yanlış sıfır hız olaylarına yol açmaktadır. Her iki durum da telafi edilemeyen hata birikimine neden olmaktadır (Nilsson vd., 2012).

Sabit eşikli sıfır hız dedektörlerini geliştirmek için literatürdeki çeşitli yöntemler, kullanıcının hareketine uyum sağlayan değişken bir eşik belirlemeye çalışmaktadır. Örneğin, bir Bayes algılama modeli varsayılarak, eşik sıfır hız hipotezinden önce zamana göre değişen bir faktöre ve kaçırılan algılamalar için zamanla değişen bir kayıp olarak hesaba katılabilir (Wahlström vd., 2019). Alternatif olarak, eşik yürüyüş frekansının (Tian vd., 2016), tahmini lineer hızın (Walder vd., 2010; Ren vd., 2016) veya tahmini açısız hızın (Ma vd., 2017) bir fonksiyonu olarak açıkça modellenebilir. Bununla birlikte, her tür hareket için uygun bir eşik uygulayan bir model geliştirmek zor olmaya devam etmektedir.

Bu çalışmada, SHA işlemi, sınıflandırma tabanlı bir makine öğrenmesi yöntemi olan RNN tabanlı LSTM ile yapılmıştır. Çalışmadaki yaklaşıma uygun olarak, sıfır hız eşiklerini uyarlamalı olarak güncellemek için veriye dayalı hareket sınıflandırması kullanılmıştır. AÖB

durağan olduğunda doğrudan sınıflandırmak için tekrarlayan bir sinir ağını eğiterek tamamen öğrenmeye dayalı bir strateji benimsenmiştir. SHA yönteminin kullanıldığı ANS ile SHA kullanılan fakat eğitilmemiş ANS' ler çeşitli deneysel ortamlarda kıyaslanmış ve SHA yönteminin kullanıldığı ANS lerin daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 1. SHG ve Kalman Filtresi kullanılarak hata üretiminin azaltılmaya çalışıldığı standart bir ANS çözüm şeması

2.1. Sıfır Hız Güncellemeli Ataletsel Navigasyon Sistemi

Sistem, kullanıcının hareketini atalet verilerinden tahmin etmek için bir hata durumlu genişletilmiş Kalman filtresi (EKF) kullanır. k adımındaki filtre durumu için, AÖB'nin konumu (p_k), hız (v_k) ve oryantasyonun (q_k)dan oluşur, tümü sabit bir yerel navigasyon çerçevesine göre ifade edilir,

$$x_k = [p_k^T \ v_k^T \ q_k^T]^T \quad (I)$$

Nominal durum, ayrık zamanlı doğrusal olmayan bir hareket modeli (Nilsson vd., 2014) kullanılarak ileriye doğru yayılır,

$$x_k = [p_k \ v_k \ q_k] = \left[p_{k-1} + p_{k-1} + v_{k-1} \Delta t \ v_{k-1} + (R(q_{k-1}) a_k + g) \Delta t \ \Omega(w_k \Delta t) q_{k-1} \right] \quad (II)$$

burada q_{k-1} , Δt aralığı boyunca artan AÖB dönüşü ile w_k açışal hızının entegre edilmesiyle güncellenir. Hız (v_{k-1}), navigasyon çerçevesinde ivme vektörünü ifade ettikten ve yerçekiminden kaynaklanan katkıyı kaldırdıktan sonra, a_k ile güncellenir. Son olarak, p_{k-1} konumu, integral alınmış hız terimi ile güncellenir. Birinci dereceden Euler entegrasyon yöntemini uygulandığını, ancak diğer yüksek dereceli entegrasyon şemalarının da kullanılabileceğini unutmamak gerekmektedir.

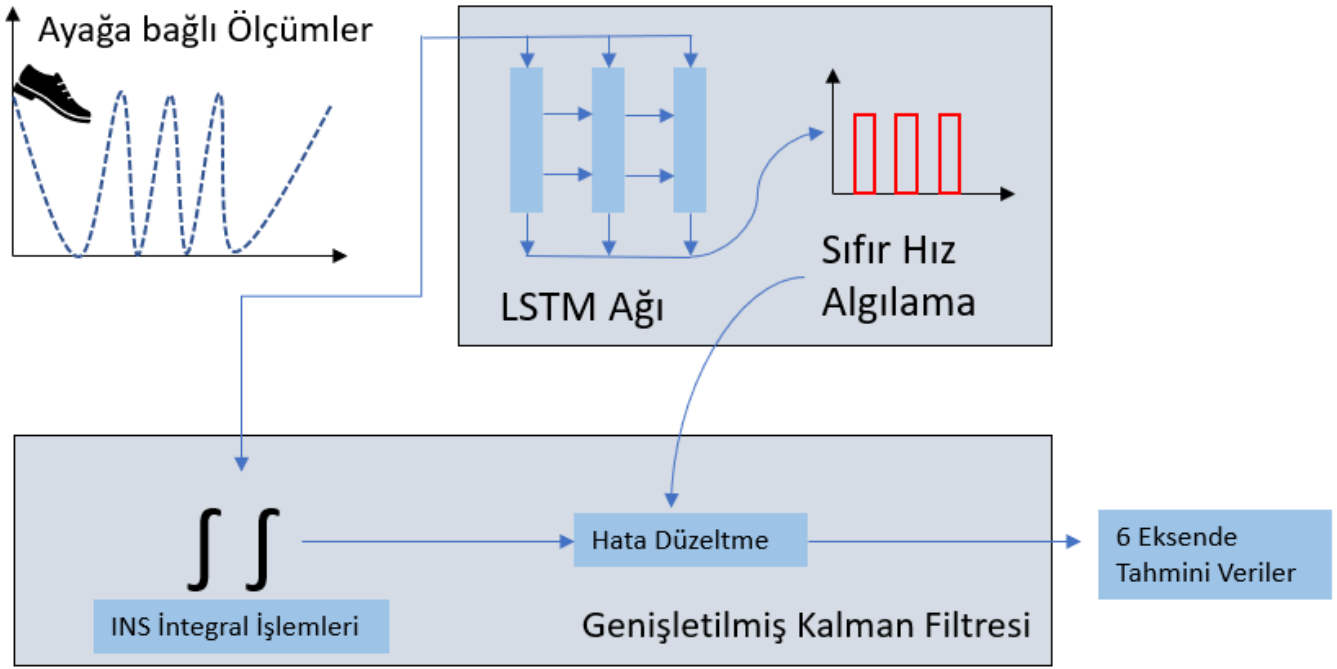
Bu model ivmeölçer veya jiroskop hatalarını içermez (sıfır hız tespiti yoluyla gözlemlenebilseler de), çünkü Nilsson (2012)'de bahsedildiği gibi, sıfır hız varsayımından kaynaklanan yanlışlıklar baskın hata kaynağıdır. Nominal duruma paralel olarak, sistemdeki gürültü ve bozulmaları izlemek için hata durumu zaman içinde ileriye doğru yayılır. Sıfır hız durumu tespit edildiğinde, hız hatasının bir tahminini üretmek için mevcut hız durumu sıfır ile karşılaştırılır. Sıfır hızlı sözde ölçümün ek Gauss gürültüsü tarafından bozulduğu olağan varsayımını yapılır ve standart EKF düzeltme adımı uygulanır.

2.2. RNN Tabanlı Sıfır Hız Sınıflandırması

Uzun Kısa Süreli Bellek ağları – genellikle “LSTM” olarak adlandırılır – uzun süreli bağımlılıkları öğrenebilen özel bir RNN türüdür. İlk defa Hochreiter & Schmidhuber (1997) tarafından kullanılmış ve sonraki çalışmalarda birçok kişi tarafından geliştirilip, popüler hale getirilmiştir. Çok çeşitli problemler üzerinde çok iyi çalışmalar ve günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

RNN'ler, uzun vadeli bağımlılık sorununu önlemek için tasarlanmıştır. Bilgileri uzun süre hatırlamak, pratik olarak onların varsayılan davranışdır, öğrenmekte zorlandıkları bir şey değildir. Sıfır hız algılamaya yönelik öğrenmeye dayalı yaklaşım, sıfır hız detektörünü tamamen tekrarlayan bir sinir ağı (RNN) ile değiştirerek çoğu modelleme varsayımını (örneğin, farklı hareket sınıflarının varsayımı)

ortadan kaldırır. Sıfır hız etiketleriyle atalet ölçümleri içeren bir veri kümesinden sıfır hız tespitinde ikili bir sınıflandırıcıyı eğitmek için denetimli bir öğrenme yaklaşımı kullanılmaktadır.



Şekil 2. RNN eklenerek SHG yapılan geliştirilmiş ANS çözümü

Atalet ölçümleri sıralı ve düşük boyutludur (zaman adımı başına altı değer), bu da onları dizi öğrenimi için çok uygun hale getirir. Kısa bir veri dizisini kullanan klasik sıfır hız algılama yöntemlerinin aksine, bir RNN, bellek durumunu uzun giriş dizileri arasında yayabilir. Bu nedenle ağ, sınıflandırma sırasında zamansal bağlamdan faydalanabilir ve insan yürüyüşünün periyodik doğasından yararlanabilir. Uygulanan yaklaşım, sıralı veri işleme için popüler bir seçim olan uzun kısa süreli bellek (LSTM) ağı adı verilen bir tür RNN kullanır; bir RNN ağı, kaybolan gradyanlara (birçok RNN modelinde bilinen bir sorun) karşı dirençliyen gradyan bilgisini verimli bir şekilde geri yayabilir.

Her eylemsiz veri kümesi için ikili sıfır hız sınıflandırmaları (hareket edene karşı durağan) oluşturulmaktadır ve sınıfları sıfır hız sınıflandırıcının denetimli eğitimi için kullanılmaktadır. Mevcut çalışma, basınç algılama (Olivares vd., 2012) veya manuel anlatma yoluyla veri kümesi sınıflandırması gerçekleştirirken, bir hareket tipinin kısa bir hareket dizisinde konum hatasını en aza indirmek için optimize edilmiş mevcut klasik dedektörlerin çıktısından yararlanılmaktadır. Bu sıfır hız sınıflandırma tekniği, iki koşulun karşılanması durumunda sıfır hız detektörlerinin optimal çıktılar üretebileceği varsayımına dayanmaktadır: kullanıcının hareketi sabit bir tip ve yoğunluktur, ve sıfır hız eşiği mevcut hareket için optimize edilmiştir.

2.3. Deney

RNN için kullanılan eğitim verileri bir AÖB tarafından toplanmıştır ve önerilen yöntemler iki veri seti kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu veri setleri; yürüme hareketlerinden oluşan bir veri seti ve bir merdiven çıkma veri setinden oluşmuştur.

2.3.1. Veri kümesi toplama

Veri seti 50 hareket denemesinden oluşmaktadır. Tüm denemeler, sağ ayaklarının üstüne ayakkabı bağcıkları ile sabitlenmiş bir AÖB takılmış tek bir kişi tarafından yapılmıştır. İlk veri toplama için 200 Hz'de çalışan bir MTI-30-2A8G4-DK AÖB kullanılmıştır. Hareket denemeleri temel olarak çeşitli yürüme rotalarından oluşmuştur, ancak aynı zamanda birkaç farklı merdiven çıkma içermektedir. RNN

sıfır hız sınıflandırıcısını eğitmek için Bölüm 2.2.'de açıklanan prosedürü kullanarak üretilen ikili sıfır hız sınıflandırmaları gereklidir. Özetle, yere göre konum hatasını en aza indirerek en iyi performans gösteren veri grubundan sıfır hız çıktısı seçilmiştir.

2.3.2. RNN eğitimi

Bir RNN hücresi, mevcut $x^{(t)}$ girdisini ağın gizli durumu $h^{(t-1)}$ ile birleştiren temel tekrarlayan hücre üzerine kurulur:

$$h^{(t)} = \phi(W^{hx}x^{(t)} + W^{hh}h^{(t-1)})$$

(III)

$h^{(t)}$ çıkışı, önceki durum ile $\tanh(\cdot)$ gibi bir aktivasyon fonksiyonundan, $\varphi(\cdot)$ geçen mevcut girdinin doğrusal bir birleşimidir. W^{hx} ve W^{hh} matrisleri, eğitim sırasında güncellenen ağırlıkları içerir. Bu duruma ($h^{(t)}$) ek olarak, RNN'ler bir dahili durum ($s^{(t)}$) yayar. Her zaman adımında, $s^{(t)}$ güncellemeleri iki kapı yapısı tarafından yönetilir: giriş kapısı $i^{(t)}$ ve unutma kapısı $f^{(t)}$ 'dır. Giriş kapısı, $g^{(t)}$ giriş düğümünün hangi elemanlarının duruma ekleneceğini kontrol ederken, unutma kapısı artık ihtiyaç duyulmayan durum elemanlarını kaldırır. $h^{(t)}$ 'ye geçirilecek $s^{(t)}$ elemanlarını seçmek için üçüncü bir $o^{(t)}$ kapısı kullanılır,

$$g^{(t)} = \phi(W^{gx}x^{(t)} + W^{gh}h^{(t-1)} + b_g), \quad (IV)$$

$$i^{(t)} = \sigma(W^{ix}x^{(t)} + W^{ih}h^{(t-1)} + b_i), \quad (V)$$

$$f^{(t)} = \sigma(W^{fx}x^{(t)} + W^{fh}h^{(t-1)} + b_f), \quad (VI)$$

$$o^{(t)} = \sigma(W^{ox}x^{(t)} + W^{oh}h^{(t-1)} + b_o), \quad (VII)$$

$$s^{(t)} = g^{(t)} \odot i^{(t)} + s^{(t-1)} \odot f^{(t)}, \quad (VIII)$$

$$h^{(t)} = \phi(s^{(t)}) \odot o^{(t)}, \quad (IX)$$

$\sigma(\cdot)$ sigmoid fonksiyondur ve eleman bazında çarpmayı temsil eder. Sekiz adet ağırlık parametresi (W_{jk}) vardır, burada $j \in \{g, i, f, o\}$ ve $k \in \{x, h\}$, b_g, b_i, b_f, b_o eğitilebilir ağ parametreleridir. RNN'ler, kaybolan gradyan sorununa karşı dayanıklılıklarından dolayı popüler bir seçim haline gelmiştir, çünkü $s^{(t)}$, zamansal olarak birbirinden uzak olan zaman adımları arasında doğrudan bir bağlantı sağlar. Böylece, gradyanlar uzun diziler boyunca zaman içinde geri yayılabilir ve ağırlık uzun menzilli bağımlılıkları öğrenmesini sağlar. Belirlenen sıfır hız detektörü, katman başına 80 birim içeren 6 katmanlı bir RNN'den oluşmaktadır. RNN'den sonra ağırlık çıkışı 2D'ye indirilen tek bir tam bağlı katman eklenir.

Bir softmax fonksiyonu, ayrı çıkışların dedektörünün AÖB'nin hareket halinde veya sabit olduğuna ilişkin karşılık gelen çıkışların toplamını 1'e sınırlamak için kullanılır. Çıktı, yalnızca kararlılık 0,85'in üzerinde olduğunda AÖB'nin durağan olduğunu varsayacak şekilde filtrelenmektedir. (yanlış pozitif algılamaların neden olduğu hatayı en aza indirmek için deneysel olarak belirlenir).

Bölüm 2.2.'de açıklanan veri seti, sırasıyla 41 ve 9 hareket denemesinden oluşan bir eğitim seti ve bir test seti olarak ayrılmıştır. RNN giriş dizileri, ham, altı kanallı atalet verilerinden oluşmuştur. Her hareket denemesinden, her biri ardışık 100 AÖB zaman adımından (veya 200 Hz'de 0,5 saniyelik atalet verisinden) oluşan 7.000 küme çıkarıldı ve bu, toplamda $N=420.000$ ayrı numunelik bir veri kümesi boyutuyla sonuçlandırılmıştır.

Her eğitim örneği $x_i \in \mathbb{R}^{100 \times 6}$ son zaman adımında orta durum etiketine karşılık gelen tek bir $y_i \in \{0,1\}$ etiketine sahiptir. Her eğitim örneği için, daha hızlı veya daha yavaş hareketi simüle etmek için rastgele bir döndürme (R) (örnekteki tüm veri noktaları için a ve ω 'ye uygulanır), rastgele bir ölçeklendirme faktörü, $s \in [0.90, 1.10]$ uygulandı, ve her kanala sıfır ortalamalı Gauss gürültüsü ($\sigma=0.075$) eklendi. Standart bir çarpaz entropi kayıp fonksiyonu ile Adam optimizyer kullanılarak model 300 aralık için eğitildi.

$$\zeta = -\frac{1}{N} \sum_i^N y_i \log(p_i) + (1 - y_i) \log(1 - p_i) \quad (X)$$

Model PyTorch üzerinde uygulandı. Eğitim ve test setlerinde sırasıyla %95-90.0 sınıflandırma doğruluğu elde edildi.

2.3.3. Yürüyüş deneyleri

Kırıkkale Üniversitesi Hacılar Hüseyin Aytemiz Meslek Yüksekokulu spor sahasında bir dizi hareket denemesi yaparak, önerilen algoritma farklı rotalar üzerinde değerlendirildi. Bu deneyler için 200 Hz'de çalışan bir MTI-30-2A8G4-DK AÖB kullanıldı. Her yürüyüş denemesi için ARMSE (Konum hatası sonuçları) rapor edildi. Deneme yürüyüşleri, başlangıç noktasından aynı konuma tekrar dönecek şekilde karesel bir rota ve dairesel rota olacak şekilde, farklı zaman dilimlerinde iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir.

10m x 10m boyutlarındaki karesel alanlarda farklı zamanlarda üçer tur atılarak yapılan testler sonucunda elde edilen grafikler şekil 3,4,5'da gösterilmektedir. Yer konumunu doğrulamak için Google Earth üzerinde rotalar çizilerek şekil 6'de gösterilmiştir. Buna göre şekil 3,4,5'da görüldüğü üzere RNN kullanılarak geliştirilen çözümün ZUPT kullanan standart ANS çözümünden daha doğru bir şekilde konum doğruluğu gözlenmektedir.

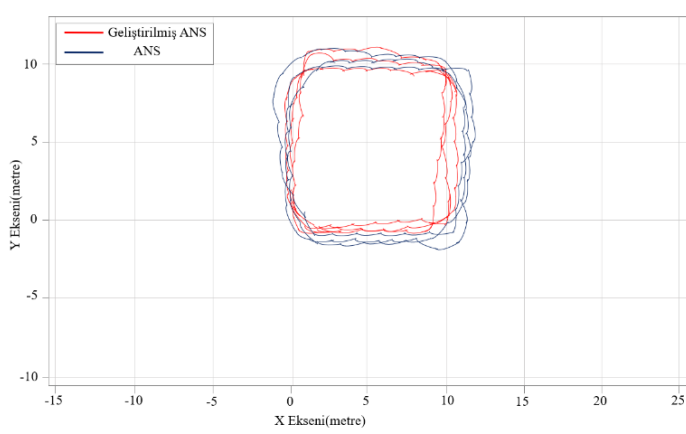
5 metre yarıçaplı dairesel alanlarda farklı zamanlarda üçer tur atılarak yapılan testler sonucunda elde edilen grafikler şekil 7, 8, 10'da gösterilmektedir. Yer konumunu doğrulamak için Google Earth üzerinde rotalar çizilerek şekil 9'de gösterilmiştir. Şekil 7, 8, 10'da

görüldüğü gibi RNN kullanılarak geliştirilen çözüm, dairesel bir rota üzerinde standart ANS çözümünden daha az hata üreterek konum doğruluğu sağlandığı gözlenmektedir.

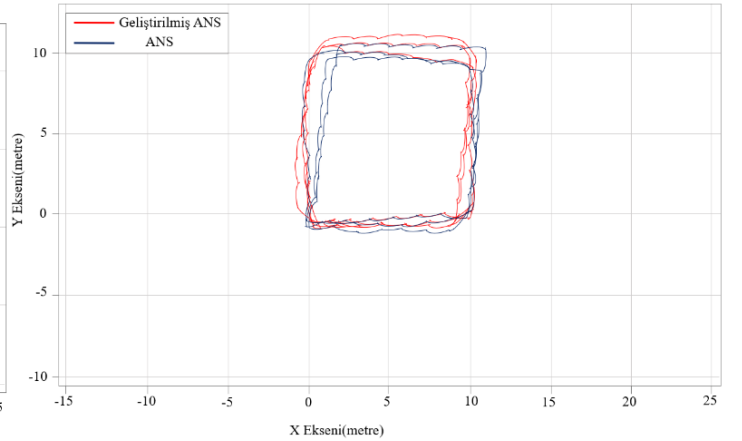
Her deneme için standart ataletsel navigasyon sistemi ve RNN tabanlı sıfır hız sınıflandırıcı kullanan sistem üzerinde test edilmiştir. Tablo 1, denemeler için bu sistemlerin performansını göstermektedir. Ortalama olarak, RNN tabanlı sistem ile standart ANS'den %42.8 daha düşük ARMSE(Average Root Mean Square Error) elde edilmiştir. ANS olarak XSENS firmasına ait MTI-30-2A8G4-DK kullanılmıştır.

Tablo 1. Yürüyüş deneyleri

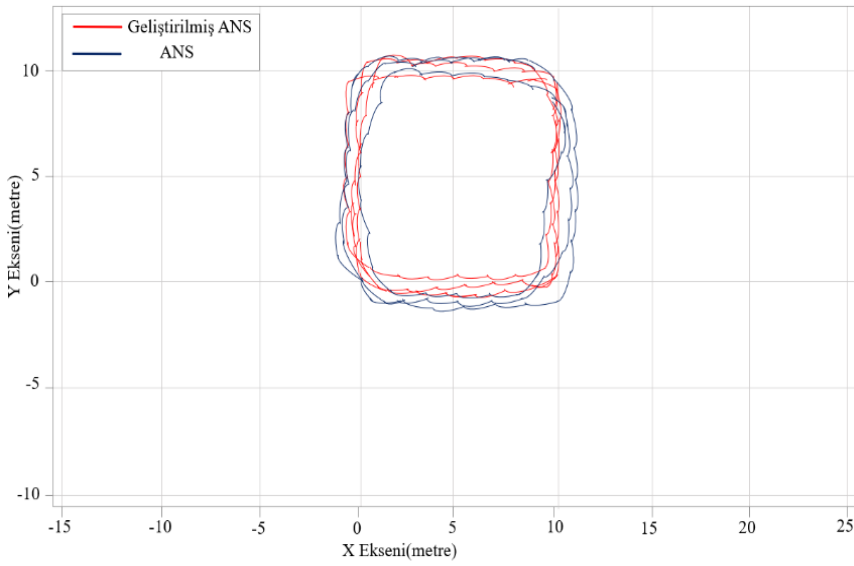
Hareket Tip	Set	ARMSE(metre)	
		ANS	RNN(LSTM)
Yürüyüş	0	1.78	0.45
	1	1.89	0.7
	2	2.52	1.56
	3	3.45	1.39
	4	2.1	0.88
	5	1.65	0.76
Ortalama		2.23	0.956



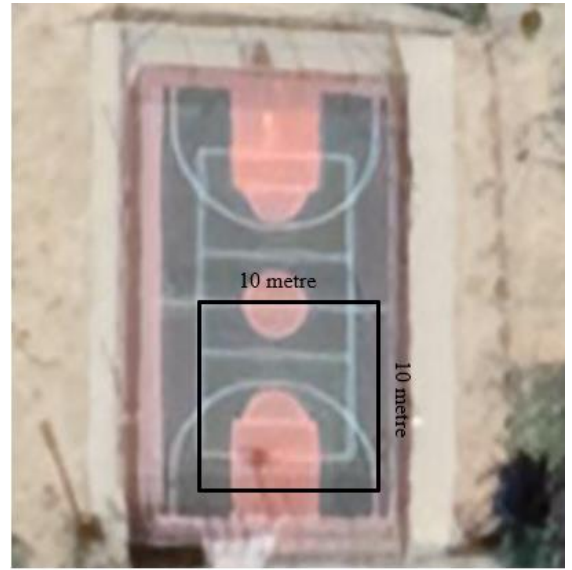
Şekil 3. Karesel olarak belirlenen rota üzerinde yapılan 1. deney



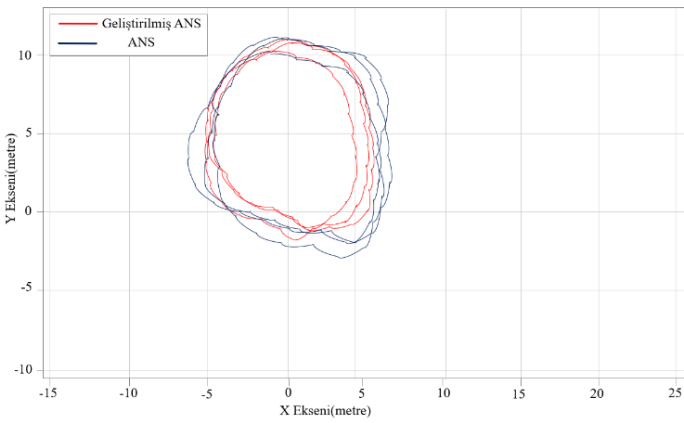
Şekil 4. Karesel olarak belirlenen rota üzerinde yapılan 2. deney



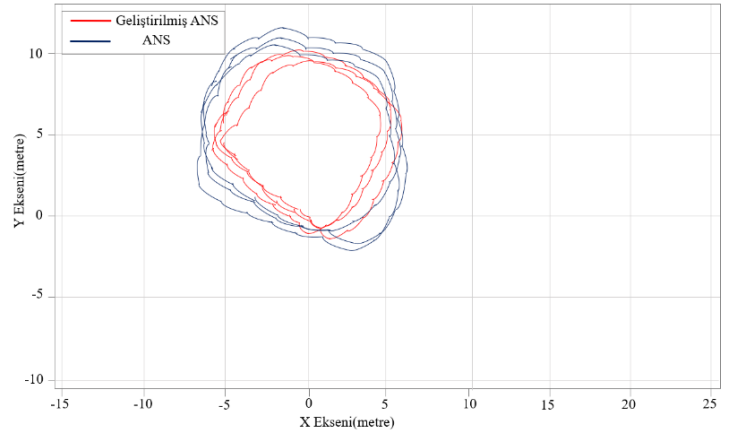
Şekil 5. Karesel olarak belirlenen rota üzerinde yapılan 3. deney



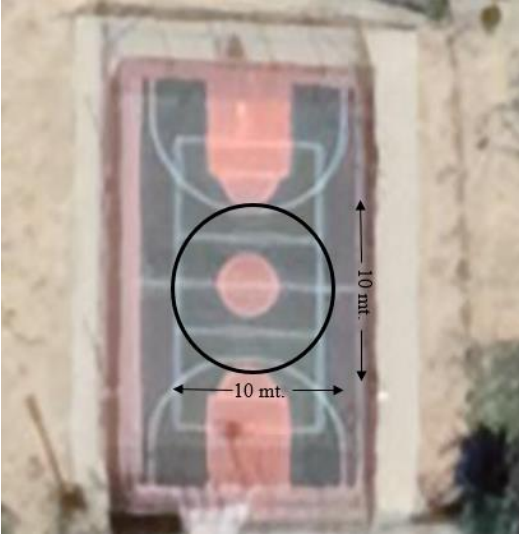
Şekil 6. Karesel rota için doğrulama rotası



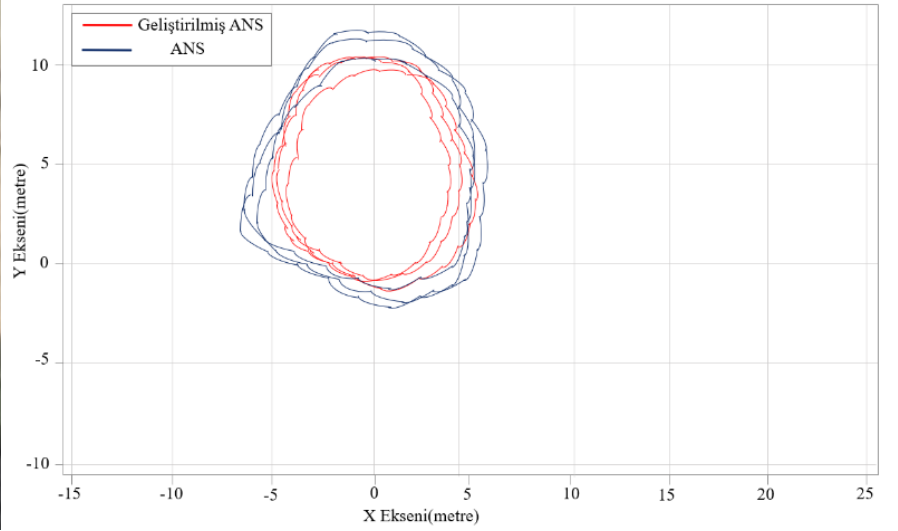
Şekil 7. Dairesel olarak belirlenen rota üzerinde yapılan 1. deney



Şekil 8. Dairesel olarak belirlenen rota üzerinde yapılan 2. deney



Şekil 9. Dairesel rota için doğrulama rotası



Şekil 10. Dairesel olarak belirlenen rota üzerinde yapılan 3. deney

2.3.4. Merdiven çıkma deneyleri

Çalışmada iki ve dört kat merdiven çıkılan bir veri seti de eklenmiştir. Deney sırasında her kat arasında kısa bir yatay yürüyüş yolu da mevcuttur. En yüksek kat zemin kattan yaklaşık 8.3 m yüksekliktedir. Deneyde toplam dört defa merdiven çıkma denemesi gerçekleştirilmiştir.

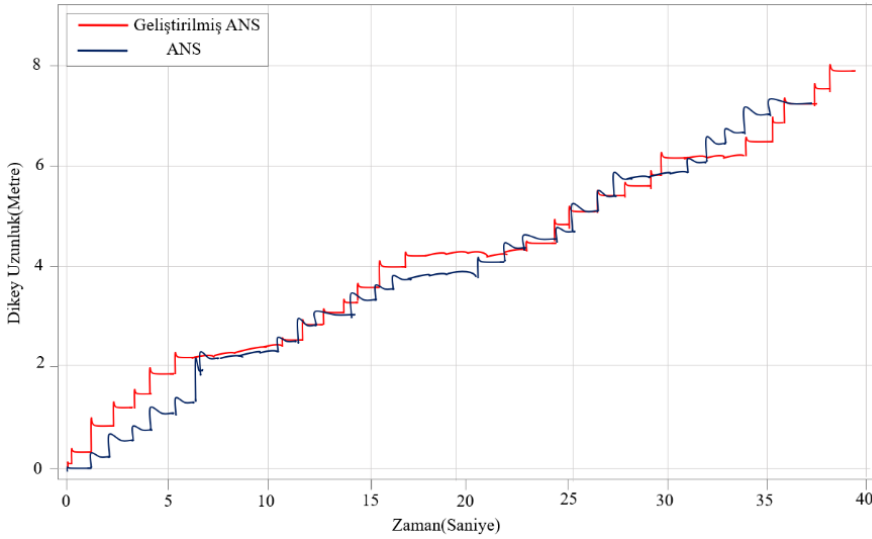
İlk dört deneme, sırasıyla zemin kattan 1. ve 2. katlara çıkmaktan oluşmaktadır. Diğer denemede zemin kattan 1., 2., 3., ve 4. kat'a çıkılmıştır. Yine, harekete uyarlamalı dedektörün ve RNN tabanlı sıfır hız sınıflandırıcının performansı standart ANS ile karşılaştırılmıştır. Buradaki grafiklere bakılacak olursa yine geliştirilmiş ANS çözümünün, standart ANS çözümünden daha yüksek bir doğruluk sağladığı gözlemlenmiştir.

Tablo 2, AÖB'nin tahmini yüksekliği ile yörünge en uzak noktasındaki bilinen yüksekliği arasındaki fark olarak tanımlanan dikey en uzak nokta hatası için sonuçları göstermektedir. Her durumda, veriye dayalı dedektör standart bir ANS yönteminden büyük bir farkla daha iyi performans göstermiştir. Şekil 11, 12 merdiven çıkma deneylerinin sonuçlarını göstermektedir.

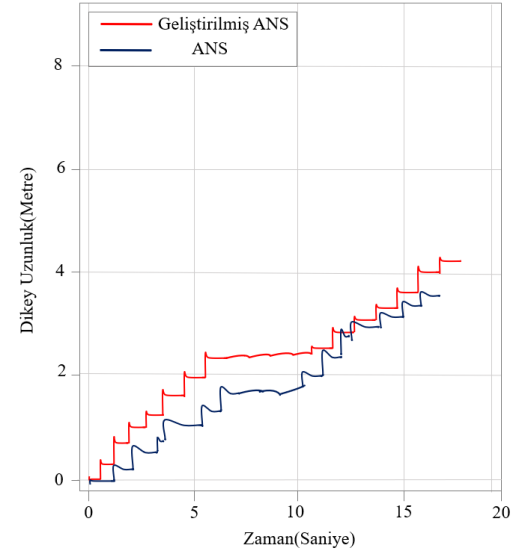
Şekil 11 ve 12'de, standart bir ANS çözümünün hem fazla tahmin edilen hem de eksik tahmin edilen dikey yer değiştirmeyi göstermektedir. Buna karşılık, önerilen veriye dayalı çözüm, ortalama olarak zemin seviyesi tahmini için gereken doğruluğu aşan bir dikey tahmin üretmiştir. Önerilen RNN çözümü, 100 adımda dikey ekseninde 1 metreden daha iyi bir doğruluğu korurken, standart ANS çözümü, 25 adımda bu hata sınırını aşmıştır.

Tablo 2. Merdiven çıkma deneyleri

Hareket Tip	Set	Yatay Hata	
		ANS	RNN(LSTM)
Merdiven Çıkma	0	1.5	0.77
	1	2.85	1.11
	2	1.99	0.66
	3	2.74	1.39
Ortalama		2.27	0.9825



Şekil 11. Merdiven çıkma deneyleri 1.deney



Şekil 12. Merdiven çıkma deneyleri 2.deney

3.Sonuç

RNN tabanlı LSTM sıfır hız sınıflandırıcısının farklı AÖB yerleşimleri, kullanıcıları ve değişen hareket türleri için aynı performansı gösterebileceği gösterilmiş olsa da, farklı donanım özelliklerine sahip bir AÖB ile düzgün çalışması beklenmemektedir. Bunu geliştirmek için, eğitim veri kümesi içindeki verileri farklı bir AÖB'nin çıktılarını temsil edecek şekilde dönüştüren bir veri işleme tekniği kullanılması gerekmektedir. Dönüştürülen verilerle sıfır hız sınıflandırıcısını yeniden eğiterek, RNN ağı farklı, daha düşük kaliteli bir sensörden gelen atalet verilerine daha iyi genelleme yapılabilir.

Tasarlanan yöntem büyük ölçüde ayak üzerindeki AÖB'nin oryantasyonundan bağımsız olarak çalıştırılmıştır ve ayrıca AÖB'nin ayakkabı üzerindeki konumuna ve genel olarak ayakkabı tipine göre değişmeyecek şekilde konumlandırılmıştır. Önerilen dönüştürme tekniği, her AÖB kanalına sıfır ortalamalı Gauss gürültüsü ekler ve ardından orijinal verileri daha düşük bir frekansa indirger. Bu adımlar, değişen AÖB örnek hızlarını ve değişen ölçüm kalitesini hesaba katmak içindir. Yeni dönüştürülen veriler daha sonra RNN ağını alternatif bir AÖB ile uyumlu olacak şekilde yeniden eğitmek için kullanılmaktadır.

Öğrenmeye dayalı çözümün sağladığı doğruluk artışına rağmen, daha fazla iyileştirmenin yapılabileceği alanlar vardır. RNN tabanlı sıfır hız sınıflandırıcı, test alanı dışındaki farklı alanlarda ve daha yüksek hızlarda toplanan eğitim verilerini kullanabilmektedir. Öğrenme tabanlı dedektörlerin kullanımından elde edilen konumlandırma doğruluğundaki artışın, öncelikle gelişmiş bir hız tahmininin bir sonucu olduğu belirtilmelidir. Sıfır hız güncellemeleri AÖB yuvarlanma ve eğim tahminlerini etkilese de, sapma (yön) gözlemlenemez halde kalır. Öğrenmeye dayalı dedektörlerin kullanımının, tutum tahmininin doğruluğunu büyük ölçüde değiştirmedeği söylenebilir.

Doğru SHA'nın sağlanması, ayağa monte edilen ataletsel verilerden doğru iç mekan konumlandırmasını elde etmeye yönelik çok önemli bir adımdır. RNN tabanlı sıfır hız sınıflandırıcısı, harekete özgü herhangi bir parametre ayarı gerektirmeden sıfır hızlı ölçümleri doğrudan verir. Önerilen teknik için hareket görevleri gerçekleştiren farklı kişilerden gelen birkaç büyük veri setinde mevcut eşik tabanlı dedektörlerden daha iyi performans gösterdiğini ve RNN tabanlı sıfır hız sınıflandırıcısının, merdiven çıkma hareketlerini içeren veri setlerinde en düşük ortalama hatayı ürettiği gösterilmiştir. Ayrıca, RNN tabanlı sınıflandırıcının ek eğitim verileri toplamaya gerek kalmadan daha düşük maliyetli AÖB'lerle kullanımına izin veren bir genelleme yöntemi de sunulmaktadır.

4.Referanslar

Curran, K., & Norrby, S. (2009). RFID-enabled location determination within indoor environments. *International Journal of Ambient Computing and Intelligence (IJACI)*, 1(4), 63-86.

Fischer, C., & Gellersen, H. (2010). Location and navigation support for emergency responders: A survey. *IEEE Pervasive Computing*, 9(01), 38-47.

Foxlin, E. (2005). Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors. *IEEE Computer graphics and applications*, 25(6), 38-46.

- Fu, Q., & Retscher, G. (2009). Another look indoors GPS+ RFID. *GPS World*, 20(3).
- Gu, Y., Lo, A., & Niemegeers, I. (2009). A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks. *IEEE Communications surveys & tutorials*, 11(1), 13-32.
- Ma, M., Song, Q., Li, Y., & Zhou, Z. (2017, December). A zero velocity intervals detection algorithm based on sensor fusion for indoor pedestrian navigation. In *2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)* (pp. 418-423). IEEE.
- Nilsson, J. O., Gupta, A. K., & Händel, P. (2014, October). Foot-mounted inertial navigation made easy. In *2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)* (pp. 24-29). IEEE.
- Nilsson, J. O., Skog, I., & Händel, P. (2012). A note on the limitations of ZUPTs and the implications on sensor error modeling. In *2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 13-15th November 2012.
- Olivares, A., Ramírez, J., Górriz, J. M., Olivares, G., & Damas, M. (2012). Detection of (in) activity periods in human body motion using inertial sensors: a comparative study. *Sensors*, 12(5), 5791-5814.
- Ren, M., Pan, K., Liu, Y., Guo, H., Zhang, X., & Wang, P. (2016). A novel pedestrian navigation algorithm for a foot-mounted inertial-sensor-based system. *Sensors*, 16(1), 139.
- Skog, I., Handel, P., Nilsson, J. O., & Rantakokko, J. (2010). Zero-velocity detection—An algorithm evaluation. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 57(11), 2657-2666.
- Skog, I., Nilsson, J. O., & Händel, P. (2010, September). Evaluation of zero-velocity detectors for foot-mounted inertial navigation systems. In *2010 International Conference on indoor positioning and indoor navigation* (pp. 1-6). IEEE.
- Tian, X., Chen, J., Han, Y., Shang, J., & Li, N. (2016). A novel zero velocity interval detection algorithm for self-contained pedestrian navigation system with inertial sensors. *Sensors*, 16(10), 1578.
- Wahlström, J., Skog, I., Gustafsson, F., Markham, A., & Trigoni, N. (2019). Zero-velocity detection—A Bayesian approach to adaptive thresholding. *IEEE Sensors Letters*, 3(6), 1-4.
- Walder, U., & Bernoulli, T. (2010, September). Context-adaptive algorithms to improve indoor positioning with inertial sensors. In *2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation* (pp. 1-6). IEEE.



Farklı Matrisli Dökme Demirlerde Aşınma Özelliklerinin Gözden Geçirilmesi

Review Of Wear Properties In Different Matrix Cast Irons

Ruziye Çamkerten¹ , Mehmet Erdoğan² 

¹ Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 06500, Ankara, Türkiye

² Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, 06500, Ankara, Türkiye

Başvuru/Received: 27/12/2022

Kabul / Accepted: 25/01/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Bu çalışmada, literatürde yer alan dökme demirlerde matris yapı türlerinin aşınma özelliklerine etkileri gözden geçirilmiştir. Dökme demirlerde (DD) matris ferritik olduğunda aşınma kaybı her zaman daha yüksek olmaktadır. Perlitik matrisli DD'lerde aşınma direnci lamellar arası mesafe azaldıkça artmaktadır. Ferritik-perlitik çift matrisli DD'lerde aşınma direnci, perlit hacim oranındaki artışa paralellik göstermektedir. Martensitik matrisli DD'lerde aşındırıcıların kırılma miktarı artarak aşınmaya katkıda bulunmaktadır. Ferritik-martensitik çift matrisli DD'lerde martensitik yapı hacim oranı arttıkça aşınma kaybı azalmaktadır. Östenitik matrisli DD'lerde östenitin daha düşük sertliği ve daha yüksek derecede plastik deformasyonu nedeniyle matrisin güçlü pekleşme sertleşmesi diğer matris yapılarını aşan bir sertlikle sonuçlanarak diğer matrislerden daha iyi aşınma direnci sergilemektedir. Ösferritik matrisli DD'lerde aşınma testi sırasında yüksek bölgesel gerilme veya plastik deformasyonun neden olduğu gerilim kaynaklı östenitten martensite dönüşüm (Transformation induced plasticity-TRIP) aşınma direncini artırmaktadır. Ayrıca yüksek aşınma direncine ösferritik yapının pekleşmesinde katkıda bulunmaktadır. Ferritik-Ösferritik çift matrisli DD'lerde ösferritik yapı hacim oranı arttıkça aşınma kaybı azalmaktadır. Literatürdeki çalışmaların sonuçlarına göre, aşınma direnci açısından matris türleri birbirleri ile karşılaştırıldığında genel olarak östenitik matrisler>ösferritik matrisler>martensitik matrisler>perlitik matrisler>ferritik olarak görülebilir. Aşınma direnci açısından çift matris türleri birbirleri ile karşılaştırıldığında ise genel olarak ferritik+ösferritik matrisler>ferritik+martensitik matrisler>ferritik+perlitik matrisler sıralamasını takip etmektedir.

Anahtar Kelimeler

“Dökme demir, matris yapısı, aşınma”

Abstract

In this study, the effects of matrix structure types on the wear properties of cast irons with different matrices in the literature were reviewed. In cast irons (CI), the wear loss is always higher when the matrix is ferritic. Wear resistance of pearlitic matrix CIs increases with decreasing lamella distance. The wear resistance of ferritic-pearlitic dual matrix CIs shows parallelism with the increase in the pearlite volume fraction. In CIs with martensitic matrix, the fracture rate of abrasives increases, contributing to increased wear. In CIs with ferritic+martensitic dual matrix, abrasive wear loss decreases as the martensitic structure volume fraction increases. In CIs with austenitic matrix, the strong strain hardening of the matrix results in a hardness exceeding that of other matrix structures, exhibiting better wear resistance than other matrices, due to the lower hardness and higher degree of plastic deformation of the austenite. In CIs with ausferritic matrix, stress-induced austenite-to-martensite transformation (TRIP) caused by high local stress or plastic deformation during the abrasion test increases the wear resistance. In addition, the hardening of the ausferritic structure contributes to the high wear resistance. In CIs with Ferritic+Ausferritic dual matrix, abrasive wear loss decreases as the ausferritic structure volume fraction increases. According to the results of the studies in the literature, when the matrix types are compared with each other in terms of wear resistance, generally austenitic matrices>ausferritic matrices>martensitic matrices>pearlitic matrices>ferritic. When dual matrix types are compared with each other in terms of wear resistance, they generally follow the order of ferritic+ausferritic matrices>ferritic+martensitic matrices>ferritic+perlitic matrices.

Key Words

“Cast iron, matrix structure, the wear”

1. Giriş

Çok uygun maliyetli dökme demir malzemeler, endüstride çok geniş kullanım alanlarına sahip bulunmaktadır. Bu malzemeler kullanıldıkları koşullar itibari ile de aşınmaya maruz kalabilmektedirler. Farklı türden dökme demir malzemelerde matris yapılarının oluşumunu döküm koşulları, kimyasal bileşim ve uygulanan ısı işlemler belirlemektedir. Dökme demir türü farklı olmakla beraber bu malzemelerdeki matris yapıların ortak paydası ferritik, perlitik, ferrit+perlit, martensitik, martensitik+ferritik, östenitik, ösferritik veya ferritik+ösferritik türlerden olabilmektedir. Bir mikroyapıda çoğunluğu oluşturan matris yapı pek çok mekanik özellikleri belirlemede başat rol oynadığı iyi bilinen bir gerçektir. Bu yaklaşım çerçevesinde literatür taramasının amacı, literatürde yer almış çalışmalar ışığında genel olarak dökme demir malzemelerdeki yukarıda anılan matris yapıların aşınma özelliklerini rapor etmektir.

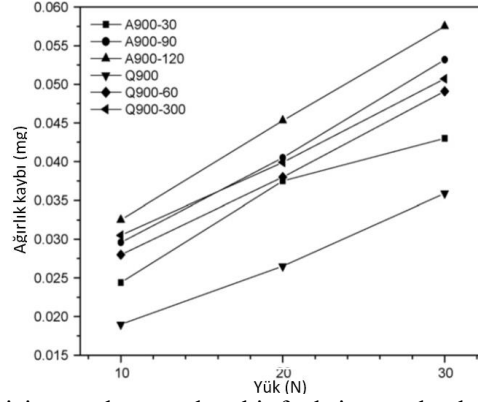
2. Dökme Demirlerde Farklı Matris Yapıların Aşınma Özellikleri

Dökme demirlerin aşınma özellikleri ile ilgili literatüre bakıldığında farklı türden ve farklı matrise sahip dökme demirlerde aşınma özelliklerinin incelendiği çok sayıda çalışma görülmektedir (Sellamuthu ve diğerleri, 2018; Sahin & Durak, 2007; Batra ve diğerleri, 2013; Wang ve diğerleri, 2018; Sahin ve diğerleri, 2007; Sharma & Gupta, 2015; Sahin ve diğerleri, 2010; Kumari & Rao, 2009; Zhou ve diğerleri, 1993; Ghaderi ve diğerleri, 2003; Ahmadabadi ve diğerleri, 1991; Krzynska ve diğerleri, 2015; Abedi ve diğerleri, 2010; Wang ve diğerleri, 2017; Velez ve diğerleri, 2001; Haseeb ve diğerleri, 2000; Lerner & Kingsbury, 1997; Keough & Hayrynen, 2005; Laird ve diğerleri, 2000; Vadiraj ve diğerleri, 2010; Balachandran ve diğerleri, 2011; Woodward ve diğerleri, 2022; Cardoso ve diğerleri, 2014; Chiniforush ve diğerleri, 2016; Daber ve diğerleri, 2008; Wen ve diğerleri, 2019; Balos ve diğerleri, 2016; Zhang ve diğerleri, 2014; Zimba ve diğerleri, 2004; Wang ve diğerleri, 2020; Han ve diğerleri, 2015; Lee ve diğerleri, 1999; Turenne ve diğerleri, 1989; Coronado & Sinatora, 2009; Scandian ve diğerleri, 2009; Filipovic ve diğerleri, 2013). Dökme demirlerin aşınma performansın belirlemek için laboratuvar deneylerinde normalde disk üzerinde pin ve halka üzerinde blok test donanımları kullanıldığı görülmektedir.

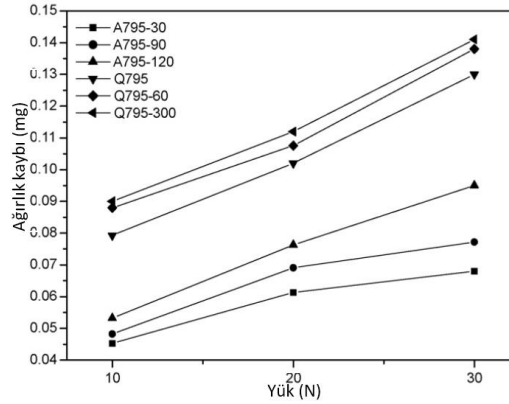
Ösferritik matrise sahip östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin (ÖKGDD) aşınma direncinin incelenmesinde araştırmacılar ÖKGDD'lerde östemperleme sıcaklığı ve bekletme süresinin aşınma direnci üzerindeki etkilerine odaklanmıştır (Sellamuthu ve diğerleri, 2018; Sahin & Durak, 2007; Batra ve diğerleri, 2013; Wang ve diğerleri, 2018; Sahin ve diğerleri, 2007; Sharma & Gupta, 2015; Sahin ve diğerleri, 2010; Kumari & Rao, 2009). Sabit sıcaklıktaki östemperleme sırasında ana östenit fazı bekletme süresine bağlı olarak farklı yapılara dönüşebilmektedir. Östemperleme işleminin erken aşamalarında karbonca yeterince zenginleşmemiş ana östenitin fazının bir kısmı sert martensitik yapıya dönüşürken diğer geriye kalan karbonca zengin östenit, ösferritik (kararlı östenit+beynitik ferrit) yapıya dönüşmektedir. Östemperleme süresi ilerlediğinde östenitin karbonca zenginleşmesi arttığı için sert martensitin yerini daha sünek ve kararlı ösferritik yapı almaktadır. Östemperleme süresinin daha da ilerlemesi kararlı östenitin beynitik ferrit ve karbüre dönüşümüyle sonuçlanmaktadır. Bu aşama da karbür oluşumu nedeniyle sertlik artmaktadır.

Sellamuthu ve diğerleri (Sellamuthu ve diğerleri, 2018), östemperleme sıcaklıklarının artırılmasının, düşük östemperleme sıcaklıklarında oluşan ösferritik yapıya göre daha kaba ve yumuşak ösferritik yapıların oluşumuna yol açtığını ve bu nedenle de ÖKGDD numunelerinde önemli ölçüde yüksek aşınma kaybıyla sonuçlanabileceğini bulmuştur. Östemperleme işleminde bekletme süresinin uzatılması ösferritik yapı hacim oranını artarak martensitik yapının yerini almış ve daha düşük aşınma direnci ile sonuçlanmıştır (Sahin & Durak, 2007; Batra ve diğerleri, 2013; Wang ve diğerleri, 2018; Sahin ve diğerleri, 2007; Sharma & Gupta, 2015; Sahin ve diğerleri, 2010; Kumari & Rao, 2009). Sharma ve diğerleri (Sharma & Gupta, 2015) yüksek östemperleme sıcaklığı veya uzun bekletme süresi altında ÖKGDD'de artan aşınma kaybını daha yumuşak ösferritik yapı hacim oranını artması ve bunun sonucu olarak sertlikteki azalma ile ilişkilendirmişlerdir.

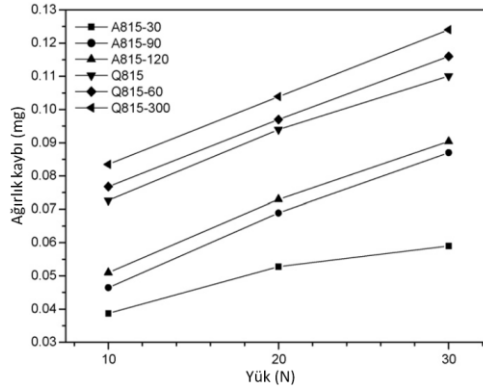
Şahin, Y ve diğerleri (Sahin ve diğerleri, 2007) yapmış oldukları çalışmada farklı hacim oranlı (çift matris- ösferritik+ferritik ve ferritik+martensitik) ve geleneksel östemperlenmiş (tamamen ösferritik matrisli), ve su verilmiş ve temperlenmiş (tamamen martensitik matrisli) KGDD'in abrasif aşınma davranışını incelemiştir. Çalışma sonuçları tamamen martensitik matrisli KGDD'lerin (Su verilmiş ve temperlenmiş - Q serisi) aşındırıcı aşınma kayıplarının tamamen ösferritik matrisli KGDD'lerden (Östemperlenmiş A serisi) az olduğunu göstermiştir (Şekil 1). Ferritik+martensitik çift matrisli yapılarda (Q serisi) martensitik yapı hacim oranı arttıkça aşındırıcı aşınma kaybı azalmıştır. Ösferritik+ferritik çift matrisli yapılarda da (A serisi) benzer bir şekilde ösferritik yapı hacim oranı arttıkça aşındırıcı aşınma kaybı azalmıştır (Şekil 2 ve 3).



Şekil 1. 900 °C'de östenitlenen numuneler için uygulanan yükün bir fonksiyonu olarak ağırlık kaybının değişimi (Sharma & Gupta, 2015).



Şekil 2. 795 °C'de östenitlenen numuneler için uygulanan yükün bir fonksiyonu olarak ağırlık kaybının değişimi (Sharma & Gupta, 2015).



Şekil 3. 815 °C'de östenitlenen numuneler için uygulanan yükün bir fonksiyonu olarak ağırlık kaybının değişimi (Sharma & Gupta, 2015).

Östempelenmiş numunelerin tümünde östempereleme süresinin artması, sert martensitin yerini daha sünek ösferritik yapının almasına neden olmuş ve bu sonuca bağlı olarak da aşındırıcı ağırlık kaybı artmıştır. Diğer bir neden ise, numune yüzeyinin test sırasında pekleşme nedeniyle sertliğin artması sonucu daha az aşınma kaybına yol açmasına dayandırılmıştır.

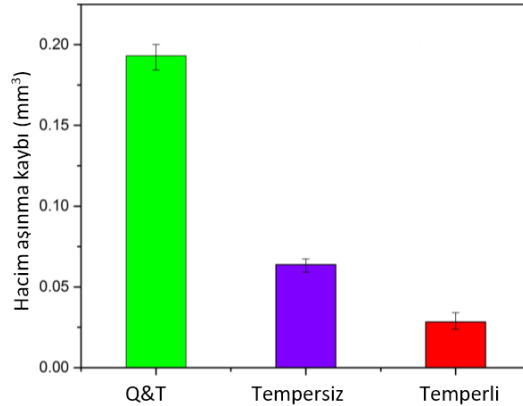
Tamamen martensitik matrisli 900°C'den su verilmiş ve temperlenmiş Q900 numuneleri için, aşındırıcıların kırılma miktarının daha sert numune ile artarak artan aşınmaya katkıda bulunmuştur. Ayrıca mikrokırıntılar, daha sünek malzemeler için mikro talaşlanma modunda baskın aşınma mekanizması olurken, daha sert malzemeler için mikro sürtünme nedenli çizilme baskın aşınma olmuştur, ancak Q numuneleri için mikro sürtünme nedenli çizilme ve yüzeye gömme kombinasyonlarının aşınması da meydana gelmiştir. Çift matrisli arakritik sıcaklık 795°C'den östempelenmiş A795 ve arakritik sıcaklık 795°C'den su verilmiş ve temperlenmiş Q795 numunelerinin yüzeylerinde daha pürüzsüz yüzey gözlenirken tamamen ösferritik matrisli A900-120 ve tamamen martensitik matrisli Q900 numunelerinde ise daha pürüzlü yüzeyler gözlenmiştir.

ÖKGDD'ler diğer bazı demir bazlı malzemelerle karşılaştırıldığında, mükemmel aşınma direnci üretebilir (Zhou ve diğerleri, 1993; Ghaderi ve diğerleri, 2003; Ahmadabadi ve diğerleri, 1991). Ghaderi ve diğerleri (Ghaderi ve diğerleri, 2003), ÖKGDD'nin, özellikle düşük kayma hızı altında, halka üzerinde blok kayma aşınma testlerinde perlitik lamel grafitli dökme demirden (PLGDD) daha yüksek aşınma direnci ürettiğini bulmuşlardır. Ayrıca, Ahmadabadi ve diğerleri (Ahmadabadi ve diğerleri, 1991), demiryolu frenleme uygulamalarında ÖKGDD'in, PLGDD için potansiyel bir ikame olacağını öne sürmüşlerdir. Ayrıca, ÖKGDD'in, ağır yük koşulları altında mangan çeliğinin olası bir ikamesi olduğu gösterilmiştir.

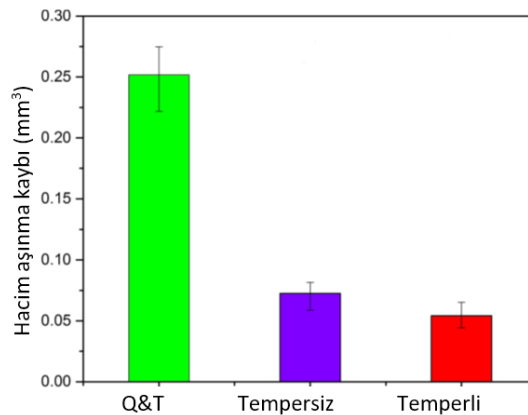
Abedi ve diğerleri (Abedi ve diğerleri, 2010) farklı küresel grafit sayısına sahip ferritik-perlitik KGDD'in kayma aşınma davranışını incelemişlerdir. Sonuçlar, Perlitik KGDD'deki kayma aşınma sürecinin, uygulanan yük ve küresel grafit sayısına bağlı olarak oksidasyon, adeziv (yapışkan) ve delaminasyon (katmanlara ayrılma) olmak üzere üç aşınma mekanizmasında yer aldığını göstermiştir. Uygulanan yük 3,5 kgf'den 5,5 kgf'ye yükseltildiğinde, aşınma mekanizmasında oksidatif aşınmadan delaminasyonla ilişkili adeziv aşınmaya doğru bir değişiklik olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, uygulanan düşük yükte, yüksek küresel grafit sayısına sahip numuneler, düşük küresel grafit sayısına sahip numunelere göre daha düşük aşınma direnci sergilerken, daha yüksek yüklerde, küresel grafit sayısının artmasıyla aşınma direnci zayıflamıştır.

ÖKGDD'nin, aşınma performansını eşdeğer sertlikteki farklı matris yapılarla karşılaştıran çalışmaları oldukça sınırlı kalmıştır (Abedi ve diğerleri, 2010; Wang ve diğerleri, 2017; Velez ve diğerleri, 2001; Haseeb ve diğerleri, 2000). Bu çalışmalardan birisini gerçekleştiren (Abedi ve diğerleri, 2010) kalıntı östenitin temperlenmiş ÖKGDD'de dönüşümünün özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçlar 177 °C'lik bir tavlama işlemi, ÖKGDD numunelerinin genel sertliğini değiştirmediklerini, kalıntı östenitin bir kısmının yeni kırılğan martensite dönüştürülmesi nedeniyle artan sertliğin matriste mevcut su verilmiş martensitten nispeten yumuşak temperli martensit oluşumuyla dengelendiğini, aynı östemperleme sıcaklığı ve tutma süresi altında, artan temperleme çevrimi sayısı ile kalıntı östenit miktarının azaldığını, aynı bekletme süresi ve tavlama döngüleri altında, matriste daha az kalıntı östenitin bulunduğunu ve daha yüksek östemperleme sıcaklığı altında kalıntı östenitin daha küçük bir dönüşüm yüzdesi meydana geldiğini göstermiştir. Bunun nedeni, ÖKGDD matrisinde daha yüksek karbon içerikli östenit ve iğne benzeri ferrit bulunmasına atfedilmiştir.

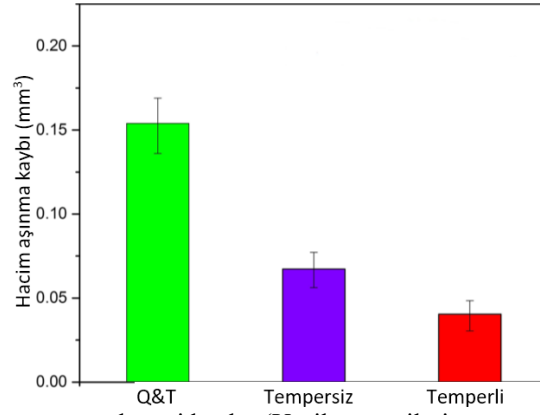
Aynı sertlik için, ÖKGDD, geleneksel su verilmiş ve tavllanmış KGDD'e kıyasla önemli ölçüde daha yüksek aşınma direncine sahip olmuştur. Temperleme işlemi, matriste kalıntı östenit miktarını azalttığı için ÖKGDD aşınma direncini iyileştirmiştir (Şekil 4-6).



Şekil 4. 40 dakikalık kayma testinden sonra aşınma hacmi kaybı. (Yeşil, su verilmiş ve temperlenmiş- Q KGDD. Mor, ÖKGDD, 276 °C, temperlemesiz 30 dk. Kırmızı, temperlenmiş ÖKGDD, 276 °C, üç temperleme çevrimli 30 dk) (Abedi ve diğerleri, 2010)



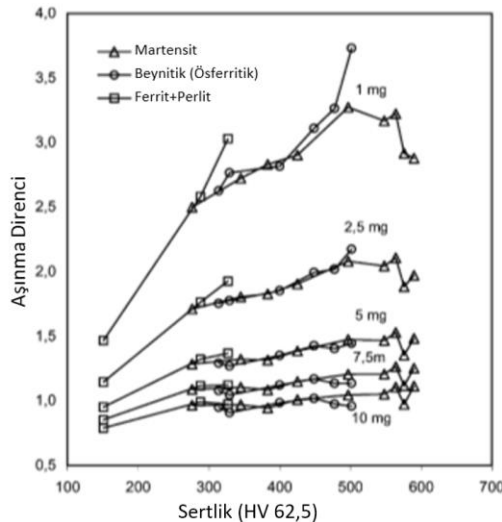
Şekil 5. 5 dakikalık kayma testinden sonra aşınma hacmi kaybı. (Yeşil, su verilmiş ve temperlenmiş – (Q&T) KGDD döküm. Mor, ÖKGDD, 321 °C, temperlemesiz 45 dk. Kırmızı, temperlenmiş ÖKGDD, 321 °C, üç temperleme çevrimli 45 dk) (Abedi ve diğerleri, 2010)



Şekil 6. 8 dakikalık kayma testinden sonra aşınma hacmi kaybı. (Yeşil, su verilmiş ve temperlenmiş KGDD. Mor, ÖKGDD, 373 °C, 30 dk, temperlemesiz. Kırmızı, temperlenmiş ÖKGDD, 373 °C, 30 dk, üç temperleme çevrimli) (Abdi ve diğerleri, 2010)

Vélez, J. M. ve diğerleri (Velez ve diğerleri, 2001) tek geçişli bir sarkaç cihazında farklı matris mikro yapılarına (ferrit, perlit, ösferritik ve martensit) sahip KGDD'in aşındırma aşınmasını incelemişlerdir. Yine bu çalışmada da ÖKGDD'nin, aşınma performansı eşdeğer sertlikteki diğerleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçları şu şekilde sıralanabilir (Şekil 7).

- Sertliği 280 ile 330HV arasında değişen ince perlit numuneleri, aynı sertliğe sahip östemperlenmiş veya su verilmiş ve temperlenmiş numunelere göre daha yüksek aşınma direnci göstermiştir.
- Alt beyrit ÖKGDD (östemperleme sıcaklıkları 260–300°C aralığında ve sertlik 450 ila 500 HV arasında), 30 µm derinliğinde çizikler yapıldığında, aynı sertlikteki su verilmiş ve temperlenmiş KGDD'e (400 ila 450°C arasında temperleme sıcaklığı) göre, daha yüksek aşınma direnci göstermiştir. 100 µm'den daha derin çizikler için su verilmiş ve temperlenmiş dökme demirler daha iyi performans göstermiştir.
- Sertliği 300HV düzeyinde olan KGDD'lerde ve 60 µm derinliğe kadar olan çiziklerde en iyi performans perlitik matrisli KGDD'e elde edilmiştir.
- 450HV düzeyinde sertlikteki KGDD'ler için, aşındırıcı aşınmaya karşı en iyi direnç, ösferritik matrisli malzemede bulunmuştur.
- Sertliği >500HV olan ve tavlanmış martensitik matrisli KGDD, iyi bir aşınma direnci göstermemiştir.
- Ferritik-perlitik KGDD demirlerin aşınma direnci, perlit hacim oranı arttıkça ve perlit lameller arası aralık azaldıkça sertlikle birlikte doğrusal olarak artış göstermiştir.
- ÖKGDD'in aşınma direnci, yapıda kalıntı östenit miktarının artmasıyla azalmıştır.



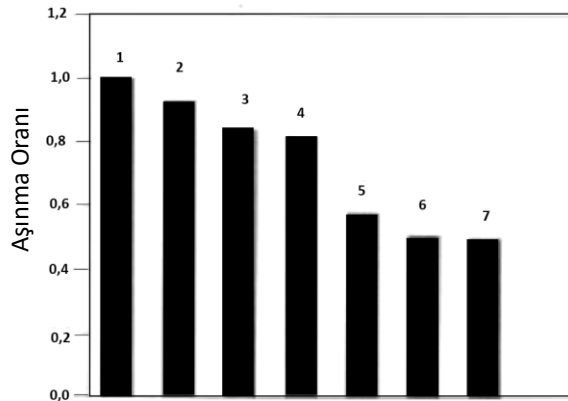
Şekil 7. KGDD'in farklı mikro yapıları için özgül enerjinin sertlikle değişimi (Velez ve diğerleri, 2001)

- Aşınma testleri sırasında gerilim kaynaklı östenitten martensite dönüşüm (Transformation induced plasticity-TRIP) reaksiyonu ÖKGDD'in mükemmel aşınma dirençlerinin, yüksek bölgesel gerilme veya plastik deformasyon nedeniyle kalıntı östenitin martensite dönüşmesiyle gerilim kaynaklı östenitten martensite dönüşüm ile ilişkili olduğunu bildirilmiştir (Batra ve diğerleri, 2013; Haseeb ve diğerleri, 2000; Lerner & Kingsbury, 1997; Keough & Hayrynen, 2005; Laird ve diğerleri, 2000; Vadiraj ve diğerleri, 2010; Balachandran ve diğerleri, 2011; Woodward ve diğerleri, 2022; Cardoso ve diğerleri, 2014).

Batra ve diğerleri (Batra ve diğerleri, 2013), disk üzerinde pinli döner test düzeneği kullanarak ÖKGDD'in aşınma davranışını incelemiştir. Östemperleme sıcaklığının artırılmasıyla aşınma direncinin iyileştirilebileceği bulmuşlardır. ÖKGDD'in aşınma kaybı, ısıtılmış dökülmüş koşullardaki orijinal KGDD döküme göre %38 kadar daha az gerçekleşmiştir. Pin ve disk arasındaki arayüze uygulanan dış kuvvet, kalıntı östenitin martensite dönüşümü için yeterli gerilim üretmiştir. Ayrıca, temas yüzeyi çevresinde önemli bir sıcaklık sıçramasının gözlenmemesi, dönüşüm reaksiyonunun sıcaklık tarafından üretilme ihtimalini ortadan kaldırmıştır. Kalıntı östenit, martensit plakalarının yakınında blokları olarak tanımlanmıştır.

Haseeb ve diğerleri (Haseeb ve diğerleri, 2000) aynı sertlik seviyesinde su verilmiş ve temperlenmiş ve östemperlenmiş ÖKGDD'in tribolojik davranışını incelemiştir. Bu çalışma sonuçları östemperlenmiş ÖKGDD'lerde oksidasyon aşınmasının ana mekanizma olduğunu göstermiştir. Aynı kimyasal bileşime ve aynı sertliğe rağmen, tüm test koşulları altında ÖKGDD'in, su verilmiş ve tavlama yapılmış KGDD'den daha fazla aşınmaya dirençli olduğu gözlemlenmiştir. Daha yüksek uygulanan yük ve daha uzun kayma mesafesi altında aşınma direnci daha da iyileşmiştir. Bu çalışmalarda, ÖKGDD'in olağanüstü aşınma direnci çoğunlukla, düşük karbonlu kalıntı östenitten martensite gerilim kaynaklı dönüşümüne dayandırılmıştır. Martensit oluşumundan sonra temas yüzeyi veya alt yüzey sertleştiği için aşınma direnci artmıştır. Ayrıca yüksek aşınma direncine ösferritik yapının pekleşmesinde katkıda bulunduğu ileri sürülmüştür.

Lerner, Y. S ve G. R. Kingsbury'nin (Lerner & Kingsbury, 1997) ÖKGDD aşınma direnci üzerine yapmış oldukları çalışma sonuçları ÖKGDD'nin aşınma direncinin AISI 4340 çeliğine eşdeğer, sertleştirilmiş ve temperlenmiş AISI 1050 karbon çeliğinden neredeyse iki kat daha az ve beyaz ve alaşımlı dökme demirlerden önemli ölçüde daha yüksek aşınma direnci sergilediğini göstermiştir (Şekil 8). ÖKGDD'nin üstün aşınma direnci, aşınma testleri sırasında yüzey tabakasında meydana gelen yüksek karbonlu östenitin martensite dönüşmesine atfedilmiştir.

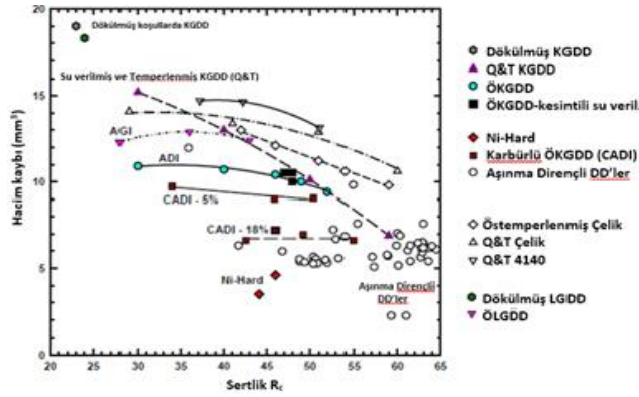


Şekil 8. Aşındırma testinde malzemelerin aşınma direnci. 1, su verilmiş ve temperlenmiş orta karbonlu 1050 çelik; 2, alaşımsız beyaz dökme demir; 3, LGDD (%0,8 Cr, %3 Ni); 4, BDD (%12 Cr); 5, su verilmiş ve temperlenmiş KGDD; 6, ÖKGDD, sınıf 200/155/1; 7, alaşımlı çelik 4340 (Lerner & Kingsbury, 1997)

Keough, J ve Hayrynen, K. (Keough & Hayrynen, 2005) ösferritik matrisli ÖKGDD'lerde pin aşınma testi (yüksek stres ortamı) gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma sonuçları ÖKGDD'lerin aşınma direncinin dökülmüş koşullardaki KGDD'lerden daha iyi olduğunu göstermiştir. Bu sonuç gerilim kaynaklı östenitten martensite dönüşüm (TRIP) etkisine atfedilmiştir. Bu çalışma ve diğer çeşitli dökme demirler, çelik ve aşınmaya dayanıklı dökme demirler için pin aşınma testi sonuçlarının karşılaştırmalarını grafik olarak sunmuşlardır (Şekil 9). Bu verilere dayalı yapılan gözlemler şu şekilde sıralanmıştır:

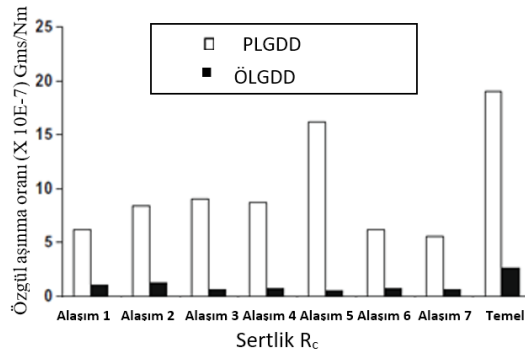
- ÖKGDD'lerin eğrileri nispeten düzdür, bu da malzeme kaybının sertliğe karşı duyarsız olduğunu gösterir. Bu sonuç, test parçasının yüzeyindeki östenitten martensite dönüşümünün bir sonucudur.
- Yüksek gerilimli aşınma ortamında, ÖKGDD, Karburlü ÖKGDD (CADI), Ni-Hard Sınıf 2 ve aşınmaya dayanıklı (AR) dökme demirler, ÖKGDD ve Su verilmiş ve Temperlenmiş (Q&T) çelikten daha iyi aşınma direncine sahiptir.

- ÖKGDD'nin aşınma direnci, karbürlerin eklenmesiyle veya Karbürü ÖKGDD (CADI) kullanılarak daha da geliştirilebilir. Kaybedilen malzemenin hacmi, mevcut karbürün hacim oranına bağlıdır ve daha yüksek karbür hacimleri daha iyi aşınma direnci ile sonuçlanır.
- En iyi aşınma direnci aşınma dirençli (AR) dökme demirler tarafından sergilenmektedir. Ancak CADI ve Q&T KGDD, bu dökme demirlerin bazılarının performansına rakip olabilir.



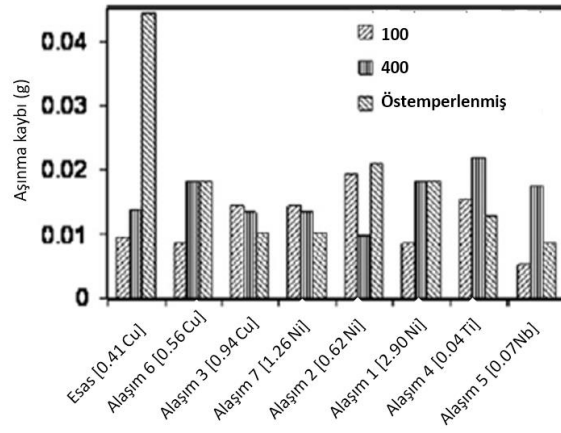
Şekil 9. Çeşitli dökme demirler, ÖKGDD'ler, çelik ve aşınmaya dayanıklı dökme demirler için Pin-on Aşınma (Verileri Laird ve diğerleri, 2000).

Vadiraj ve diğerleri (Vadiraj ve diğerleri, 2010) temel bileşenler dışında değişen Cr, Mo, Ni, Ti vb. içeriklere sahip alaşımlı ötektiküstü LGDD'lerin perlitik ve östemperlenmiş koşullardaki mekanik ve aşınma özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada ÖLGDD alaşımlar, PLGDD'e kıyasla son derece yüksek aşınma direnci (7-15 kat) sergilemiştir (Şekil 10). PLGDD'in aşınma direncindeki artışın, perlit ve karbürlerin hacim oranına ve inceliğine, ancak ÖLGDD'e ise aşınma direncindeki artışın aşınma testleri sırasında gerilim kaynaklı östenitten martensite dönüşümüne bağlı olduğunu ve gerilim arttıkça martensit hacim oranının arttığını bildirmiştir.



Şekil 10. ÖLGDD alaşımlarının PLGDD alaşımları ile aşınma oranlarının karşılaştırılması (Vadiraj ve diğerleri, 2010)

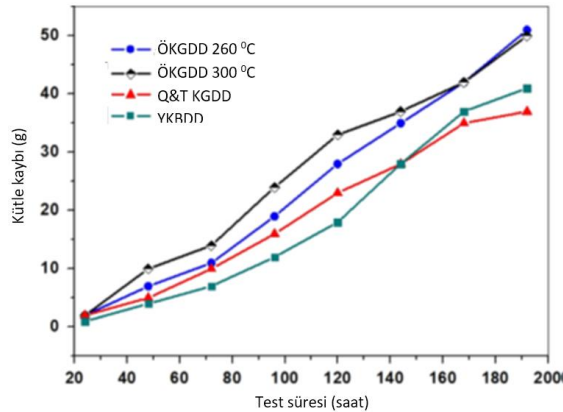
Balachandran, G ve diğerleri (Balachandran ve diğerleri, 2011) alaşımlı LGDD'in su verilmiş, temperlenmiş ve östemperlenmiş koşullarda mekanik ve aşınma davranışı incelemiştir. Bu çalışma sonuçları genel olarak östemperlenmiş durumdaki dökme demirleri en yüksek aşınma direncine sahip olduğunu bu sunucun TRIP etkisinden kaynaklandığını göstermiştir. Su verilmiş ve 100 ve 400 °C 'de temperlenmiş dökme demirler östemperlenmiş alaşımlara karşılaştırılabilir düzeyde aşınma direnci sergilemiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Su verme tavllanmış (100 ve 400 °C tavlama sıcaklığı) ve östemperlenmiş durumda en düşük aşınma oranına sahip alaşımların nispi değerleri (Woodward ve diğerleri, 2022)

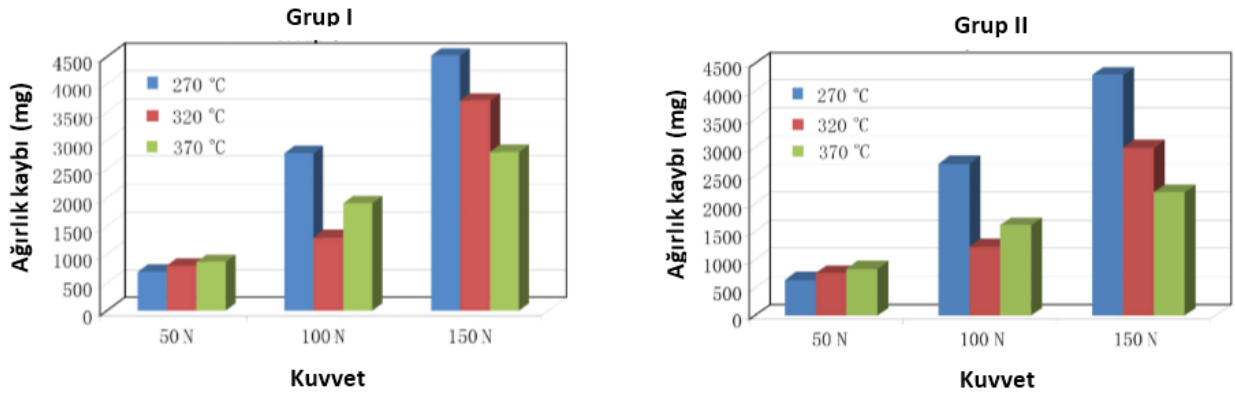
Woodward, ve diğerleri (Woodward ve diğerleri, 2022), LGDD'in AISI 4330'a karşı mikroyapısı ve kayma aşınma tepkisi üzerine sementit küreselleşme süresinin etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, aşırı küreselleştirilmiş ve ferritleştirilmiş dökme demir matrisin önemli ölçüde deforme olduğu, faydalı oksidatif aşınmanın oluşmasını engellediği ve dolayısıyla disk karşılığına zarar verdiği en yüksek yük ve en uzun tavlama süreleri için şiddetli aşınmaya geçiş göstermiştir. Yüzey altı deformasyonunun derinliği tavlama süresi ile artmış, ancak yük ile artmamıştır.

Cardoso, P. H. S ve diğerleri (Cardoso ve diğerleri, 2014) ÖKGDD ve yüksek kromlu beyaz dökme demirin (YKBDD) aşınma özelliklerini çalışmışlardır. Bu çalışma sonucu YKBDD'ler yüksek sertlikleri nedeniyle ÖKGDD'lerden daha iyi aşınma direnci performansı sergilemişlerdir (Şekil 12). Aşındırıcı malzemeye uzun süre maruz bırakılan ÖKGDD'ler sürekli TRIP etkisi nedeniyle daha düşük kütle kaybı göstermişlerdir.



Şekil 12. Numunelerin karşılaştırmalı aşınma direnci (Cardoso ve diğerleri, 2014)

Chiniforush, E.A ve diğerleri (Chiniforush ve diğerleri, 2016) Nikel içerikleri farklı iki grup Ni alaşımlı ÖKGDD'lerin kuru kayma aşınması incelemişlerdir. Sonuçlar kuru kayma aşınma direncinin düşük uygulanan yükler için östemperleme sıcaklığından bağımsız olduğunu ancak uygulanan yüksek yükler için östemperleme sıcaklığına güçlü bir bağımlılığın olduğunu artan Ni içeriği ile yüksek östemperleme sıcaklıklarında ve yüksek uygulanan yüklerde aşınma direncinin arttığını göstermiştir (Şekil 13). Aşınma direncindeki artış TRIP ve östenitin pekleşme etkilerine atfedilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, ÖKGDD'in kuru kayma aşınması sırasında yüzey altı yorulmasının meydana geldiğini ve yüzeye yakın duran grafit kürelerinin aşınmanın erken aşamalarından itibaren plastik olarak deforme olduğunu ve çatlak çekirdeklenme bölgeleri olarak hareket ettiğini göstermiştir.



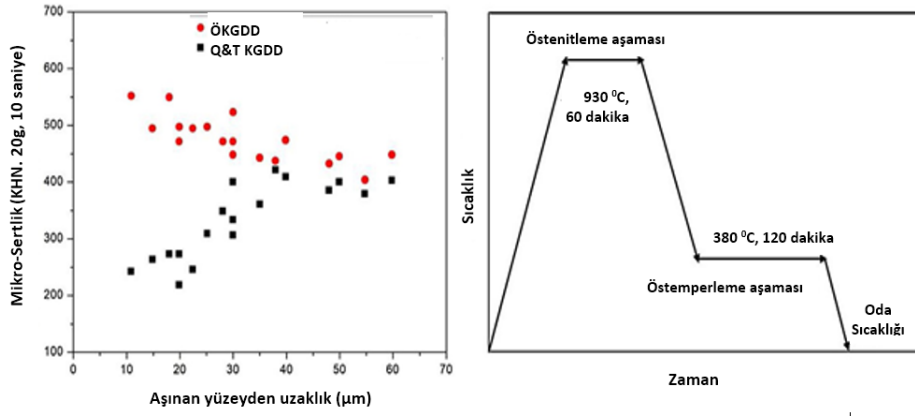
Şekil 13. İki numune grubu için 40 dakikalık aşınma testinden sonra uygulanan yük ile ağırlık kaybının değişimi; östemperleme süresi: 120 dakika (Chiniforush ve diğerleri, 2016).

Kumari ve diğerleri (Kumari & Rao, 2009) ÖKGDD'lerde östenitleme sıcaklığının gerilim kaynaklı dönüşüm üzerine etkisini çalışmışlardır. Bu çalışma sonuçları, gerilim kaynaklı dönüşüm eğiliminin büyük ölçüde östenitleme sıcaklığına bağlı olduğunu, östenitleme sıcaklığı arttıkça, tüm östemperleme sıcaklıklarında martensite dönüşme eğilimini arttığını yüksek östenitleme ve östemperleme sıcaklıklarının, östeniti düşük kararlılık ile tuttuğunu ve bu nedenle gerilim altında martensit oluşturmaya eğilimin daha fazla arttığını göstermiştir.

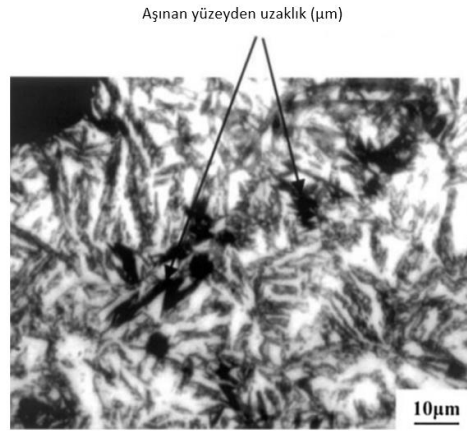
Daber ve diğerleri (Daber ve diğerleri, 2008) ÖKGDD'de gerilim kaynaklı dönüşümü çalışmışlardır. Çalışma sonuçları daha yüksek sıcaklıklarda östemperlemeye tabi tutulan numunelerin, gerilim kaynaklı martensit üretme eğilimine sahip olduğunu bu numunelerde kalıntı östenitin boyutunun daha büyük olduğunu, daha düşük östemperleme sıcaklıklarında ise östenitin ince boyutunun yanı sıra östenitin yakınında büyük miktarda ferrit bulunmasının da gerilim kaynaklı martensit oluşumunu engellediğini göstermiştir.

Wen ve diğerleri (Wen ve diğerleri, 2019), 25 N ve 100 N'lik iki farklı normal yük ile ÖKGDD üzerinde blok üzerinde bilye ile geri kaymalı aşınma testleri uygulamıştır. 100 N altında mikro sertlikteki artış dikkat çekici hale gelmiştir (Şekil 14). Dönüşüm reaksiyonundaki kalıntı östenit bu çalışmada açıkça doğrulanmamıştır. Balos ve diğerleri (Balos ve diğerleri, 2016), ÖKGDD'in iyi aşınma direncinin, yüksek bölgesel gerilim nedeniyle kalıntı östenitin martensite dönüşmesine bağlı olduğunu açıkça belirtmişlerdir. Dönüşüm reaksiyonu, ancak gerekli miktarda düşük karbonlu östenit ve yerel basınç yerine getirildiğinde meydana gelebileceğini bildirmişlerdir. Zhang ve diğerleri (Zhang ve diğerleri, 2014), yüzey sertleştirme tabakasının, yüksek karbon yüzdeli östenitin martensite faz dönüşümü olarak açıklanabileceğini düşünmüşlerdir. Kumari ve diğerleri (Kumari & Rao, 2009), ÖKGDD numunelerinin aşınmış yüzeyinin altında koyu dağlama merceksi martensitik fazı gözlemişlerdir (Şekil 15). Ancak, bu mukavemetlenme mekanizmasında yer alan kalıntı östenit tanımı yapılmamıştır. Bu nedenle dönüşüm yer alan kalıntı östenitin, östemperleme işleminde ilk aşamanın %100 tamamlanması halinde karbonca doymuş östenit içerdiğine ve son matriste bir miktar martensit oluşmuşsa hem karbonla doymuş östenit hem de düşük karbon içerikli östenit içerdiği değerlendirilmiştir. Yüksek bölgesel gerilim veya plastik deformasyon altında, düşük karbon içerikli kalıntı östenit, yarı kararlı olduğu için önce martensite, ardından yüksek karbon içerikli östenite dönüşmüştür. Yüzey sertliği artışı sayesinde aşınma direnci iyileştirilmiştir (Wen ve diğerleri, 2019; Zimba ve diğerleri, 2004; Wang ve diğerleri, 2020).

Östemperleme parametrelerine ek olarak, alaşım elementlerinin eklenmesi de ÖKGDD'in aşınma direncinde önemli bir rol oynamaktadır (Ahmadabadi ve diğerleri, 1991). Daha fazla ösferrit oluşumu daha yumuşak bir yüzey ile sonuçlanacağından, bor ilavesinin tek aşamalı ÖKGDD'in aşınma oranını artıracığı bulunmuştur (Ahmadabadi ve diğerleri, 1991). Han ve diğerleri (Han ve diğerleri, 2015), molibden içeriğinin artmasından sonra iğnemi ferrit daha ince hale geldiğinden ve karbonca doymuş östenit yüzdesi yükseldiğinden molibdenin aşınma direnci üzerinde faydalar sağlayabileceğini göstermiştir. Lee ve diğerleri (Lee ve diğerleri, 1999) tarafından kuru yuvarlanma aşınma testlerinde benzer sonuçlar rapor edilmiştir.

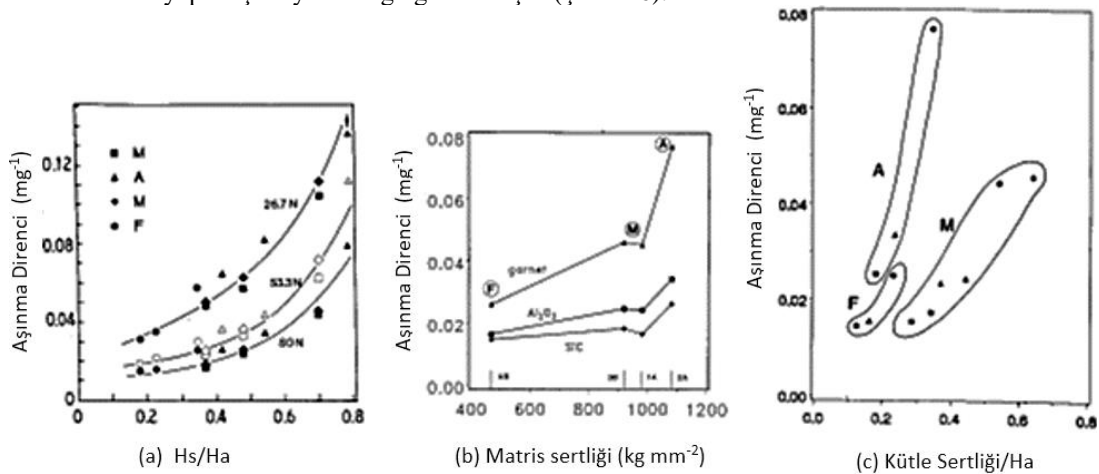


Şekil 14. (a) 25 N ve 100 N normal yükler altında tek kademeli ADI'nin aşınmış yüzeyinden derinlik boyunca mikrosertlik ölçümü ve (b) karşılık gelen ısı işleme tasarımı (Wang ve diğerleri, 2020).



Şekil 15. ADI numunesinin aşınmış yüzeyinin altında stres kaynaklı martensit (Kumari & Rao, 2009).

Turenne, S ve diğerleri (Turenne ve diğerleri, 1989) yüksek kromlu BDD'in aşındırıcı aşınma direncine matris mikroyapı etkisini çalışmışlardır. Bu çalışmada krom ve karbon içeriği, aynı miktarda ötektik karbür (M_7C_3) ile farklı matris mikro yapılarına (östenitik veya martensitik ve ferritik) sahip olacak şekilde seçilmiştir. Sonuçlar tüm dökme demirler için geçerli olan aşınma mekanizmalarının mikro talaşlanma ve sürtünme nedeni çizilme olduğunu, çizilme oranı, matrisin sünekliliği ile arttığını, ferritik matris için, oluklarda yırtılma, belirli bir deneysel koşul için kütle kaybını artıran yüzey bozulmasına neden olduğunu göstermiştir. Oluk derinliğinin, aşındırma aşınmasından kaynaklanan kütle kayıpları ile iyi bir şekilde ilişkili olduğu, test sırasında pekleşme sertleşmesi nedeniyle östenitik matrisin başlangıç sertliği martensitik matrisin sertliğinden daha düşük olmasına rağmen östenitik matris martensitik matristen daha iyi aşınma direnci sahip olduğunu göstermiştir. Bu sonucun nedeni diğer yapılarınkini aşan bir sertlikle sonuçlanan östenitik matrisin güçlü pekleşme sertleşmesine dayandırılmıştır. Ötektik karbürlerin ve matrisin aşınma oranı, belirli bir dökme demir mikro yapısı için aynı olduğu gözlenmiştir (Şekil 16).



Şekil 16. (a) Matris sertliğinin aşındırıcı sertliğe oranına göre çizilen aşınma direnci, (b) testten sonra ölçülen matris sertliğine karşı çizilen aşınma direnci. A: östenitik, M: martensitik, F: ferritik, (yük 80N, aşınma mesafesi 6m), (c) Kütle sertliğinin aşındırıcı sertliğe

(yük 80N) oranına göre çizilen aşınma direnci. SiC, Al₂O₃, garnet (lal taşı). Aşındırıcı sertlik (Ha), Ölçülen Vickers sertlik (Hs - 50 gf) (Turenne ve diğerleri, 1989).

Coronado, J ve Sinatora, A. (Coronado & Sinatora, 2009) farklı katılma hızlarına sahip BDD'in aşındırıcı aşınmasını çalışmışlardır. Biri ağırlıklı olarak östenitik ve diğeri ise ağırlıklı olarak M₃C karbürleri içeren martensitik olmak üzere iki matris test edilmiştir. Kütle kaybı, farklı boyutlarda alümina kullanılarak aşındırıcı disk üzerindeki pin tipi testleriyle değerlendirilmiştir (Tablo 1). Aşındırıcı aşınma mekanizmaları olarak mikro talaşlanma, mikro yorulma ve mikro sürtünme nedenli çizilme olarak gözlenmiştir.

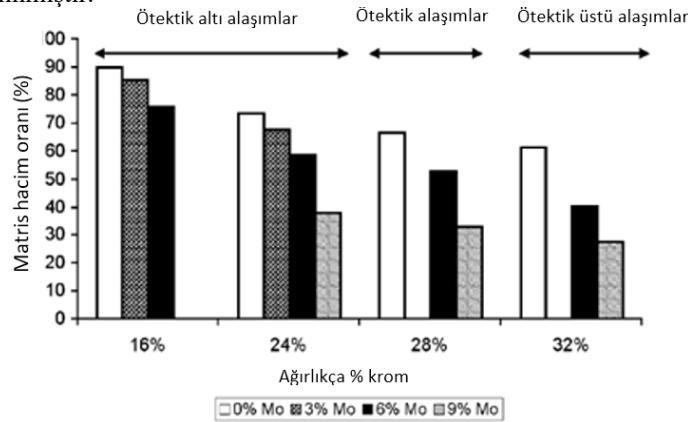
Tablo 1. Alümina ve 4,6 N yük kullanılarak kütle kaybının karşılaştırılması (Coronado & Sinatora, 2009).

Malzeme	Katılma hızı (°C/s)	Aşındırıcı boyutu (µm)	Kütle kaybı (mg)
Östenitik matris	1,5	23,6	2,9 ± 0,1
	15	23,6	2,9 ± 0,1
Martensitik matris	1,5	23,6	2,8 ± 0,1
	15	23,6	2,8 ± 0,3
Östenitik matris	1,5	36,0	3,7 ± 0,1
	15	36,0	3,7 ± 0,3
Martensitik matris	1,5	36,0	3,8 ± 0,1
	15	36,0	3,7 ± 0,2
Östenitik matris	1,5	66,0	4,1 ± 0,2
	15	66,0	4,1 ± 0,1
Martensitik matris	1,5	66,0	4,8 ± 0,2
	15	66,0	4,4 ± 0,1
Östenitik matris	1,5	93,0	4,5 ± 0,2
	15	93,0	4,5 ± 0,1
Martensitik matris	1,5	93,0	5,3 ± 0,2
	15	93,0	4,9 ± 0,1

Östenitik matrisli dökme demir, 66 ve 93µm aşındırıcılar için martensitik matrisli dökme demirden daha yüksek aşınma direnci göstermiştir. Ancak, daha küçük aşındırıcılar (23,6 ve 36µm) için aşınma oranının benzer olduğu rapor edilmiştir. Daha büyük aşındırıcılar, östenitik matrislerde daha fazla penetrasyon ve plastik deformasyon, martensitik matrisde ise, aşınma oranını artırarak daha fazla mikro talaşlanma oluşumu üretmiştir. Östenitik matrisin daha düşük sertliği ve daha yüksek derecede plastik deformasyonu nedeniyle mikro çatlama ve karbür ayrılması göstermiştir.

Literatürde hali hazırda ösferritik matrisli BDD'lerin aşınma direnci ile ilgili çalışma henüz bulunmamaktadır.

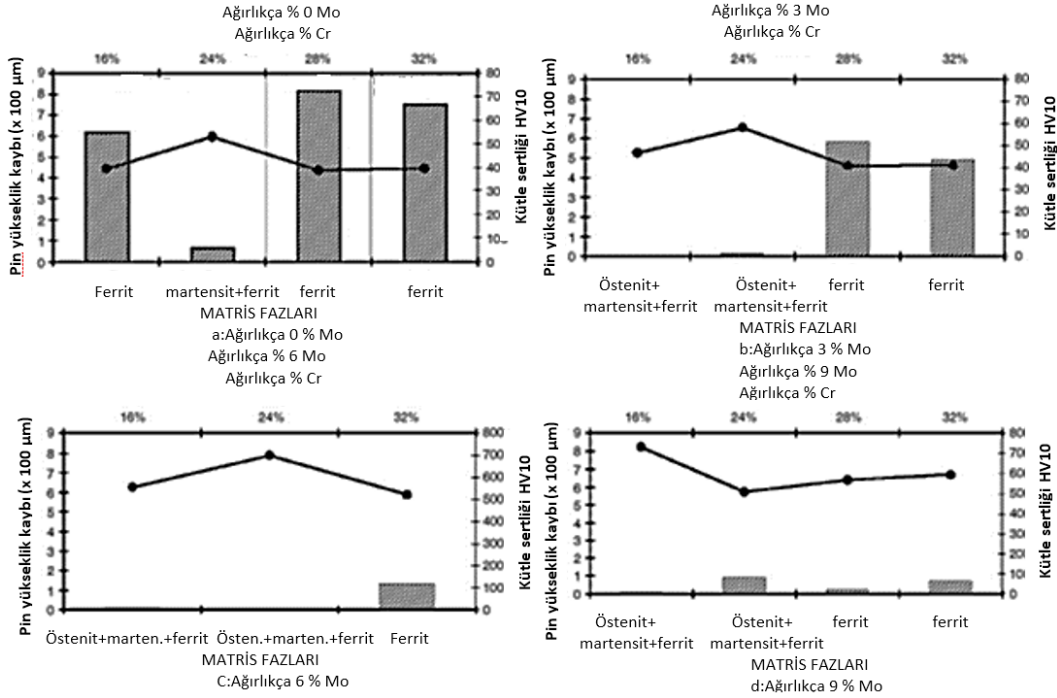
Scandian, C ve diğerleri (Scandian ve diğerleri, 2009) yüksek kromlu BDD'in kayma aşınmasında molibden ve krom içeriğinin etkisini çalışmışlardır. Matris mikro yapısı ve karbürlerin türü, molibden ve kromun nispi içeriklerine bağlı olmuştur (Şekil 17). Aşınma deneyleri, oda sıcaklığında bir pin-on-disk tribometre üzerinde gerçekleştirilmiştir. Pin dökme demirden yapılmış ve aşınma kaybı olarak pin yüksekliği esas alınmıştır.



Şekil 17. Krom ve molibden içeriklerinin (% ağırlık) bir fonksiyonu olarak farklı alaşımlarda matrisin (%) hacim oranları (Scandian ve diğerleri, 2009).

Aşınma test sonuçları, matrisin mikro yapısının kayma aşınma direnci üzerinde güçlü bir etki gösterdiğini vurgulamıştır. Matris, Mo içeriğinden bağımsız olarak ferritik tek fazlı olduğunda pin aşınma kaybı oldukça fazla olmuştur. Matris çok fazlı olduğunda ($\alpha/\alpha_2/\gamma$), aşınma kaybı sıfıra doğru eğilim göstermiştir (Şekil 18). Aşınma kaybını belirlemede matris mikro yapısının kütle sertliğinden

daha önemli olduğu görülmüştür. Aynı Cr içeriği ve tek fazlı bir matris için, Mo içeriği ile sertlik artmış ve aşınma kaybı azalmıştır. Ancak eşdeğer bir sertlik seviyesi için, matris ferritik olduğunda aşınma kaybı her zaman daha yüksek olmuştur. Ferritik matris sürtünmeli teğetsel kuvvetler altında plastik olarak daha kolay deforme olmuş ve matrisin plastik deformasyonu, karbür mikro çatlaklarına ve kırıntı (döküntü) oluşumuna katkıda bulunmuştur. Ötektik veya birincil M_7C_3 karbürlerde mikro çatlaklar her zaman açıkça gözlemlenmiş, ancak M_6C karbürlerde kullanılan ölçüm çözünürlükleri seviyesinde gözlenmemiştir. M_6C karbürlerin, alaşımın aşınma direncini artırmaya çok daha iyi katkıda bulunduğu ileri sürülmüştür.



Şekil 18. Nispi matris mikro yapılarında (a: 0 wt.%Mo; b) Cr ve Mo'nun (% wt.) bir fonksiyonu olarak pin yükseklik kaybı "h" (kesikli dikdörtgenler) ve alaşımların kütle sertliği (tam çizgiler) : a) ağırlıkça %3 Mo; c) ağırlıkça % 6 Mo; d) ağırlıkça %9 Mo (Scandian ve diğerleri, 2009).

Filipovic, M ve diğerleri (Filipovic ve diğerleri, 2013) beyaz dökme demir alaşımlarının aşınma direnci ve kırılma tokluğu ile mikroyapı korelasyonu incelemiştir. Deneysel sonuçlar, ötektik karbür fazının (M_3C veya M_7C_3) hacim oranı, karbür boyutu ve dağılımının düşük gerilimli aşınma koşulları altında BDD alaşımlarının aşınma direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Martensitik veya martensit-östenitik matris mikro yapısı östenitik matrise göre ötektik karbürleri yeterince güçlendirerek aşınma sırasında çatlamayı ve ayrılmayı en aza indirmiştir. Yüksek kromlu BDD'in matris bölgelerinde çökelen ikincil karbürler de aşınma davranışını etkilemiştir.

3. Sonuçlar

1- Ferritik matrisler (FM)

Dökme demirlerde matris ferritik olduğunda aşınma kaybı her zaman daha yüksek olmaktadır. Aşınma mekanizması mikro talaşlanma ve sürtünme nedenli çizilme olmakla beraber, çizilme oranı, sünek ferritik matrisde, oluklardaki yırtılma, belirli bir deneysel koşul için kütle kaybını artıran yüzey bozulmasına neden olmaktadır.

2- Perlitik matrisler (PM)

Perlitik matrisli dökme demirlerde aşınma direnci perlit lamellar arası mesafe ile değişkenlik göstermektedir. Lamellar arası mesafe azaldıkça aşınma direnci doğrusal olarak artmaktadır. Aşınma testi sırasında uygulanan yük arttıkça, aşınma mekanizmasında oksidatif aşınmadan delaminasyonla ilişkili adeziv aşınmaya doğru bir değişiklik gerçekleşmektedir.

3- Ferritik+Perlitik matrisler (FPM)

Ferritik-perlitik dökme demirlerin aşınma direnci, perlit hacim oranı arttıkça ve perlit lameller arası aralık azaldıkça sertlikle birlikte doğrusal olarak artış göstermiştir.

4- Martensitik matrisler (MM)

Martensitik matrisli dökme demirlerde, aşındırıcıların kırılma miktarının artarak artan aşınmaya katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle daha pürüzlü yüzeyler gözlenmektedir. Bu malzemeler için mikro talaşlanma ve sürtünme nedenli çizilme baskın aşınma mekanizmasıdır.

5- Ferritik+Martensitik matrisler (FMM)

Ferritik+martensitik çift matrisli yapılarda martensitik yapı hacim oranı arttıkça aşındırıcı aşınma kaybı azalmıştır.

6- Östenitik matrisler (ÖM)

Östenitik matrisin daha düşük sertliği ve daha yüksek derecede plastik deformasyonu nedeniyle matrisin güçlü pekleşme sertleşmesi diğer yapılarınınkini aşan bir sertlikle sonuçlanarak diğer matrislerden daha iyi aşınma direnci sahip olduğunu gösterilmiştir. Östenitik matrisin başlangıç sertliği martensitik matrisin sertliğinden daha düşük olmasına rağmen östenitik matris martensitik matristen daha iyi aşınma direnci sahip olduğunu gösterilmiştir. Bu sonucun nedeni diğer yapılarınınkini aşan bir sertlikle sonuçlanan östenitik matrisin güçlü pekleşme sertleşmesine dayandırılmıştır.

7- Ösferritik matrisler (ÖsM)

Östemperleme sıcaklıklarındaki değişim ösferritik mikroyapı oluşumunu ve dolayısı ile aşınma davranışının etkilemektedir. Yüksek östemperleme sıcaklıklarından düşük östemperleme sıcaklıklarına inildikçe kaba ösferritik yapıdan ince ösferritik yapıya geçilmekte ve bu değişime paralel olarak sertlik ve aşınma direnci artmaktadır.

Sabit sıcaklıktaki östemperleme sırasında ana östenit fazı bekletme süresine bağlı olarak önce sert martensitik yapıdan yumuşak ösferritik yapıya daha sonra kararlı östenitin beyritik ferrit+karbürü dönüşümüyle sonuçlanmaktadır. Mikroyapıdaki bu değişime göre izotermal bekletme süresinin uzatılması ile ösferritik yapı hacim oranının artması, düşük aşınma direnci ile sonuçlanmaktadır.

ÖKGDD'in mükemmel aşınma dirençlerinin, yüksek bölgesel gerilme veya plastik deformasyon nedeniyle artık östenitin martensite dönüşmesiyle gerilim kaynaklı östenitten martensite dönüşüm (Transformation induced plasticity-TRIP) reaksiyonu ile ilişkilendirilmiştir. Aşınma testi sırasında uygulanan gerilim arttıkça martensit hacim oranı artmaktadır. Ayrıca yüksek aşınma direncine ösferritik yapının pekleşmesinde katkıda bulunduğu ileri sürülmektedir.

ÖKGDD'lerde baskın aşınma mekanizmasının mikro yorulma, mikro talaşlanma ve sürtünme nedenli çizilme olduğu uygulanan yük artığında, aşınma mekanizmasında oksidatif aşınmadan delaminasyonla ilişkili adeziv (yapışkan) aşınmaya doğru bir değişiklik olduğu gösterilmiştir.

8- Ferritik+Ösferritik matrisler (FÖM)

Ösferritik+ferritik çift matrisli yapılarda da ösferritik yapı hacim oranı arttıkça aşındırıcı aşınma kaybı azalmaktadır.

9- Aşınma direnci açısından matris türleri birbirleri ile karşılaştırıldığında genel olarak ÖM>ÖsM>MM>PM>FM sonucuna varılabilir.

10- Aşınma direnci açısından çift matris türleri birbirleri ile karşılaştırıldığında genel olarak FÖM> >FMM> FPM sonucuna varılabilir.

Teşekkür

Çalışmamızı destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine (GÜBAP 07/2019-20) teşekkür ederiz.

REFERANSLAR

Abedi, H. R., Fareghi, A., Saghafian, H., Kheirandish, S. H. (2010). Sliding wear behavior of a ferritic–pearlitic ductile cast iron with different nodule count. *Wear*, 268(3), 622–628, 10.1016/j.wear.2009.10.010.

Ahmadabadi M, Nategh S, Davami P. (1991). Wear behavior of austempered ductile iron. *Cast Metals*, 4(4), 188–194. 10.1080/09534962.1991.11819079

Balachandran, G., Vadiraj, A., Kamaraj, M., Kazuya, E. (2011). Mechanical and wear behavior of alloyed gray cast iron in the quenched and tempered and austempered conditions. *Materials & Design*, 32(7), 4042–4049, 10.1016/j.matdes.2011.03.054.

- Balos, S., Rajnovic, D., Dramicanin, M., Labus, D., Eric-Cekic, O., Grbovic-Novakovic, J., Sidjanin, L. (2016). Abrasive wear behaviour of ADI material with various retained austenite content. *International Journal of Cast Metals Research*, 29(4), 187-193, 10.1080/13640461.2015.1125982.
- Batra U, Batra N, Sharma J. (2013). Wear performance of Cu-alloyed austempered ductile iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(4), 1136-1142, 10.1007/s11665-012-0380-3.
- Cardoso, P. H. S., Israel, C. L., Strohaecker, T. R. (2014). Abrasive wear in Austempered Ductile Irons: A comparison with white cast irons. *Wear*, 313(1-2), 29- 33, 10.1016/j.wear.2014.02.009.
- Chiniforush, E. A., Rahimi, M. A., Yazdani, S. (2016). Dry sliding wear of Ni alloyed austempered ductile iron. *China Foundry*, 13(5), 361-367.
- Coronado, J. J., Sinatora, A. (2009). Abrasive wear study of white cast iron with different solidification rates. *Wear*, 267(11), 2116-2121, 10.1016/j.wear.2009.08.012.
- Daber, S., Ravishankar, K. S., Prasad Rao, P. (2008). Influence of austenitising temperature on the formation of strain induced martensite in austempered ductile iron. *Journal of materials science*, 43(14), 4929-4937, 10.1007/s10853-008-2717-8.
- Filipovic, M., Kamberovic, Z., Korac, M., Gavrilovski, M. (2013). Correlation of microstructure with the wear resistance and fracture toughness of white cast iron alloys. *Metals and materials international*, 19(3), 473-481, 10.1007/s12540-013-3013-y.
- Ghaderi A, Ahmadabadi M, Ghasemi H. (2003). Effect of graphite morphologies on the tribological behavior of austempered ductile iron. *Wear*, 255(1), 410-6, 10.1016/S0043-1648(03)00156-X.
- Han C, Wang Q, Sun Y, Li J. (2015). Effects of molybdenum on the wear resistance and corrosion resistance of carbidic austempered ductile iron. *Metall Microst Anal*, 4(4), 298-304
- Haseeb A, Aminul Islam M, Mohar Ali Bepari M. (2000). Tribological behaviour of quenched and tempered, and austempered ductile iron at the same hardness level. *Wear*, 244, 15-19, 10.1016/S0043-1648(00)00404-X.
- Keough, J., Hayrynen, K. (2005). *Wear Properties of Austempered Ductile Irons*. SAE Technical Paper, 01-1690.
- Krzynska A, Chmielewski T, Stolinski A. (2015). Comparison of austempered ductile iron and manganese steel wearability. *Arch Found Eng*, 15, 51-54.
- Kumari U, Rao P. (2009). Study of wear behavior of austempered ductile iron. *J Mater Sci*, 44, 1082-1093, 10.1007/s10853-008-3195-
- Laird, G., Gundlach, R. and Rohrig, K., (2000). *Abrasion Resistant. Cast Iron Handbook*, 1st ed, American Foundry Society, Des Plaines, IL.
- Lee S, Kim H, Kim J, Chun B, Kim C, Choi C. (1999). Effect of alloy elements on the wear resistance of austempered ductile iron. *J Kor Found Soc*, 19(1), 24-32.
- Lerner, Y. S., and G. R. Kingsbury. (1997). Wear resistance properties of austempered ductile iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 7(1), 48-52.
- Sahin Y, Durak O. (2007). Abrasive wear behavior of austempered ductile iron. *Materials & Design*, 28(6):1844-1850, 10.1016/j.matdes.2006.04.015.
- Sahin Y, Erdogan M, Kilicli V. (2007). Wear behavior of austempered ductile irons with dual matrix structures. *Mater Sci Eng*, 44(1), 31-8 10.1016/j.msea.2006.06.071.
- Sahin Y, Kilicli V, Ozer M, Erdogan M. (2010). Comparison of abrasive wear behavior of ductile iron with different dual matrix structures. *Wear*, 268, 152-265, 10.1016/j.wear.2009.07.008.
- Scandian, C., Boher, C., De Mello, J. D. B., Rezai-Aria, F. (2009). Effect of molybdenum and chromium contents in sliding wear of high-chromium white cast iron: The relationship between microstructure and wear. *Wear*, 267(1-4), 401-408, 10.1016/j.wear.2008.12.095.

- Sellamuthu P, Samuel D, Dinakaran D, Premkumar V, Li Z, Seetharaman S. (2018). Austempered ductile iron (ADI): influence of austempering temperature on microstructure, mechanical and wear properties and energy consumption. *Metals*, 8(1), 53, 10.3390/met8010053.
- Sharma S, Gupta R. (2015). Effect of austempering temperature and time on the wear characteristics of austempered ductile iron (ADI). *Int J Eng Res Gener Sci*, 3(1), 986–90.
- Turenne, S., Lavallee, F., Masounave, J. (1989). Matrix microstructure effect on the abrasion wear resistance of high-chromium white cast iron. *Journal of materials science*, 24(8), 3021-3028.
- Vadiraj, A., Balachandran, G., Kamaraj, M., Gopalakrishna, B., Rao, K. P. (2010). Studies on mechanical and wear properties of alloyed hypereutectic gray cast irons in the as-cast pearlitic and austempered conditions. *Materials & Design*, 31(2), 951-955, 10.1016/j.matdes.2009.07.030.
- Velez J, Tanaka D, Sinatora A, Tschiptschin A. (2001). Evaluation of abrasive wear of ductile cast iron in a single pass pendulum device. *Wear*, 251, 1315–1319, 10.1016/S0043-1648(01)00760-8.
- Wang B, Barber G, Tao C, Sun X, Ran X. (2018). Characteristics of tempering response of austempered ductile iron. *J Mater Res Technol*, 7(2), 198–202, 10.1016/j.jmrt.2017.08.011.
- Wang B, Barber G, Sun X, Shaw M, Seaton P. (2017). Characteristics of the transformation of retained austenite in tempered austempered ductile iron. *J Mater Eng Perform*, 26(5), 2095–2101, 10.1007/s11665-017-2663-1.
- Wang, B., Barber, G. C., Qiu, F., Zou, Q., Yang, H. (2020). A review: phase transformation and wear mechanisms of single-step and dual-step austempered ductile irons. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 1054-1069, 10.1016/j.jmrt.2019.10.074.
- Wen F, Zhao J, Zheng D, He K, Shangguan J. (2019). The role of bainite in wear and friction behavior of austempered ductile iron. *Materials*, 12(5), 767, 10.3390/ma12050767.
- Woodward, R. G., Toumpis, A., Galloway, A. (2022). The influence of cementite spheroidizing duration on the microstructure and sliding wear response of grey cast iron against AISI 4330. *Wear*, 488, 204155.
- Zimba J, Mamandi M, Yu D, Chandra T, Navara E, Simbi D. (2004). Un-lubricated sliding wear performance of unalloyed austempered ductile iron under high contact stresses. *Mater Des*, 25, 431–438, 10.1016/J.MATDES.2003.11.004.
- Zhang, J., Zhang, N., Zhang, M., Zeng, D., Song, Q., Lu, L. (2014). Rolling–sliding wear of austempered ductile iron with different strength grades. *Wear*, 318(1-2), 62-67, 10.1016/j.wear.2014.06.015.
- Zhou W, Zhou Q, Meng S. (1993). Abrasion resistance of austempered ductile iron. *Cast Metals*, 6(2), 69–75, 10.1080/09534962.1993.11819129



Comparison of Regression Algorithms to Predict Average Air Temperature

Berke Ogulcan Parlak¹ , Huseyin Ayhan Yavasoglu¹ 

¹Department of Mechatronics Engineering, Yıldız Technical University, 34349 Istanbul, TURKEY

Başvuru/Received: 02/01/2023

Kabul / Accepted: 30/01/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Abstract

Regression algorithms are statistical techniques used to predict the value of a dependent variable, based on one or more independent variables. These algorithms are commonly used in fields such as economics, finance, and engineering. Temperature prediction is a specific application of regression analysis. In this case, the dependent variable is temperature and the independent variables include factors such as humidity, speed of the wind, direction of the wind, and precipitation. There are many different types of regression algorithms, each with its strengths and weaknesses. The study compares the performance of multiple regression models in predicting the average air temperature, using one month's weather data for the Besiktas district of Istanbul. A total of six different regression models, including ridge, lasso, linear, polynomial, random forest (RF), and support vector (SV) regressions, were included in the study. Among the regression models trained and tested on two different data sets, the three most successful models in predicting average air temperature were lasso, RF, and polynomial regressions (PRs), respectively.

Key Words

“Air temperature forecast, linear, nonlinear, regression”

1. Introduction

Temperature is one of the most important weather parameters (Abdel-Aal, 2004), and the prediction of air temperature is a complex process that is a challenging task for researchers (Riordan & Hansen, 2002). In recent years, there has been an increasing interest in the development of regression algorithms for temperature prediction. A variety of approaches have been proposed, including linear and nonlinear methods. In general, linear methods are more efficient and easier to implement (Bastien et al., 2005), but nonlinear methods may be more accurate. Temperature prediction is a difficult problem due to the complex nature of the atmosphere. However, significant progress has been made in recent years thanks to advances in computing power and data availability. Regression algorithms have become very popular (Benyahya et al., 2007) in the literature as they are a promising approach for further improvement in temperature prediction accuracy.

Alaruri and Amer (Alaruri & Amer, 1993) performed least-squares linear regression (LR) analysis on the weather data recorded in Kuwait in 1985, 1986, and 1987 and determined the inputs that should be selected based on the performances. Houthuys et al. (Houthuys et al., 2017) developed a novel model called multi-view least squares SV machines regression. The developed model was tested on a weather dataset. The model performed well on test data with a minimum of 1.14 mean absolute error (MAE). Karna et al. (Karna et al., 2018) trained a simple LR model for a similar weather dataset. The model achieved a minimum of 1.78 MAE on test data. Duan et al. (Duan et al., 2019) trained SV regression models with different kernel parameters for air temperature prediction. The radial basis function (RBF) core showed the best performance on test data. Holmström et al. (Holmstrom et al., 2016) compared the performance of linear and functional regression models in predicting weather temperature. The linear model was clearly more successful. Shafin (Shafin, 2019) trained three different regression models, linear, polynomial, and SV, to predict mean air temperature. PR and SV regression models on the test data showed close success and the results were better than the LR model. Chevalier (Chevalier, 2008) compared the performance of artificial neural networks (ANNs) and SV regression on a weather dataset. SV regression performed better than ANN in predicting air temperature. Jakaria et al. (Jakaria et al., 2020) trained three different regression models, ridge, RF, and SV, to predict air temperature. The results showed that the RF regression model performed best in predicting air temperature. Zhang et al. (Zhang et al., 2021) compared the air temperature prediction performance of the RF regression model with numerical-based weather predicting methods. The RF regression model made observably superior predictions. Vicente-Serrano et al. (Vicente-Serrano et al., 2003) compared the success of linear-nonlinear regression models in predicting air temperature with the success of numerical-based weather predicting methods. The results showed that the regression models produced more accurate predictions.

Although regression algorithms are widely used in air temperature predicting, few studies train multiple regression algorithms on actual weather datasets and compare their performance. This study will therefore be useful for filling this gap in the literature. The main contributions of this manuscript are as follows:

- First, the paper compares the performance of linear, polynomial, lasso, ridge, SV (different kernels), and RF regressions in air temperature prediction.
- Second, a case study for Besiktas, Istanbul is conducted with the dataset that includes 1-month weather data provided by Istanbul Metropolitan Municipality.
- Third, a superior air temperature prediction model is discussed.

During the case study inputs are effectively assigned by the backward elimination method. The data that is thought to be corrupt is filtered out from the data set. Since there is no certainty that the data is corrupt, models are trained and tested on two data sets. The average of the R^2 scores obtained in the two data sets is taken and the relevant regression models are ranked according to their performance.

This paper is organized as follows. Section 2 describes the materials and methods used in the study, including the dataset used and a discussion of the various regression algorithms used. Section 3 presents the results of the analysis for both raw and processed data. Finally, the conclusions are presented in Section 4.

Terminology

a	Coefficient of the polynomial function
b	Model coefficient
d	Degree of the polynomial function
n	Number of samples
p	Number of features
w	Normal vector to the surface
x	Independent variable
y	Dependent variable
ϵ	Maximum error
λ	Adjustable penalty

2. Materials and Methods

2.1. Data set

The data set used in the study was obtained from the open data portal of Istanbul Metropolitan Municipality. The data source contains minimum temperature, maximum temperature, average temperature, minimum humidity, maximum humidity, average humidity, minimum wind speed, maximum wind speed, average wind speed, minimum wind direction, maximum wind direction, average wind direction, minimum precipitation, maximum precipitation, average precipitation, minimum road temperature, maximum road temperature, average road temperature, minimum felt temperature, maximum felt temperature and average felt temperature data collected in April 2021 from sensors located in various locations in Istanbul. These data were filtered to be Besiktas district based on location, and only average values based on data. The inputs and outputs of the final model are given in Figure 1.

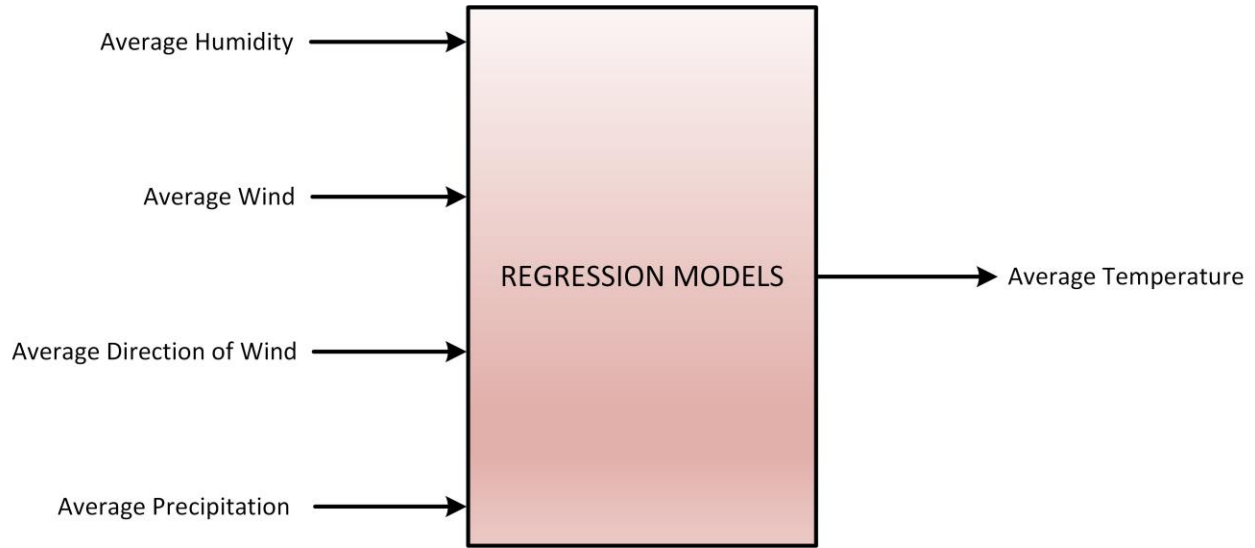


Figure 1. Inputs and output of regression models to be trained

Whether the determined inputs were assigned correctly or not was questioned by the backward elimination method. The method begins by fitting a full model with all possible independent variables, and then iteratively removes the least significant independent variables one by one until the remaining independent variables are all significant. The significance level for removal is chosen by the user (selected as 0.05) and serves as a threshold for determining statistical significance. Some statistical data of the backward elimination method are presented in Table 1. Since the P-value for each feature is below the significance level, it can be said that the inputs are assigned correctly.

Table 1. Statistical outputs of the backward elimination method

Variable	Coefficient	Standard Error	t	P > t	[0.025	0.975]
Humidity	0.0587	0.005	12.467	0.000	0.049	0.068
Wind	0.8521	0.147	5.793	0.000	0.563	1.141
Direction of wind	0.0419	0.002	20.868	0.000	0.038	0.046
Precipitation	-2.6179	0.519	-5.040	0.000	-3.638	-1.598

The station collected hourly data from April 1 to April 30. The visualization of the collected average temperature data is presented in Figure 2.

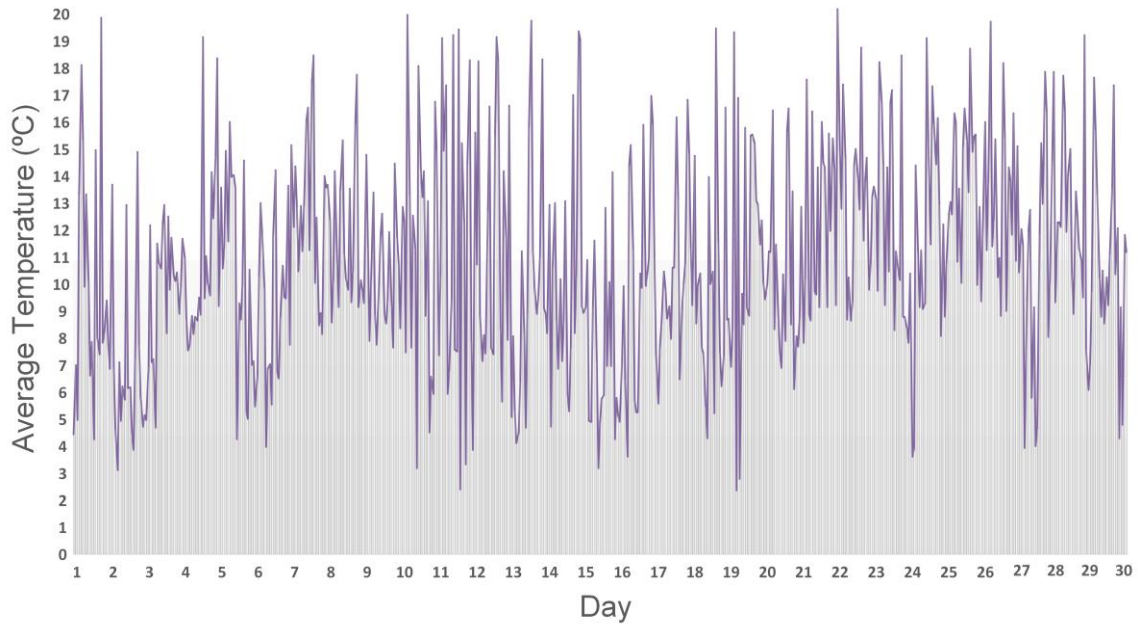


Figure 2. Average temperature data collected from April 1 to April 30

It is important to define the final model parameters given in Figure 1 to determine the regression model to be established and to train the model efficiently. Here, the average relative humidity (RH) is the average humidity (%RH) measured from the related sensor, the average wind is the average wind speed measured from the related sensor (km/h), the average direction of the wind is the average wind direction measured from the related sensor (km/h), the average precipitation is the average precipitation amount measured from the related sensor (kg/m²) and the average temperature are defined as the average temperature measured from the relevant sensor (°C). The relationship between the variables can be visualized in Figure 3.

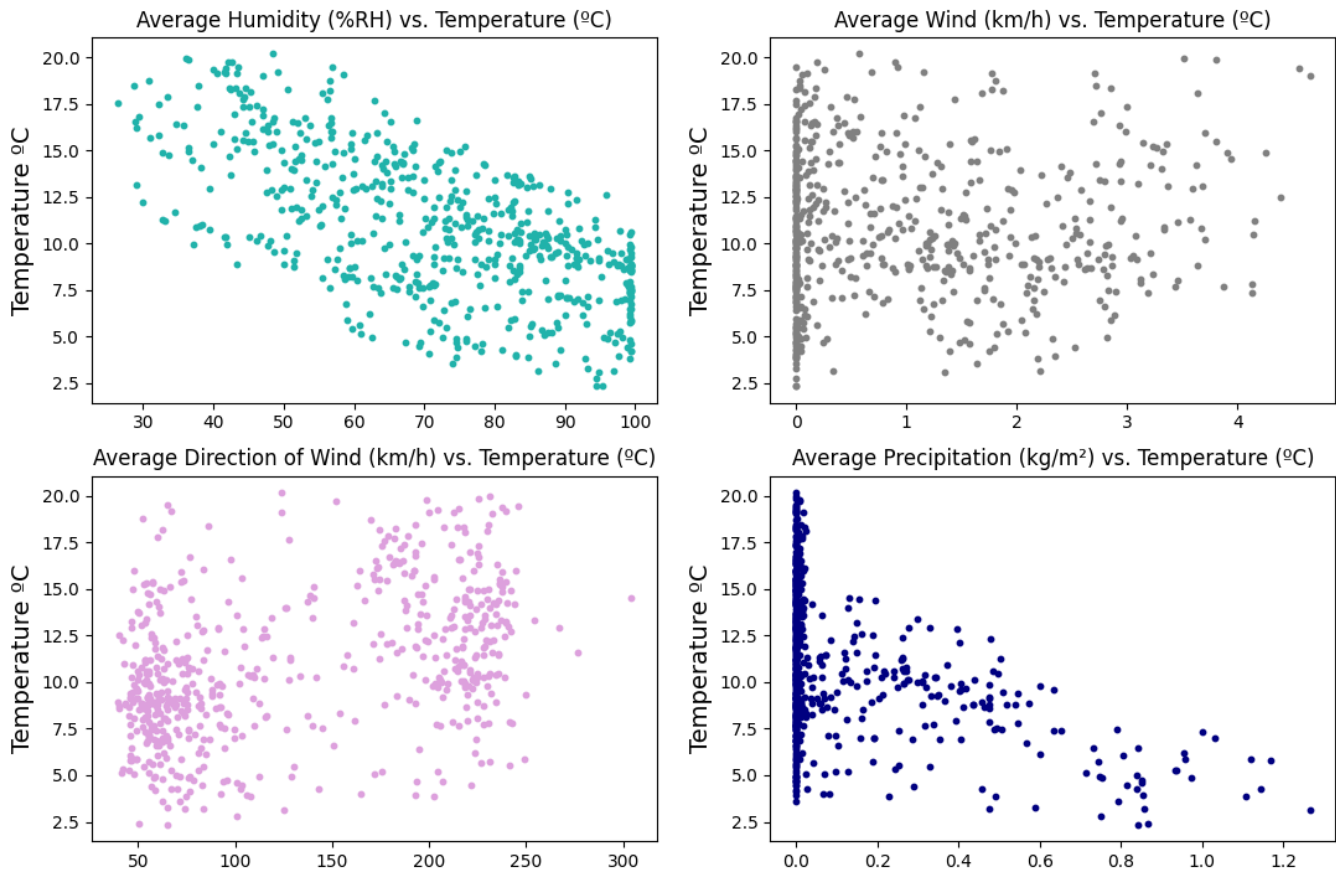


Figure 3. Visualization of relationships between inputs and output

Looking at the data set, it is seen that some values are stacked to zero in the input features other than the average humidity. Although it is not certain, values that are exactly zero can be considered as the sensor not working properly at that time. For this very reason, both the data set visualized in Figure 3 and the data set from which the sensor data, which is thought to be corrupt, is deleted, will be used in the study. This data set is shown in Figure 4. In this data set, each feature was evaluated separately and rows that were exactly equal to zero were deleted. The average precipitation values still seem to be stacked to zero, but this is because the values are very close to zero. Since these values are not exactly zero, they were not removed from the data set.

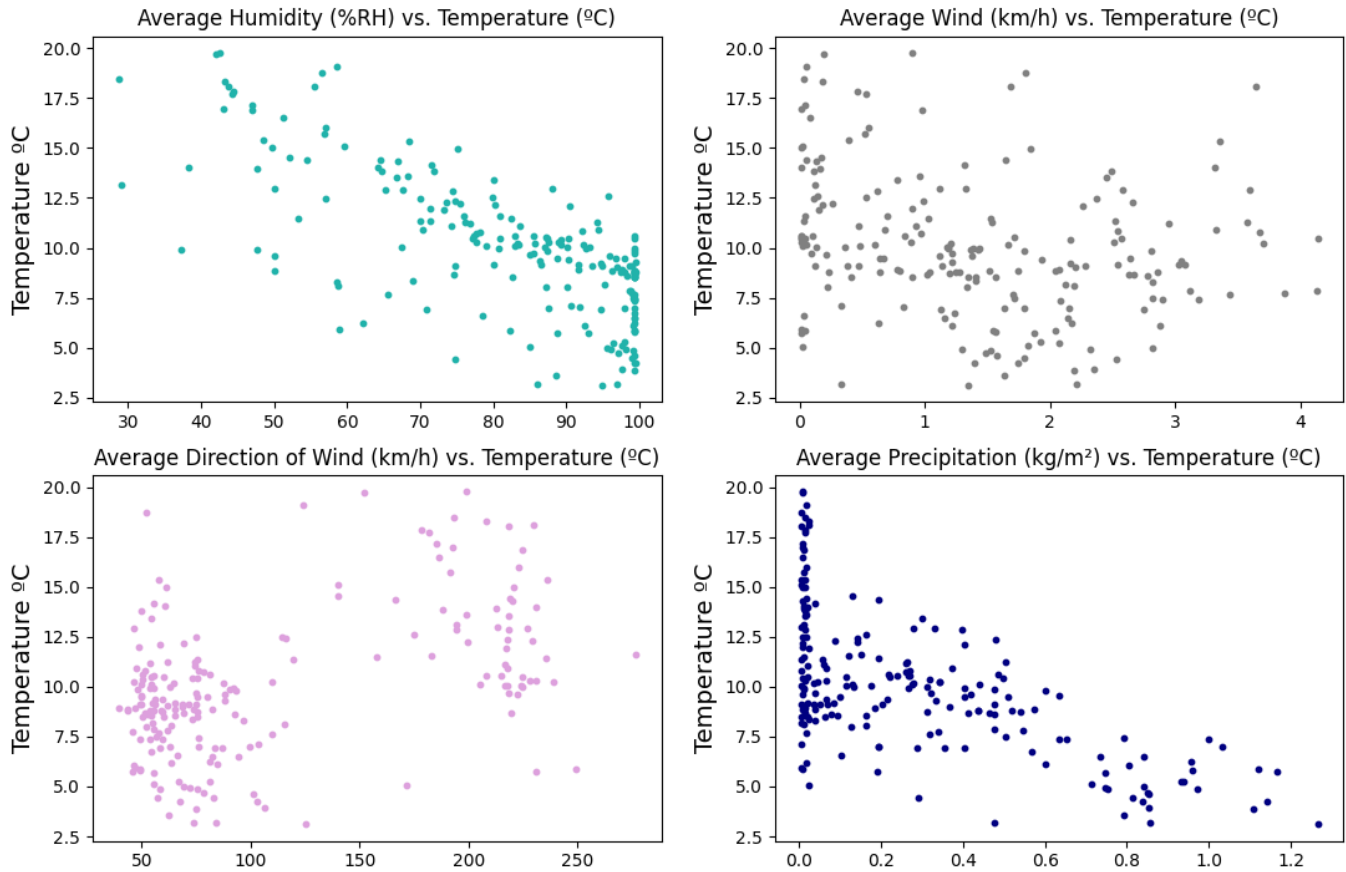


Figure 4. Visualization of relationships between inputs and outputs (exact zero values deleted)

2.2. Regression algorithms

Many regression algorithms can be used for air temperature prediction, including linear (Avdakovic et al., 2013), ridge (Lan & Zhan, 2017), lasso (Al-Obeidat et al., 2020), SV (Paniagua-Tineo et al., 2011), RF (He et al., 2022), and PR (Bahrami & Mahmoudi, 2022). LR is a simple and widely used method that models the linear relationship between the independent variables and the dependent variable. Ridge regression and lasso regression are both variations of LR that introduce regularization terms in the objective function to prevent overfitting and improve model generalization. SV regression is a non-linear method that uses the idea of SV to find the hyperplane that maximally separates the data points in the predictor space and then uses this hyperplane to make predictions. RF is an ensemble method that combines the predictions of multiple decision trees trained on different subsets of the data, resulting in improved predictive accuracy and reduced overfitting. PR is a method that models the relationship between the independent variables and the dependent variable using a polynomial function of a specified degree. These algorithms can be trained on historical temperature data and used to make predictions of future temperature values. The study includes linear, polynomial, lasso, ridge, SV, and RF regression algorithms for air temperature prediction and compares these methods according to their performance.

2.2.1. Linear regression

LR is a method for modeling the linear relationship between a dependent variable and one or more independent variables. It is based on the idea of finding the line (or hyperplane in the case of multiple independent variables) that best fits the data. To fit a LR model, parameters must be found that minimize the sum of the squared errors between the predicted values and the actual values. The objective function for LR is shown in Equation 1, where \hat{y}_i is the predicted output value and \bar{y}_i is the actual output value.

$$\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1)$$

2.2.2. Polynomial regression

PR is a method for modeling the relationship between the predictor variables and the response variable by fitting a polynomial function of a specified degree. It is based on the idea of extending LR by adding extra features that are powers of the original features. The equation of a PR model with one independent variable is given in Equation 2.

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_dx^d \quad (2)$$

The objective function for PR is similar to the objective function defined for LR. Only the polynomial function given in Equation 2 is used instead of the simple linear function.

2.2.3. Lasso regression

Lasso regression is a variation of LR that introduces a regularization term in the objective function to prevent overfitting and improve model generalization. It is based on the idea of finding the line or hyperplane that best fits the data while also limiting the complexity of the model by reducing the magnitude of the coefficients. To fit a lasso regression model, an optimization algorithm must be used that can process the absolute value of the coefficients in the term regularization. A commonly used method is the coordinate descent method, which iteratively optimizes each coefficient while keeping the others constant. The objective function for lasso regression is shown in Equation 3.

$$\sum_{i=1}^n \left(y_i - b_0 - \sum_{j=1}^p b_j x_{ij} \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^p |b_j| \quad (3)$$

2.2.4. Ridge regression

Ridge regression and lasso are both techniques for regularizing LR models. Regularization is a way to prevent overfitting by adding a penalty term to the objective function. In lasso regression, the penalty term is the sum of the absolute values of the coefficients, while in ridge regression it is the sum of the squares of the coefficients. This has the effect of shrinking the coefficients towards zero and can help reduce overfitting. The objective function for ridge regression is shown in Equation 4.

$$\sum_{i=1}^n \left(y_i - b_0 - \sum_{j=1}^p b_j x_{ij} \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^p b_j^2 \quad (4)$$

2.2.5. Support vector regression

SV regression is based on the idea of finding the hyperplane in the high-dimensional feature space that maximally separates the data points and then using this hyperplane to make predictions. To fit a SV regression model, the optimization problem given in Equation 5 must be solved.

$$\text{MIN } \frac{1}{2} \| \mathbf{w} \|^2 \text{ with the constraint of } |y_i - b_i x_i| \leq \varepsilon. \quad (5)$$

2.2.6. Random forest regression

RF regression is an ensemble method that combines the predictions of multiple decision tree regressors to make predictions. A decision tree regressor is a tree-like model that makes predictions by recursively partitioning the data based on the feature values. The prediction for a given sample is computed as the mean response value of the samples in the leaf node to which it belongs. The RF architecture for classification and regression analysis is given in Figure 5.

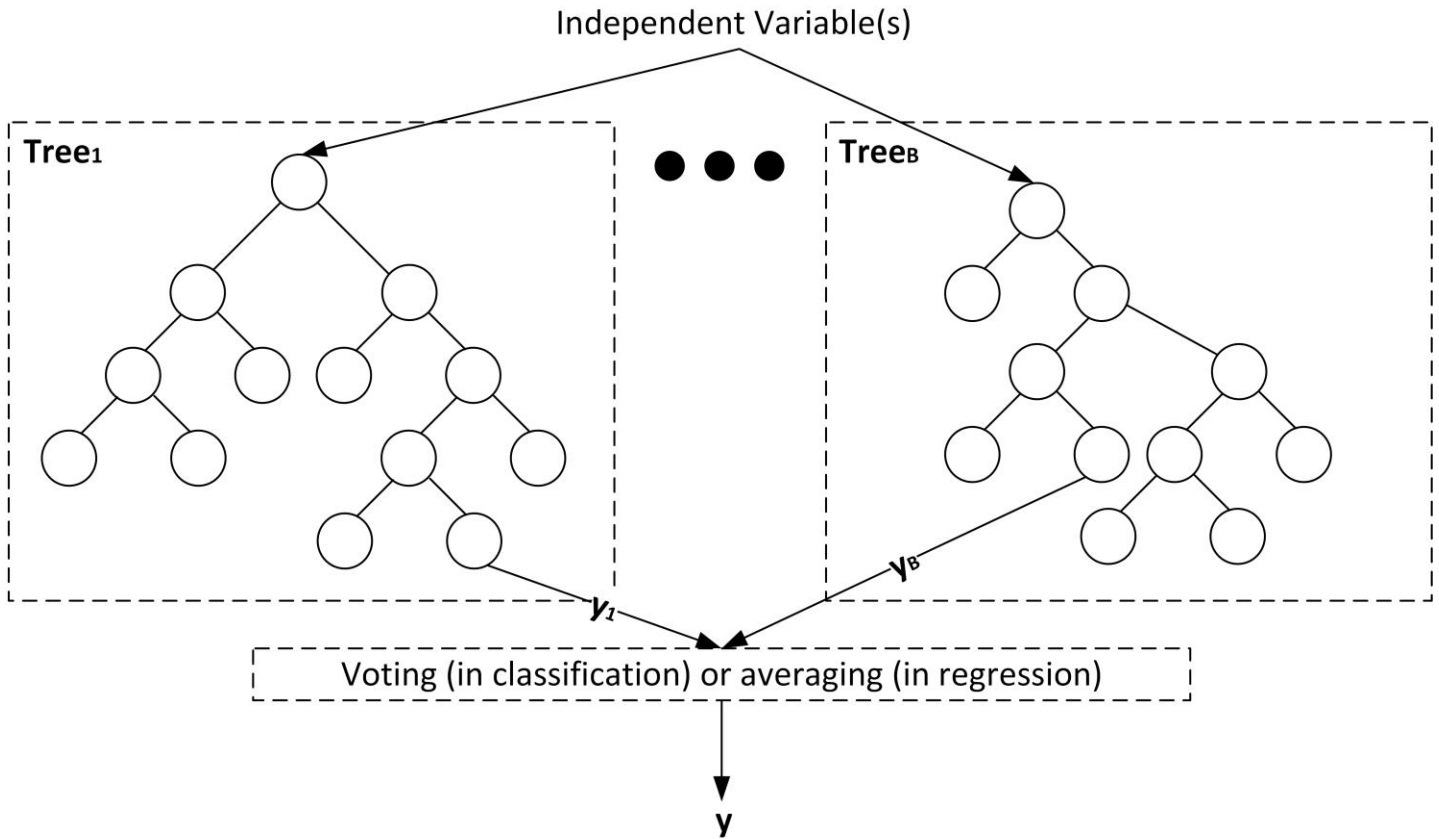


Figure 5. Architecture of the RF model (Verikas et al., 2016)

2.3. Implementation of regression algorithms

In the study, Python programming language was preferred for regression analysis due to the abundance of libraries and resources specially designed for data analysis (Stančin & Jović, 2019) and statistical modeling (Seabold & Perktold, 2010). Python has many libraries such as NumPy, Pandas, and Scikit-learn that make it easy to do regression analysis (Massaron & Boschetti, 2016). Pandas library was used to collect weather data, Matplotlib library for visualization of raw and processed data, Statsmodel library for accurate assignment of model inputs (data preparation), and Scikit-learn library for model development (training, evaluation, tuning) in the study. The development steps for the air temperature prediction regression model in Python and which libraries are used in which steps are shown in Figure 6.

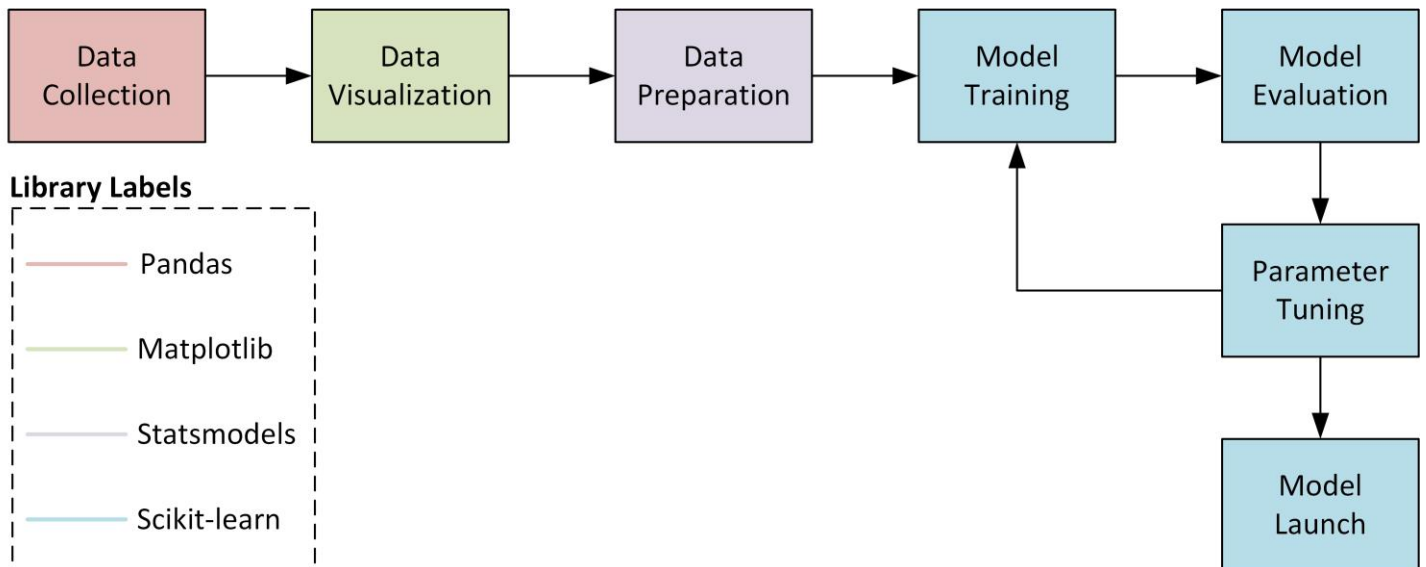


Figure 6. Development steps for the air temperature prediction regression model

3. Results

3.1. Results of raw data

The section presents the performances of the regression algorithms trained with the raw data set in Figure 3. 70% of the data is reserved for training purposes and 30% for testing purposes. The adjustable parameters of the linear, polynomial, lasso, ridge, SV, and RF regression algorithms are optimized to give the best results. The R^2 scores obtained as a result of applying the relevant regression algorithms to the test data are shown in Figure 7.

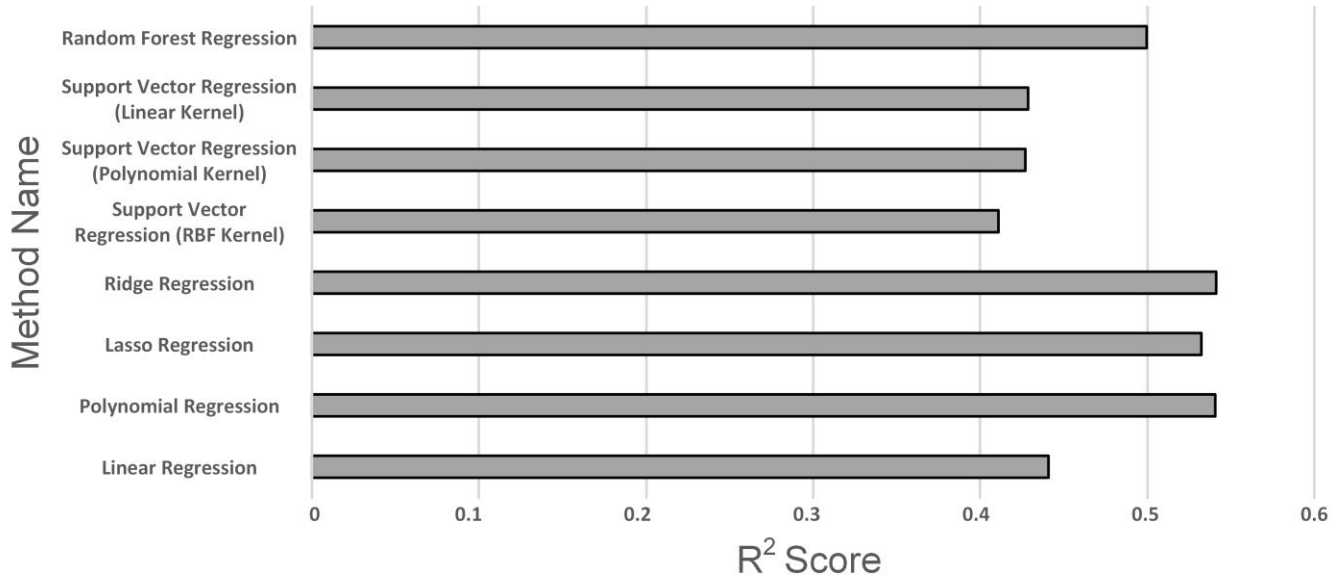


Figure 7. R^2 scores in air temperature prediction of regression models (raw data)

3.2. Results of processed data

The section presents the performances of the regression algorithms trained with the processed data set in Figure 4. 70% of the data is reserved for training purposes and 30% for testing purposes. The adjustable parameters of the linear, polynomial, lasso, ridge, SV, and RF regression algorithms are optimized to give the best results. The R^2 scores obtained as a result of applying the relevant regression algorithms to the test data are shown in Figure 8.

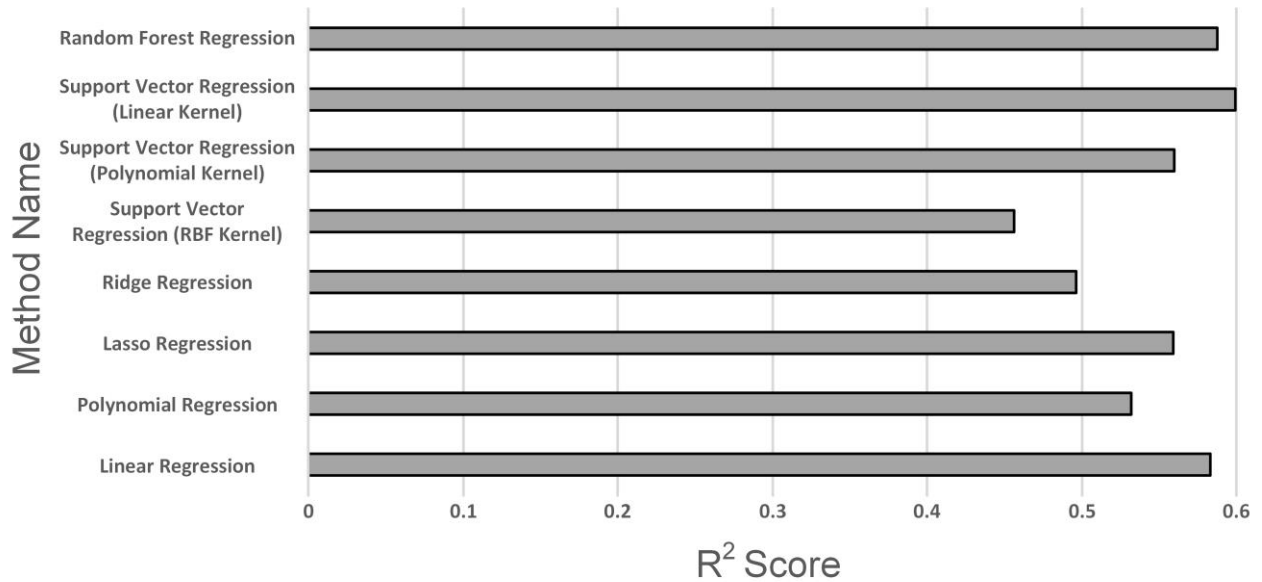


Figure 8. R^2 scores in air temperature prediction of regression models (processed data)

3.3. Combined results

Since there are two different types of data (raw and processed) in the study, it would be reasonable to compare the performance of the regression algorithms by averaging the R^2 scores obtained from these data. An average of the results obtained in Figure 7 and Figure 8 is given in Figure 9. The average scores obtained will be used to compare the performance of the respective regression algorithms in predicting air temperature.

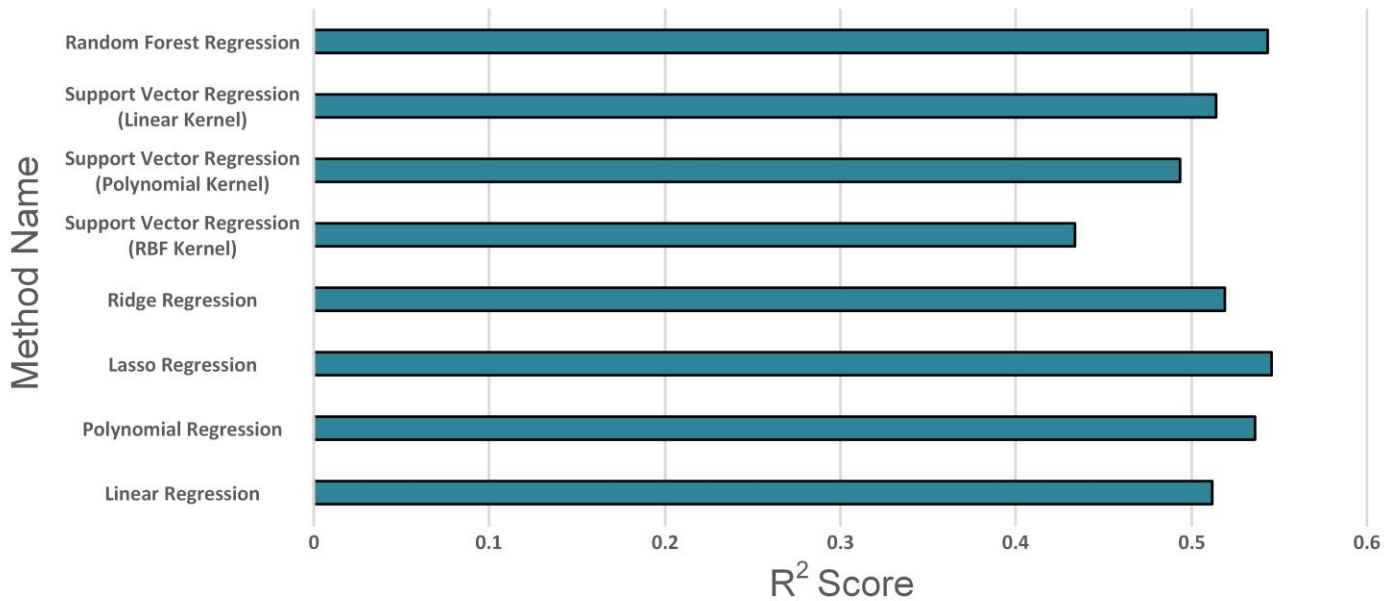


Figure 9. Average R^2 scores in air temperature prediction of regression models (combined data)

4. Conclusions

Temperature prediction is a challenging problem that has received considerable attention in recent years. A wide variety of methods have been proposed for tackling this problem, with varying degrees of success. One approach that has shown promise is the use of regression algorithms. Regression-based models can be used to learn the relationships between temperature and a variety of potential predictive factors, such as historical temperatures, atmospheric conditions, and so on. These models can then be used to make predictions about future temperatures. The development of robust regression algorithms is therefore an important area of research with the potential to improve the ability to predict future temperature changes.

The study compares the performance of multiple regression models in predicting air temperature. For the training and testing of the models, 1-month measurement data of the district of Besiktas, Istanbul, dated April 2021, was used. While the inputs of the regression models were selected as average humidity, average wind, the average direction of the wind, and average precipitation, the output was determined as average temperature. The data set is divided into raw data and processed data. The processed data is created by deleting rows that are exactly equal to zero in the raw data. Among the models trained and tested with raw data, the three most successful models were the ridge (R^2 score of 0.5417), polynomial (R^2 score of 0.5407), and lasso (R^2 score of 0.5329) regression models, respectively. Among the models trained and tested with processed data, the three most successful models were the SV (linear kernel, R^2 score of 0.6000), RF (R^2 score of 0.5875), and LR (R^2 score of 0.5830) models, respectively. Since these two discrete results cannot be used to rank regression models, the R^2 score average of the two results was taken. Accordingly, the three most successful models for temperature prediction were the lasso (R^2 score of 0.5461), RF (R^2 score of 0.5438), and PR (R^2 score of 0.5364) models, respectively.

An analysis of the R^2 score values for the models trained on both processed and raw data revealed that lasso regression is the most effective method for predicting air temperature. However, when the analysis was limited to models trained only on processed data, a different outcome emerged. Linear kernel-structured SV regression performs superiorly in this case. This difference is due to the dependence of regression model performance on the quality and characteristics of the training dataset. Notably, the results presented in this paper could be further enhanced by expanding the dataset or implementing advanced data processing techniques. Nonetheless, the paper serves as a useful guide for researchers and practitioners in selecting suitable regression models for air temperature estimation. The study indicates that, with well-processed data, linear kernel-structured SV regression may be a better choice than lasso regression for air temperature prediction, according to the paper.

References

- Abdel-Aal, R. E. (2004). Hourly temperature forecasting using abductive networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 17(5), 543–556.
- Al-Obeidat, F., Spencer, B., & Alfandi, O. (2020). Consistently accurate forecasts of temperature within buildings from sensor data using ridge and lasso regression. *Future Generation Computer Systems*, 110, 382–392.
- Alaruri, S. D., & Amer, M. F. (1993). Empirical regression models for weather data measured in Kuwait during the years 1985, 1986, and 1987. *Solar Energy*, 50(3), 229–233.
- Avdakovic, S., Ademovic, A., & Nuhanovic, A. (2013). Correlation between air temperature and electricity demand by linear regression and wavelet coherence approach: UK, Slovakia and Bosnia and Herzegovina case study. *Archives of Electrical Engineering*, 62(4).
- Bahrami, M., & Mahmoudi, M. R. (2022). Long-term temporal trend analysis of climatic parameters using polynomial regression analysis over the Fasa Plain, southern Iran. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 134(2), 1–12.
- Bastien, P., Vinzi, V. E., & Tenenhaus, M. (2005). PLS generalised linear regression. *Computational Statistics & Data Analysis*, 48(1), 17–46.
- Benyahya, L., Caissie, D., St-Hilaire, A., Ouarda, T. B. M. J., & Bobée, B. (2007). A review of statistical water temperature models. *Canadian Water Resources Journal*, 32(3), 179–192.
- Chevalier, R. F. (2008). Air temperature prediction using support vector regression and GENIE: The Georgia Extreme-weather Neural-network Informed Expert. University of Georgia.
- Duan, S., Yang, W., Wang, X., Mao, S., & Zhang, Y. (2019). Grain pile temperature forecasting from weather factors: A support vector regression approach. 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), 255–260.
- He, Y., Chen, C., Li, B., & Zhang, Z. (2022). Prediction of near-surface air temperature in glacier regions using ERA5 data and the random forest regression method. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 28, 100824.
- Holmstrom, M., Liu, D., & Vo, C. (2016). Machine learning applied to weather forecasting. *Meteorol. Appl*, 10, 1–5.
- Houthuys, L., Karevan, Z., & Suykens, J. A. K. (2017). Multi-view LS-SVM regression for black-box temperature prediction in weather forecasting. 2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 1102–1108.
- Jakaria, A. H. M., Hossain, M. M., & Rahman, M. A. (2020). Smart weather forecasting using machine learning: a case study in tennessee. *ArXiv Preprint ArXiv:2008.10789*.
- Karna, N., Roy, P. C., & Shakya, S. (2018). Temperature Prediction using Regression Model.
- Lan, Y., & Zhan, Q. (2017). How do urban buildings impact summer air temperature? The effects of building configurations in space and time. *Building and Environment*, 125, 88–98.
- Massaron, L., & Boschetti, A. (2016). *Regression analysis with Python*. Packt Publishing Ltd.
- Paniagua-Tineo, A., Salcedo-Sanz, S., Casanova-Mateo, C., Ortiz-García, E. G., Cony, M. A., & Hernández-Martín, E. (2011). Prediction of daily maximum temperature using a support vector regression algorithm. *Renewable Energy*, 36(11), 3054–3060.
- Riordan, D., & Hansen, B. K. (2002). A fuzzy case-based system for weather prediction. *Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications*, 10(3), 139–146.
- Seabold, S., & Perktold, J. (2010). *Statsmodels: Econometric and statistical modeling with python*. Proceedings of the 9th Python in Science Conference, 57(61), 10–25080.
- Shafin, A. A. (2019). Machine learning approach to forecast average weather temperature of Bangladesh. *Global Journal of Computer Science and Technology*, 19(3), 39–48.
- Stančin, I., & Jović, A. (2019). An overview and comparison of free Python libraries for data mining and big data analysis. 2019 42nd

International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 977–982.

Verikas, A., Vaiciukynas, E., Gelzinis, A., Parker, J., & Olsson, M. C. (2016). Electromyographic patterns during golf swing: Activation sequence profiling and prediction of shot effectiveness. *Sensors*, 16(4), 592.

Vicente-Serrano, S. M., Saz-Sánchez, M. A., & Cuadrat, J. M. (2003). Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. *Climate Research*, 24(2), 161–180.

Zhang, Q., Cheng, J., & Wang, N. (2021). Fusion of All-Weather Land Surface Temperature From AMSR-E and MODIS Data Using Random Forest Regression. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19, 1–5.



Non-Invasive Bio-Signal Data Classification Of Psychiatric Mood Disorders Using Modified CNN and VGG16

Ali Berkan Ural^{1*}

¹Department of Electrical Electronics Engineering, Circuit and Systems/Biomedical, Kafkas University, Kars, 36000, TURKEY

Başyuru/Received: 25/12/2022

Kabul / Accepted: 30/01/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Abstract

In this study, the aim is to develop an ensemble machine learning (ML) based deep learning (DL) model classifiers to detect and compare one type of major psychiatric disorders of mood disorders (Depressive and Bipolar disorders) using Electroencephalography (EEG). The diverse and multiple non-invasive biosignals were collected retrospectively according to the granted ethical permission. The experimental part is consisted from three main parts. First part is the data collection&development, the second part is data transformation and augmentation via Spectrogram image conversion process and online Keras data augmentation part, respectively. The third and final part is to fed these image dataset into modified Convolutional Neural Network (CNN) and VGG16 models for training and testing parts to detect, compare and discriminate mood disorders types in detail with a specific healthy group. As the performance evaluation background of the mood disorder classification models, confusion matrices and receiver operating characteristics (ROC) curves were used and finally, the accuracy achieved by CNN model was 88% and VGG16 model was %90, which is an improvement of 10% compared to the previous studies in literature. Therefore, our system can help clinicians and researchers to manage, diagnose and prognosis of the mental health of people.

Key Words

“Psychiatric disorders, Mood disorder, Depressive disorder, Bipolar Disorder, Deep Learning, Pretrained model classification”

1. Introduction

Mood disorders (MDs) are the most common and prevalent type of mental illness after Anxiety disorder in the world, affecting millions of people worldwide. The main types of MDs are Depressive and Bipolar disorders and the clinical features of MD include persistent uneasiness, unstable sudden mood change as well as bad feelings in the brain etc. all of which are related to the nervous system.

Traditional psychological studies which were not used AI and ML based models frequently show no important correlation and coherence between psychological parameters and sudden mood change levels. Indeed, other studies (Acharya et. al., 2018; Aristizabal et. al., 2021; B̃alan et. al., 2019; B̃alan et. al., 2020) which used AI and ML based techniques show that mood disorder such as Depressive and Bipolar disorders recognition and estimation through EEG bio-signals and psychological analysis are possible. Indeed, different biomarkers such as Electromyogram (EMG), Electrocardiogram (ECG) and Electroencephalography (EEG) can be chosen and used to optimally detect and discriminate physiological responses related to depression and bipolar situation (Dubreuil-Vall et. al., 2020).

In mental healthcare area, the development in data and computational science has been suddenly and rapidly changing. Also, the usage of Artificial Intelligence (AI) in medicine sciences has been increasingly chosen and become more popular (Bishop, 2007). The main advantage of AI based systems is to prospectively assess the performance of estimation in unseen data for testing and training phases (Murphy, 2012). Although these systems have become popular, these are contrary to fundamental inference based on some hypothesis tests related to the variance variable. AI and Machine Learning (ML) based systems are expected to help and possibly replace doctors' or clinicians' decisions in especially diagnosis, prediction and prognosis outcomes (Miotto et. al., 2017).

The electrical activity of the brain neurons in the cortex can be recorded via EEG. This approach becomes ideal and appropriate for researching the electrophysiological and cognitive situation of the brain because of the neural activity with a high temporal resolution. Many imaging studies have compared healthy control groups (HCs) with one or several disorders, but only few have comprehensively compared many common and important mental diseases. This occasion might be caused because acquiring image data may be related to the high costs and time for applying any ML models. Another alternative way is to obtain the metric parameters of the brain is EEG, that delivers information from scalp of the brain and EEG is a non-invasive and cost-effective method for obtaining brain waves and brain activity (Saeed et. al., 2015). Moreover, in modern technological area, EEG is more preferable in brain human interaction computer systems area (Saeed et. al., 2020). One recent EEG study showed that with using ML methods, EEG could be used to optimally detect schizophrenia between a specific group and HCs in detail. In mental healthcare area, the main popular trend has been to disseminate and evaluate among patients with single mental disorders such as depression, schizophrenia, stress disorders etc.

To better investigate the mental health conditions and provide better outcomes, early detection of mental health problems is an important process. Apart from the diagnosis of other possible diseases, mental illnesses are commonly diagnosed with the individual based self-report according to the specific questionnaires that is designed for the specific patterns of the feelings etc (Zhang et. al., 2020). In this area, AI and ML based integrated models have gained more popularity and usage for detecting and discriminating diseases (Najafabadi et. al., 2015). In recent years, more superior results have been obtained from DL models and algorithms in medical area (Mumtaz and Qayyum., 2019).

There have been a lot of studies published approximately past 10 years and they have been reviewed (Widge et. al., 2019; Xie et. al., 2020, Zhang et.al., 2020; Oh et. al., 2019; Kuang and He, 2014). These studies were generally related to the detection of mental disorders except whole Mood disorder types such as depressive and bipolar disorders and novel modified Deep Learning models such as ResNet-50 and VGG16. Neuroimaging on the human brain has gained more popularity for decade and some methods such as Magnetic Resonance Imaging (MRI) and Electroencephalography (EEG) were highly chosen and became more popular than in the past. Neuroimaging gives a chance to analyze a lot of mental disorders such as autism spectrum disorders (ASD), schizophrenia, bipolar disorder, major/minor depressive disorder etc.

Depressive and bipolar disorders have common all over the world and a lot of people suffered from these types of mental diseases. Fear and anxiety have been reported as the main emotions among people for many years. Mood disorders especially depressive disorder can be characterized by childhood and early adolescence. According to worldwide, mood disorders constitute an important range after anxiety disorder (12.6% of people worldwide) (Kuang et. al., 2014). In bipolar disorder, there are seen more hybrid symptoms than depressive disorder and in some aspects, the same symptoms are clearly seen in both of these disorder types. Indeed, mood disorders are often seen together with anxiety disorder.

Psychosocial, neurobiological and neuropsychological factors have been thought to be effective in the evaluation of mood disorders (Schnack et. al., 2014). Fast processing for obtaining outcomes is very important for evaluating mental diseases and mood disorders. The more usage of AI and ML integrated DL models have given access to identify many disorders at an earlier stage and because of this occasion, more efficient interventions will be provided in near future.

Biomarker can be defined as one of the screening and pattern methods and has been generally used in the diagnosis of the brain image. Wolfers et al. was examined the utilization of patient screenings for psychiatric diseases and they obtained that pattern screening was highly improvable in the diagnosis of the brain based and mental diseases since the day from the past. Indeed, Garcia,Ceja et al. were achieved a mental based health monitoring system with ML methods. They have achieved the detection, classification and interpretation

parts in detail in this study. It has been obtained that the usage of the multiple sensing based technologies with ML methods could provide some pros in the treatment of mental diseases. Continuous effective monitoring of some different mental situations such as depression, stress, anxiety etc. with some implementations could give more efficiency and these could be integrated with multiple medical technologies. Moreover, Shafiei et al. were analyzed and examined the shape based features of the brain images during dynamic emotional facial image based processing. Totally 228 subjects were chosen and used in this study and all of the subjects applied to the treatment of DSM-5 diagnoses of depressive disorder, anxiety disorder etc. In addition, the most average age of the study was comprised from women. MRI imaging has been achieved for fearful, angry and happy faces situations. Then, these data were analyzed via Gaussian Process Regression and it was obtained that neuroimaging could be an effective tool for analyzing mental diseases in detail. Depression and Bipolar disorder could be appeared with panic disorder among many people. For this progress, the brain waves could be an effective tool for analyzing subject-brain attitudes/situations, so EEG was chosen and used in this study. MRI images of the subjects were examined with ML methods and it was obtained that according to Random Undersampling Boost algorithm, 73% accuracy was obtained from the evaluation part.

ML methods have also been used to determine the measurements of patient outcome which are important for anxiety and major/minor depressive disorders. Indeed, they were trained via neural network (NN) models. Kumar et al. collected and applied the data on eight different ML methods by using depression, anxiety and stress scale questionnaire (DASS42 and 21). Moreover, these algorithms were gathered in four different classes; these were probabilistic, nearest neighbour, NN and decision tree. According to the results, Radial basis function network had the highest accuracy for detecting anxiety, depression and stress, respectively for DASS42 database. When DASS21 data were used, the best accuracy was obtained from Random Forest Algorithm.

In this study, we aimed to achieve successful classification with modified classifiers for discriminating/analyzing patients with several mental disorders from a specific healthy subject group. We retrospectively collected and classified raw EEG data of patients with two main categories: depressive and bipolar disorders. To improve and increase the usage of the classifiers performance metrics, models were utilized using spectral power and functional connectivity that are common in EEG signal parameter settings. Indeed, to improve the accuracy, batch normalization, flatten layers and fully connected layers were added in the Deep Learning models. Also, confusion matrices, receiver operating characteristic (ROC) curves were used for analyzing the performance of the whole systems and models. Via this study, the main advantage of the mood disorders classifier proposed in this study can be explained as a helpful system in mental health diagnosing and mental health management via a fast and an accurate classifier to discriminate the disorder types by doctors and clinicians.

2. Material and Methods

2.1. Data collection

Data were collected retrospectively from 10 years’ medical records from Yildirim Beyazit University Hospital and one doctor who is expert in this area was reviewed and analyzed the dataset. The original diagnostic decision was made this doctor/psychiatrist based on DSM-IV criteria and psychological assessments with subjects’ EEG recordings. In addition, a specific healthy control subject group was included to this study for achieving an optimal classification. The inclusion criteria was consisted from the subjects’ age from 18 to 65 according to the primary diagnosis and these subjects were disseminated from 2 main categories; depressive (n=100) and bipolar disorders (n=100). Generally, the exclusion criteria were as follows; current medical history of a neurological disorder of the subject and lifetime parameter. Indeed, this retrospective study was approved by institutional review board from Yildirim Beyazit University (2019-16).

2.2. EEG parameter settings

EEG data was obtained from resting state with 19 to 64 channels acquired with 500 Hz sampling rate via Siemens Somatom. In the experimental phase, the analysis frequency was determined as 128 Hz and 19 channels were selected via 10-20 sculp distribution system (FP1, FP2, F3, F4, F7, F8, Fz, T7, T8, C3, Cz, P3, P4, P7, P8, Pz, T8, O1 and O2 channels).

Indeed, to obtain and use Spectrogram phase images, these EEG data were converted from time domain to frequency domain via Fast Fourier Transform according to these parameters given as follows; epoch = 2.5 seconds, sample rate = 128 samples/s, frequency = (0,5 to 50 Hz). According to the transformation, pre- processing and artifact elimination processes were clearly achieved.

2.3. Statistical analysis

In the statistical analysis phase, to test the difference of variables between subjects and HC group, t-tests were performed, respectively. Indeed, the demographic characteristics of subjects are clearly given below in Table 1.

Table 1. Detailed demographical characteristics of Mood disorders subjects

Specific group	Age	Sex
	Mean (Std. Dev.)	Proportions
Healthy (n=100)	27,72 (4.59)	Male: 50 / Female: 50
Mood disorders (n=200)	31.97 (13.60)	Male: 50 / Female: 50
Depressive disorder (n=100)	33.26 (14.23)	Male: 50 / Female: 50
Bipolar disorder (n=100)	30.02 (11.58)	Male: 50 / Female: 50

2.4. Classification of mood disorders

For used EEGs, the Spectrogram version of the signals were chosen and used via using Fast Fourier Transform (FFT) (Khan et. al., 2022). Then, these images which were consisted from different frequency distribution were fed into customized CNN and VGG16 Deep learning models. All specific details were given below. Subsequently, the EEG Spectrogram data were processed with Data Augmentation part.

2.4.1. Data augmentation

For data augmentation, Keras Image processing library was used with ImageDataGenerator (Boudouh et. al., 2022). This tool is generally gives access to users for rotation, width and height customization and flipping options. In this study, the parameters of the augmentation process of images were given in Table 2.

Table 2. Information about collected dataset in the study

Dataset	Total Sample
Depressive disorder Spectrograms	100
Bipolar disorder Spectrograms	100
Healthy subjects Spectrograms	100
Depressive disorder augmented	550
Bipolar disorder augmented	550
Normal augmented	500
Total samples	1900

Indeed, data augmentation methods used in this study were clearly given below, respectively.

- Width shift value: Up to 2%;
- Rotation range value: Randomly 0 to -40 degrees;
- Zoom range value: 2%;
- Height shift value: Up to 2%;
- Fill mode: Reflective;
- Horizontal flip: True;
- Vertical flip: True;

2.4.2. CNN model design

Generally, Fig. 1 illustrates the whole architecture of the whole modified model given in this study. Mainly, the classification architecture was consisted from totally 14 levels.

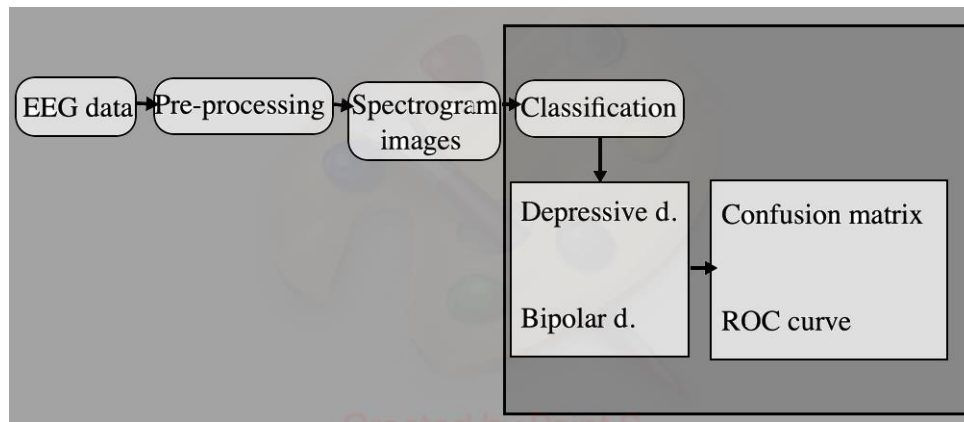


Figure 1. Classification procedure of Mood disorders and Healthy EEG signals (Spectrogram images) and validating the models

In Table 3, the detailed information about the structure of CNN layers was given. First, 124x124x3 image dataset were fed into this deep learning model as inputs. Then, the augmented EEG data were converted into the array version using a custom folder layer and then this was fed into the convolution layer. The main purpose for choosing this layer was so that the image set could be arranged and then fed into the 2-dimensional convolutional layer (Li et. al., 2020). Moreover, the first 2-dimensional convolutional layer contains ten filters of size 3x3.

Table 3. Classification layers of modified CNN model

Number	Layer information	Activation values	Weight values
1	Input layer	124x124x3	-
2	Folding layer	124x124x1	-
3	2D convolution layer	124x124x6	3x3x3x10
4	Batch normalization layer	124x124x6	-
5	Max. pooling layer	62x62x6	-
6	2D convolution layer	62x62x12	3x3x6x20
7	Batch norm. layer	62x62x12	-
8	Max. pooling layer	31x31x12	-
9	Unfolding layer	31x31x12	-
10	Flatten layer	-	-
11	Fully connected layer	2	2x300
12	Softmax layer	2	-
13	Classification	-	-

The convolution layer with using Eq. (1) was calculated and the size of the output value was obtained as 124x124x6. Equation (1) gives information about the process for the convolution layer. Then, when padding and stride progresses were applied to the data, the output value was calculated and in Eq. (1) K and L are the input data size, FH is the filter height value and FW is the filter weight value, respectively. S and P are the stride and padding parts, respectively. Also, OK is output height and OL is the output weight values.

$$(OK, OL) = \left(\frac{H+2P-FH}{S} + 1, \frac{W+2S-FW}{P} + 1 \right) \quad (1)$$

After this progress, the output data were connected to the batch normalization layer. After normalization step, the layer was fed into the max pooling layer. According to Eq. (2), the size of the output data (ORs, OCs) was obtained by equation given below.

$$(ORs, OCs) = \left(\frac{Height\ value}{Padding\ value}, \frac{Weight\ value}{Padding\ value} \right) \quad (2)$$

Then, the obtained output was fed into a normalization layer and a max pooling layer. The max pooling layer is consisted from 2x2 filter with a stride of 2 value, so the original data was reduced to the half of the first value. The second 2-dimensional convolution layer was consisted from 20 filters of size 3x3, so the data was re-reduced to a size of 31x31x12. Then, the normalization step was performed and the data were processed with flatten, fully connected layer and softmax layers. Then, the classification step was successfully achieved and completed.

2.4.3. VGG16 model design

For this model design, to investigate and analyze the performance metrics of DL models on the developed dataset, transfer learning model of VGG16 was applied for testing phase. In the experimental part, a modified VGG16 was developed and used. The core of the model was consisted from three main parts: a pre-trained part, an updated layer and an estimation part (Md Manjural et. al., 2021). The first part was used so that to identify the high level features and transferred to the modified layer. Figure 2 gives information about the modified VGG16 architecture. Mainly, this model was consisted from sixteen CNN based layers with varying filter sizes and stride parameter values (Gisele et. al., 2015). According to the Fig. 2, the first part was the initial input layer and in this part, 224x224 images were used only. Then, two convolutional layers were performed and this part contained a 3x3 size filter. Then, this was followed by a max pooling layer and another two convolutional layers and one max pooling layer until the modification has been achieved successfully. Finally, the modified layer flattened the whole model architecture, followed by the three dense and one dropout layer. Indeed, the used batch size, total number of epochs and learning rate parameters were given below in detail.

Batch size = [5, 10, 15, 20];
 Learning rate = [0.1, 0.01, 0.001];
 Number of epochs = [35, 40, 45, 50];

With using the grid search method the parameters given above were optimized and identified optimally as given below.

Batch size = 15;
 Learning rate = 0.01;
 Number of epochs = 40;

Moreover, in this part, an adaptive momentum estimation was performed to obtain better results and optimize the model loss (Kim et al., 2015). One of the pros of this technique is mainly obtaining higher successful results in binary classifications.

2.5. Details of experiment setup

In the experimental part, the study was conducted using a common Windows based laptop. (Windows 10, 16 GB RAM and Intel). The whole experiment was performed one time and final result was given optimally in the final part. The study included that the dataset contained 100 Depressive, 100 Bipolar mood disorders and 550 augmented depressive and 550 augmented bipolar disorders in detail. Moreover, we designed 80% of the sample data to train and 20% of the data to test the whole models.

2.6. Performance metrics

After the experimental part, the overall performance metrics have been calculated. For the first deep learning model (CNN), due to the limited samples, the overall statistical results were obtained with %95 confidential value. Again, for the second model (VGG16), the overall statistical results were obtained with 95% confidential interval value. Indeed, the designated statistical metric calculations were given below.

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{True positive} + \text{True negative}}{\text{True positive} + \text{True negative} + \text{False positive} + \text{False negative}} \tag{1}$$

$$\text{Sensitivity} = \frac{\text{True positive}}{\text{True positive} + \text{False negative}} \tag{2}$$

$$\text{Specificity} = \frac{\text{True negative}}{\text{True negative} + \text{False positive}} \tag{3}$$

$$\text{Precision} = \frac{\text{True positive}}{\text{True positive} + \text{False positive}} \tag{4}$$

$$\text{Recall} = \frac{\text{True positive}}{\text{True negative} + \text{False negative}} \tag{5}$$

$$\text{F1 score} = 2 \times [(\text{Precision} \times \text{Recall}) / (\text{Precision} + \text{Recall})] \tag{6}$$

3. Results and Discussion

After the experimental part, in this study, Table 4 and Figure 2 gave information about the results of the classification models' performance metrics using a confusion matrix.

Table 4. Proposed models' performance metrics on the dataset used in this study with 95% confidence level

CNN					
Metrics	Accuracy	Sensitivity	Specificity	Precision	F1 score
Train set	0.88±0.018	0.873±0.017	0.88±0.018	0.88±0.018	0.88±0.018
Test set	0.74±0.080	0.99±0.0080	0.66±0.012	0.65±0.072	0.74±0.080

VGG16					
Metrics	Accuracy	Sensitivity	Specificity	Precision	F1 score
Train set	0.90±0.080	0.85±0.010	0.88±0.010	0.88±0.060	0.88±0.060
Test set	0.80±0.022	0.65±0.025	0.76±0.023	0.76±0.022	0.76±0.022

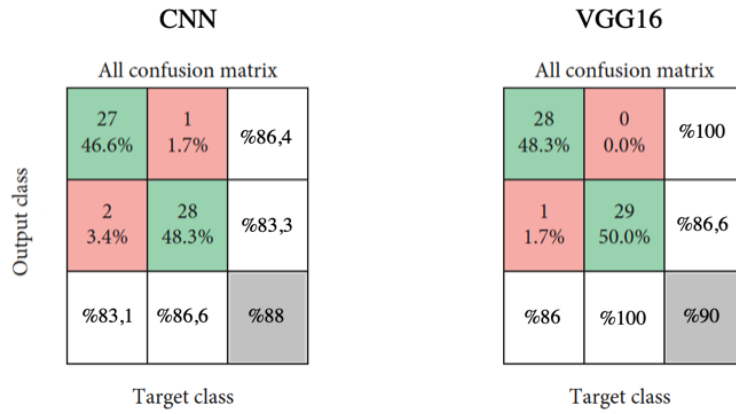


Figure 2. Classification performance evaluation of DL models using a confusion matrix

Figure 2 given above indicates the classification performance according to the EEG signals’ Spectrograms. According to these signals, in the time domain, the lowest signal has 220 epochs due to the validation curve. Indeed, Fig. 3 shows the ROC curve metrics according to the epochs and images for the time domain. Generally, the ROC curve is an evaluation method for performance metric applicable to an binary system that shows how the performance of classification model changes. Moreover, with using ROC curves, according to the Area Under of Curve (AUC), when this value range falls approximately between 0.92 and 1, the excellent classification has achieved. Also, the AUC of ROC curve was 87,88% for CNN and 90,42% for VGG16. According to the obtained performance metrics, it was obtained that the detailed proposed models in this study gives 10% improvement.

When the ROC curves were considered, if the data used in this study was unbalanced, the shape of the curve could be skewed to one another side and the whole classification performance could not be obtained successfully. Precision and recall values could be identified the detailed performance evaluation metrics. The detailed ROC curves were given in Fig. 3 according to the True Positive-False Positive rates and Precision-Recall axes.

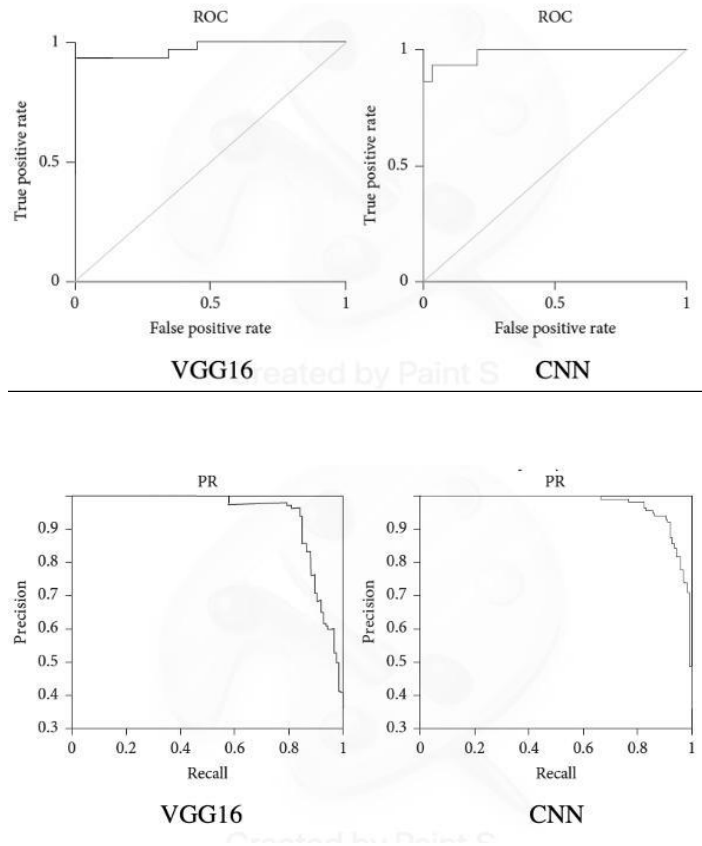


Figure 3. Evaluation of the classification performance of DL models via ROC curves

According to Fig. 3, two different graphs were given as ROC curves. The first one was the performance evaluation according to the True Positive-False Positive rates and the second one was the performance evaluation according to the Precision-Recall axes. Therefore, compared to the other studies in the literature, the average precision obtained and improved by 9-10% using the models in this study. In addition, the precision value of the second model was 3.4% was higher than that of the first model in our models.

In previous studies using related models with EEG signals, the epochs were adapted to the value of 10, the batch size was also 65. As a result, the first and the second models' performance values were obtained as 88% and 90%, respectively. However, the models structures were susceptible to overfitting, the whole accuracies were achieved after approximately 15 epochs could eliminate this problem.

In this study, to improve the performance values of mood disorder classification and prevent overfitting, optimized models were developed by data using spectrograms and adding specific layers to the DL models. The performance of the classifiers were evaluated using two different confusion matrixes and ROC curves. According to the results, totally, 88% accuracy was obtained for CNN and 90% accuracy was obtained for VGG16 models. Indeed, the proposed classification models achieved the successful estimation performance when the number of epochs was 220 for the first model and 215 for the second DL model. Also, these models' performance values were obtained using ROC and PR curves. It was confirmed that, ultimately, 10% improvements were obtained compared to the other studies in the literature.

4. Conclusion

In this study, we proposed two different improved DL models based on CNN architecture in accurately classify Mood disorders such as Depressive and Bipolar disorders. To prevent the overfitting and improve the classifiers' accuracy values, EEG signals were compared by Spectrogram version and the signals were classified separately in the time domain by two DL models. Indeed, %88 accuracy value was obtained from the first proposed ensemble model and 90% accuracy value was obtained from the second proposed ensemble model. These results were given detailed information about the 10% improvement compared to the other some related studies in the literature (Soroush et al., 2018; Zeng et al., 2019; Rafiei et al., 2022). In the future, we will improve the pre-process method such as adding different noise and artifact removal methods, and to improve the whole accuracy values of the models detailed Fourier transform may be chosen and developed. The mood disorders classifier proposed in this study can be explained as a helpful system in mental health diagnosing and mental health management via a fast and an accurate classifier to discriminate the disorder types by doctors and clinicians. Indeed, it is also expected to manage the decrement of various diseases such as depression and other specific diseases etc.

References

- Acharya, UR, Oh, SL, Hagiwara, Y, Tan, JH, Adeli, H, & Subha, DP, (2018), Automated EEG- based screening of depression using deep convolutional neural network, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 161, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2018.04.012>
- Aristizabal, A, Fernando, D, Denman, T, Robinson, S, Sridharan, JE, Johnston, S, Fookes, C., (2021), Identification of children at risk of schizophrenia via deep learning and EEG responses, *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 25(1), 69–76. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2020.2984238>
- B˘alan, O, Moise, G, Moldoveanu, A, Leordeanu, M, & Moldoveanu, F, (2019), Fear level classification based on emotional dimensions and machine learning techniques, *Sensors (Basel, Switzerland)*, 19(7). <https://doi.org/10.3390/s19071738>
- B˘alan, O, Moise, G, Moldoveanu, A, Leordeanu, M, & Moldoveanu, F, (2020), An investigation of various machine and deep learning techniques applied in automatic fear level detection and acrophobia virtual therapy, *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20 (2). <https://doi.org/10.3390/s20020496>
- Bishop, CM, (2007), *Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics)* (Springer-Verlag, Berlin).
- Boudouh, SS, and Bouakkaz, M, (2022), Breast Cancer: Using Deep Transfer Learning Techniques AlexNet Convolutional Neural Network For Breast Tumor Detection in Mammography Images, *2022 7th International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (ISPA)*, pp. 1-7, doi: 10.1109/ISPA54004.2022.9786351.
- Dubreuil-Vall, L, Ruffini, G, & Camprodon, JA, (2020), Deep learning convolutional neural networks discriminate adult ADHD from healthy individuals on the basis of event-related spectral EEG, *Frontiers in Neuroscience*, 14, 251. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00251>
- Garcia, CI, Grasso, F, Luchetta, A, Piccirilli, MC, Paolucci, L, and Talluri, G, (2020), A comparison of power quality disturbance detection and classification methods using CNN, LSTM and CNN-LSTM, *Applied Sciences*, vol. 10, no. 19, pp. 6755–6757.

- Giannakakis, G, Grigoriadis, D, Giannakaki, K, Simantiraki, O, Roniotis, A, and Tsiknakis, M, (2019), Review on psychological stress detection using biosignals, *IEEE Transactions on Affective Computing*, vol. 2019, Article ID 2927337, 1 page.
- Gisele, H, Barboni, M and Joaquim, CF (2015), Computer-aided diagnosis system based on fuzzy logic for breast cancer categorization, *Computers in biology and medicine*, 64:334–346.
- Khan, MS, Salsabil, N, Alam, MGR, Dewan, MAA, Uddin, MZ, (2022), CNN-XGBoost fusion based affective state recognition using EEG spectrogram image analysis. *Sci Rep* 12, 14122. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18257-x>
- Kim, D, Ramani S, and Fessler, JA, (2015), Combining Ordered Subsets and Momentum for Accelerated X-Ray CT Image Reconstruction, in *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 34, no. 1, pp. 167-178, doi: 10.1109/TMI.2014.2350962.
- Kuang, D, & He, L, (2014), Classification on ADHD with deep learning. In *Proc. Int. Conference on Cloud Computing and Big Data* 27–32 (Wuhan, China).
- Kuang, D, Guo, X, An, X, Zhao, Y, & He, L, (2014), Discrimination of ADHD based on fMRI data with deep belief network. In *Proc. Int. Conference on Intelligent Computing* 225–232 (Taiyuan, China).
- Kumar, S, (2021), StressNet: detecting stress in thermal videos, in *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision*, pp. 999–1009, Waikola, HI, USA.
- Li, X, La, R, Wang, Y, Hu, B, & Zhang, X, (2020), A deep learning approach for mild depression recognition based on functional connectivity using electroencephalography, *Frontiers in Neuroscience*, 14. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00192>
- Md Manjurul, A, Md Tanvir, A, Farzana, AS, Shuva, P, Ananna, C, Shahana, AL, Md Shafwat Yazdan, M, Akhlaqur, R, Zahed, S, and Huebner, P, (2021), Detecting sars-cov-2 from chest x-ray using artificial intelligence, *IEEE Access*, 9:35501–35513.
- Miotto, R, Wang, F, Wang, , Jiang, X & Dudley, JT, (2017), Deep learning for healthcare: review, opportunities and challenges, *Brief. Bioinformatics* 19, 1236–1246.
- Mumtaz, W, & Qayyum, A, (2019), A deep learning framework for automatic diagnosis of unipolar depression, *International Journal of Medical Informatics*, 132, Article 103983. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2019.103983>
- Murphy, KP, (2012), *Machine Learning: A Probabilistic Perspective* (MIT Press, Cambridge).
- Najafabadi, MM, Villanustre, F, Khoshgoftaar, TM, Seliya, N, Wald, R, & Muharemagic, E, (2015), Deep learning applications and challenges in big data analytics. *Journal of Big Data*, 2(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s40537-014-0007-7>
- Oh, SL, Vicnesh, J, Ciaccio, EJ, Yuvaraj, R, & Acharya, UR, (2019), Deep convolutional neural network model for automated diagnosis of schizophrenia using EEG signals, *Applied Sciences*, 9(14), 2870. <https://doi.org/10.3390/app9142870>
- Rafiei, A, Zahedifar, R, Sitaula, C, Marzbanrad, F, (2022), Automated Detection of Major Depressive Disorder With EEG Signals: A Time Series Classification Using Deep Learning, in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 73804-73817, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3190502.
- Saeed, SMU, Anwar, SM, and Majid, M, (2015), Psychological stress measurement using low cost single channel EEG headset, in *Proceedings of the 2015 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, pp. 581–585, IEEE, Abu Dhabi, UAE.
- Saeed, SMU, Anwar, SM, Khalid, H, Majid, M, and Bagci, U, (2020), EEG based classification of long-term stress using psychological labeling, *Sensors*, vol. 7, pp. 886-887.
- Schnack, HG, Nieuwenhuis, M, van Haren, NE, Abramovic, L, Scheewe, TW, Brouwer, RM, Pol, HEH, Kahn, RS, (2014), Can structural MRI aid in clinical classification? A machine learning study in two independent samples of patients with schizophrenia, bipolar disorder and healthy subjects, *Neuroimage* 84, 299–306 (2014).
- Shafiei, SB, Zaeem, L, Ahmed, SE, Ahmed, AH, and Khurshid, AG, (2020), Identifying mental health status using deep neural network trained by visual metrics, *Translational Psychiatry*, vol. 10, pp. 1–8.
- Soroush, MZ, Maghooli, K, Setarehdan, SK, Nasrabadi, AM, (2018), Emotion Classification through Nonlinear EEG Analysis Using Machine Learning Methods, *International Clinical Neuroscience*, 5(4): 135-149.

Widge, AS, Bilge, MT, Montana, R, Chang, W, Rodriguez, CI, Deckersbach, T, Nemeroff, CB, (2019), Electroencephalographic biomarkers for treatment response prediction in major depressive illness: A meta-analysis, *The American Journal of Psychiatry*, 176(1), 44–56. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.2018.17121358>

Xie, Y, Yang, B, Lu, X, Zheng, M, Fan, C, Bi, X, Li, Y, (2020), Anxiety and depression diagnosis method based on brain networks and convolutional neural networks, *Annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society. IEEE engineering in medicine and biology society, Annual international conference, 2020, 1503–1506.* <https://doi.org/10.1109/EMBC44109.2020.9176471>

Zeng, H, Wu, Z, Zhang, J, Yang, C, Zhang, H, Dai, G, Kong, W, (2019). EEG Emotion Classification Using an Improved SincNet-Based Deep Learning Model, *Brain Sciences*, 9(11):326. <https://doi.org/10.3390/brainsci9110326>

Zhang, X, Li, J, Hou, K, Hu, B, Shen, J, Pan, J, & Hu, B, (2020), EEG-based depression detection using convolutional neural network with demographic attention mechanism, *2020 42nd Annual international conference of the IEEE engineering in medicine biology society (EMBC)*, 128–133. <https://doi.org/10.1109/EMBC44109.2020.9175956>

Zhang, H, Silva, FHS, Ohata, EF, Medeiros, AG, & Rebouças Filho, PP, (2020), Bi-dimensional approach based on transfer learning for alcoholism pre-disposition classification via EEG signals, *Frontiers in Human Neuroscience*, 14, 365. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00365>



Comparison of IoT Protocols with OSI and TCP/IP Architecture

Füsun Yavuzer Aslan¹ , Bora Aslan^{1*} 

¹ Department of Software Engineering, Kırklareli University Kırklareli, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 25/01/2022

Kabul / Accepted: 14/11/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Abstract

ARPANET, which was created in 1969 with the idea of having only a few systems connected at the beginning, has today become a vast separate world where billions of computers and systems come together. Internet speed, capacity and traffic have grown exponentially. Today, the mobile devices that almost everyone carries in their pockets have had superior capabilities than the supercomputers of 20 years ago. Now, human beings can make almost all devices smart thanks to microsensors and smart chips. With smart phones, cars and heating systems have become easily controllable and programmable. Every year, new devices in different forms with increasing talent and intelligence are introduced and adopted. An increasing number of M2M applications, such as smart meters, healthcare monitoring, transportation and packaging, or asset tracking, make a significant contribution to the growth of devices and connections.

In this research, which takes into account newly developed technologies, interoperability and compliance with standards are examined. IoT architectures are examined and the currently accepted five-layer architecture method is compared with OSI and TCP/IP architecture. In addition, IoT protocols are mapped with OSI and TCP/IP architecture. Furthermore, technologies used in the context of the IoT are combined with OSI and TCP/IP architecture, to provide an integrated view.

Key Words

“Architecture, IoT, Network, OSI, Protocols, TCP/IP”

1. Introduction

With the development of sensor and communication technologies in the last decade, applications built within the framework of IoT (Internet of Things) have begun to take place in our lives discreetly and slowly. The number of objects classified as devices and connections is growing worldwide faster than the world's population. Smart meters, healthcare monitoring, shipping and packing, and asset tracking are just a few of the M2M (machine-to-machine) applications that contribute to the expansion of devices and connectivity. IoT is a network of devices that share information and communicate through various communication protocols. Many sources state that IoT is a system that uses information and communication technologies to facilitate more effective and interactive use of vital infrastructure and services such as education, health, security and transportation. Current applications that we can increase the possibilities in all areas of our lives with the Internet of Things include a wide industrial area, starting from smart homes, cities, factories, and applications in different health and agriculture fields (Ercan & Kutay, 2016).

IoT applications are rapidly moving towards becoming indispensable objects of our lives. Figure 1 shows the distribution of 1414 IoT projects launched on the market in 2020 per sector. Looking at the graph, we can see that most new products related to industrial manufacturing, transportation, energy, retail, and urban planning applications (Scully, 2020).

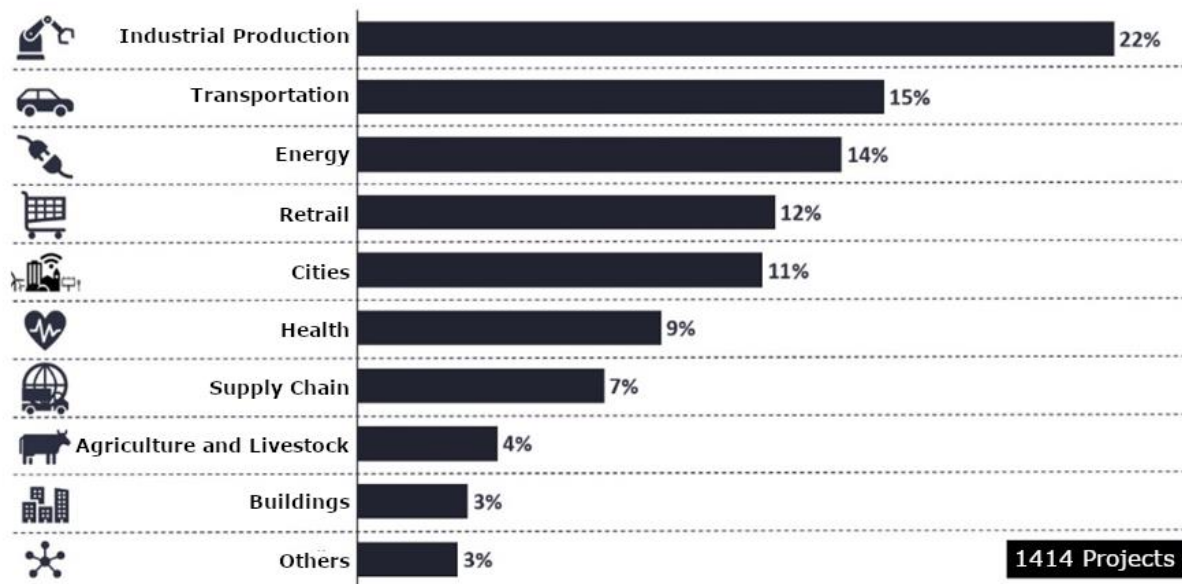


Figure 1. Sectoral distribution of IoT projects in 2020

The manufacturing industry is undergoing a significant transformation led by IoT applications. Satya Nadella, a Microsoft executive, suggested that IoT applications transform manufacturing rules, accelerate the development of digital factories, and improve operational performance (Forbes, 2018). In line with available data, autonomous vehicles equipped with IoT technology dominate the transportation sector. Furthermore, battery monitoring, tire pressure tracking, driver surveillance, and fleet management are widely used applications in this field. According to Martin Lundstedt, a Volvo executive, solutions connected with IoT applications improve safety for drivers, operators, and other users while lowering carbon dioxide emissions worldwide (TU Automotive, 2019). Energy-related projects focused on smart energy distribution, grid optimization, remote asset management and monitoring, maintenance forecasts, and increasing consumer transparency.

IoT solutions applied in the retail sector include in-store digital signage, customer tracking and feedback, product tracking and inventory management, smart vending machines as well as smart shelves, and lastly, self-checkout markets. Smart cities are one of the most promising areas for IoT applications, as they immediately impact the lives of millions of people. Smart parking, traffic management, smart garbage collection systems, smart lighting, public safety measures, and air pollution control systems are examples of applications in this area. The IMD (International Institute for Management Development) Smart City Index 2019 report includes smart cities, focusing on people's perceptions of balancing the economic and technological aspects of their cities with humanitarian elements. As stated in the report, the top 10 cities are Singapore, Zurich, Oslo, Geneva, Copenhagen, Auckland, Taipei, Helsinki, Bilbao and Dusseldorf, respectively (Bris, 2019). IoT applications in healthcare have started to attract attention recently. Various applications, such as remote health monitoring, digital diagnostics, and robotic assistance are becoming increasingly popular in this field. In addition, end-user products classified as health products are growing in several fields, such as sports and personal care. Overall, these products are aimed at improving the quality of life. One of the new trends in healthcare is monitoring the pandemic through IoT applications during the COVID-19 era (World Medical Innovation Forum, 2020). Logistics providers are increasingly utilizing interconnected digital solutions to overcome complexity while performing supply chain procedures. Since the establishment of the first IoT applications as

product tracking systems via RFID systems, the supply chain and logistics sectors have been enriched in various IoT applications. Asset tracking, cold chain tracking, status monitoring, inventory and warehouse management, and autonomous vehicles are projects in this field. Creating smart agriculture technology is very important since humanity will need more food as the world population increases. IoT applications can help farmers make decisions that result in higher yields and quality and more cost-effective farming by reducing the use of fertilizers and pesticides (I-CIO, 2018). Precision agriculture, livestock tracking, irrigation management, smart mapping, smart spraying systems, and the use of unmanned aerial vehicles are examples of smart agriculture initiatives. Smart buildings and home automation are two examples of long-standing and widely used IoT applications. Smart lighting, elevator monitoring, smart smoke and fire extinguishers, facility automation for building security, and building monitoring systems are examples of common building or residential projects. Big companies like Google, Amazon, and Microsoft offer smart home control systems that are among the most popular products on the market.

Regardless of the success and rise it has achieved in recent years, as in every concept, the concept of IoT also contains some fundamental and conceptual problems in terms of performance and management (Erdal & Ergüzen, 2020). IoT applications are creating a whole slew of new issues in such a vast and unpredictable ecosystem. The issues that the emerging computing world is facing are listed and briefly explained below (Kim & Solomon, 2016).

- *Security issues:* The more people, businesses, and countries become more dependent on IoT applications, more hackers and malicious actors aim to access and steal information.
- *Privacy issues:* The majority of IoT applications collect and process data to improve people's lives. Privacy issues arise as most of this data can be classified as personal information.
- *Interoperability and standards problems:* While the Internet uses TCP/IP infrastructure and a server/client architecture, various non-standard protocols have been established in IoT applications for low-processing-capacity objects to improve their communication and efficiency of their data transfers. The diversity of standards leads to interoperability problems.
- *Legal issues:* Legal regulations have lately surfaced in order to address issues with data ownership acquired by IoT applications. National studies of countries on this subject may be insufficient for global IoT applications.
- *Economic development problems:* IoT applications and accompanying technologies are drastically changing the economy. Dark factories, unmanned transportation, and means of transportation are believed to pose serious development challenges. These technologies reduce the need for labor, in other words, increase unemployment or pave the way for new business sectors.

2. IOT Architectures

Reviewing the literature, there is no widely validated architecture for IoT, such as TCP/IP or the OSI reference model. Different researchers have proposed different architectural models (Sethi & Sarangi, 2017). Accordingly, the proposed architectural models are given in Figure 2. We can see the perception and network layer at the lowest layer of all proposed approaches, and the application layer at the upper layers. These layers have similar general characteristics and functions. A support layer has been proposed between the application and the network layer in a four-layer architecture. In the five-layer architecture, a middle layer has been added between the network and application layers, and the business layer has been added as the top layer.

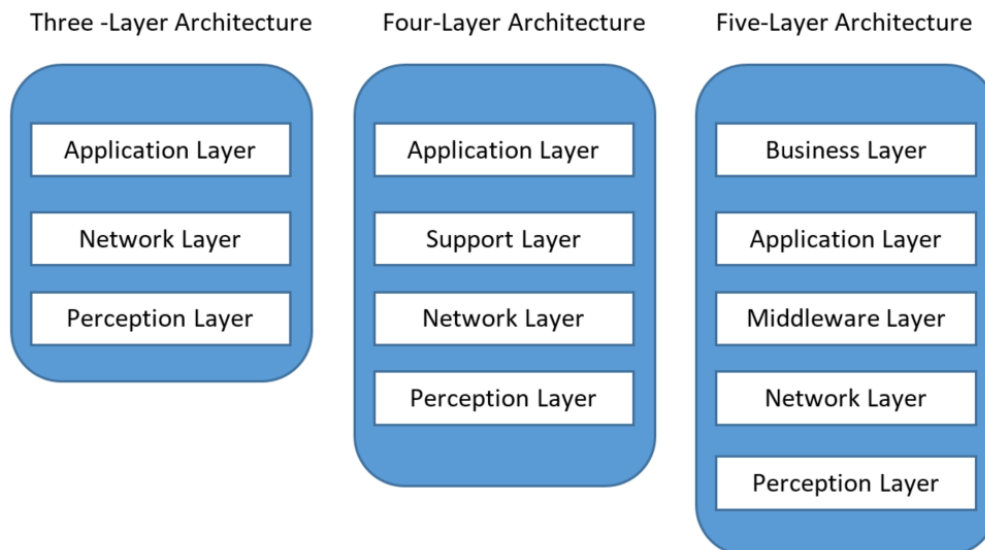


Figure 2. IoT architectures in the literature

Three-Layer Architecture is a simple model from which certain core IoT solutions can be developed. It has perception, network and application layers to collect, transmit and process data. However, in some sectors, such as healthcare, this simplistic approach cannot achieve the required level of reliability and safety. This architecture was discovered early in the IoT research process. It has three layers: perception, network and application (Wu et al., 2010). The perception layer is physical and contains sensors that detect and collect data about the surroundings. For this reason, it's also known as the device layer in some sources. Its primary purpose is to identify the object and collect data. Barcode labels, data matrix codes, and associated readers, RFID tags and reader/writers, camera, GPS, sensors, terminals, and sensor networks are all part of the Perception Layer. Data gathered by sensor type and application can be object information, location details, humidity, temperature, motion, acceleration, vibration, direction, changes in the air, etc. After that, the data is sent to the network layer for further processing. The perception layer works basically the same for the three models given in Figure 2. The network layer's primary task is to transfer and process information collected from the perception layer. For this reason, it is also called the transmission layer. Information transfer occurs at this layer using infrastructure including the internet, mobile communication networks, satellite networks, and wireless networks. Another responsibility of this layer is to interconnect other things, network devices and servers. While transferring data, it is possible to work on data too. The transmission medium can be wired or wireless. Besides, depending on the sensor structures, 4G, UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), Wi-Fi, Bluetooth, Infrared, ZigBee etc., communication mediums can be used. The network layer divides the message into packets and uses IPv4 and IPv6 addressing techniques to route the packets from source to destination. The network layer fundamentally functions fully in the three models given in Figure 2. The application layer is responsible for providing IoT application-specific services. Different protocols may be required for each application. As a result, proprietary and non-standard protocols on the application layer are application-specific.

Layers in the four-layer architecture approach are perception, network, support, and application. Compared to the three-layer architecture, a support layer has been added between the network and application layer to enable cloud computing technologies. Also, this layer aims to process data and provide partial security. The perception layer consists of physical objects as in a three-layer architecture and functions for the same purposes. The network layer's main job is to transmit and process information collected from the perception layer; therefore, its role is identical to that of the three-layer architecture. The support layer is being used to ensure that data is transmitted between the application and the network layer more safely and dependably. Objects are typically supported at this stage by cloud and edge computing technologies. The data is processed and sent to the lower or upper layer. Devices of IoT applications utilize UDP throughout the communication. UDP is a faster but unreliable protocol than TCP. The support layer usually has a DTLS-based security mechanism. The application layer is responsible for providing IoT application-specific services. Different protocols may be required for each application. As a result, proprietary and non-standard protocols on the application layer are application-specific.

Layers in the five-layer architecture approach are perception, network, middleware, application and business. In this approach, the data processing workload of the system has been shifted from the application layer to the middleware layer, which is added between the network and application layers. Data can be processed before or after transmission through the network in this way. The business layer has been added to the top layer of the five-layer architecture. Operations such as IoT application scalability, interoperability, data flow control, and data analysis for further interpretation can all be performed using this layer. The big data generated by IoT devices can be addressed in this way. The role and content of the perception and network layers are the same in this architectural approach as they are in the three and four-layer architecture models. The middleware layer is also known as the intermediate layer. Different types of services can be provided by devices utilized in IoT applications. Devices may only interact and communicate with other devices that provide the same service type in some instances. Large volumes of data from the transport layer can be stored or processed using middleware layer technology. In this layer, one can also administer and provide a variety of services. This layer can use various technologies, including databases, cloud computing, and big data processing modules. The purpose of this layer is to send meaningful data to higher layers and organize data from the upper layers so it can be sent to lower layers. The application layer is in charge of offering IoT application-specific services. Different protocols may be required for each application. As a consequence, custom and non-standard protocols on the application layer work for the application specifically. The business layer is in charge of managing the IoT system in general. Different business models, graphs, flow charts, and specifications for direct application management are created by planning based on data obtained from the lower layers. Sound business models, as well as protocols and technologies, are required for the real success of IoT technology. Data and results may be analyzed, and future actions and business plans can be defined, thanks to the systems that will be developed in this layer.

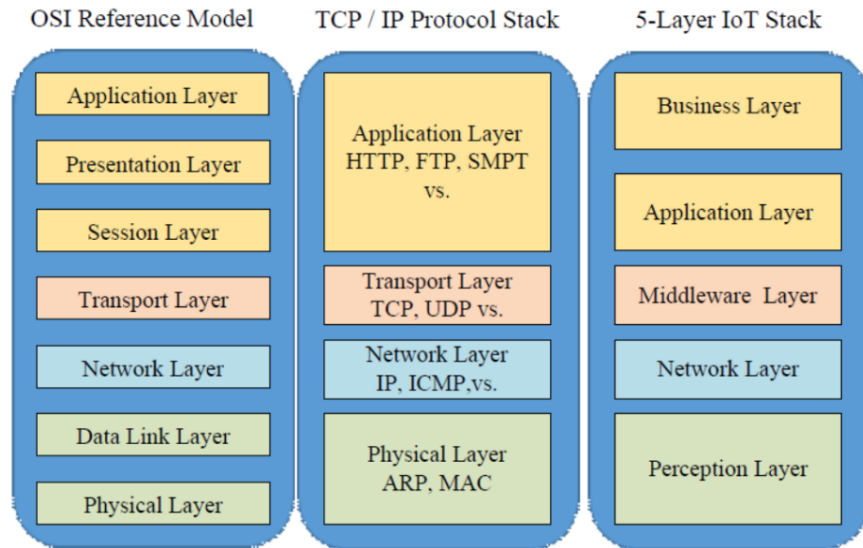


Figure 3. Comparison of OSI, TCP/IP and five-layer architecture

The OSI reference model was first established in the late 1970s and has been the standard since 1984. TCP/IP architecture was created in 1973 and declared as the ARPANET standard protocol in 1983. These two architectures are still used as the internet's primary protocol today. The quest for architecture in this domain persists, with both the growth of IoT applications and the development in the number of devices connected to the internet or network, yet, no standard has been established. The five-layer architecture and the rise of the IoT ecosystem have been acknowledged as the generated data being classified as big data. In Figure 3, a comparison of the OSI model, TCP/IP architecture and five-layer architecture is given. Hereunder, the following expressions can be stated:

- The physical layer in TCP/IP corresponds to the perception layer in IoT architecture, which performs similar functions.
- Considering general characteristics, the network layer in all models conducts similar tasks,
- Although the transport layer corresponds to the middleware layer, there are some differences. The essential distinction is that you can process and transmit data in IoT applications, particularly at the beginning of data transfer,
- The DTLS and TLS protocols provide security for TCP and UDP packets in a five-layer IoT architecture, exactly as they do for TCP/IP.
- In addition to the application layer, the business layer has been added to the top layer of TCP/IP.

3. Protocols in IOT Applications

In IoT applications, many technologies such as IPv6, 6LowPAN, ZigBee, Bluetooth, Wi-Fi, LoRaWAN, Z-Wave, NFC, and Sigfox are used for devices to communicate with each other. Most of the technologies described are found in IoT architectures' network layer. In fact, in IoT applications, some technologies that are immediately related to computer networks naturally attract attention. However, these technologies can fall short of IoT components. In the next five years, this scenario will lead to the introduction and standardization of many protocols and technologies ideal for IoT applications. The protocols utilized in IoT applications are explained in this section of the study to give a broad perspective, and then OSI and TCP are compared.

3.1. IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 is known as a standard protocol built for LR-WPAN (Low-Rate Wireless Personal Area Network). LR-WPAN is a form of network used in IoT applications to transfer data between devices. The capacity to function in short distance communication at low power and data rates wirelessly is the most crucial attribute that differentiates it from other LAN and WAN technologies (Chen et al., 2010). IEEE 802.15.4 offers a low-cost communication network for low-power, low-speed devices, and also provides simple and easy setup, accurate data transmission, relatively low cost, and long battery life. In the 2.4 GHz ISM band, the IEEE 802.15.4 protocol permits transmission at a speed of 250 kbps across 16 channels.

Most of the IoT protocols discussed in this section of the article employ IEEE 802.15.4 as their physical layer. IEEE 802.15.4 has a 2-layer structure as physical and data link layers. The physical (PHY) layer is responsible for signal transmission to the MAC sublayer. This layer performs bitwise actions, including wireless signal channel changes, bit modulation, and packet synchronization. Connecting and disconnecting devices from the network, overseeing access control to shared channels, and transferring data to the upper layer and lower layer properly are among the main responsibilities of the MAC sublayer. The MAC sublayer and the LLC sublayer are combined together and called the data link layer. LLC is common to all IEEE 802 standards. LLC, on the other hand, may be overlooked when developing IEEE 802.15.4-based applications.

3.2. 6LoWPAN

6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks) is an open-source protocol not designed to send data through LR-WPAN to IPv6-enabled devices produced by IETF. Theoretically, the goal of the production is to connect small devices that have limited processing power and low energy consumption to the internet (Shelby & Bormann, 2011). A device with 6LoWPAN support can connect directly to the internet. Within the 6LoWPAN protocol, each device on the network should have an IPv6 address. It is ideal for applications that need a low-data-rate wireless internet connection. 6LoWPAN operates in a frequency range of 868 MHz to 2.4 GHz and a data-signaling rate of 250 kbps. Hence, it provides a connection range of 10 to 100 meters. Data transmission is performed over nodes using routers in an optimized manner. 6LoWPAN can be integrated with other WAN and LAN networks. 6LoWPAN is quite new in the industry. It is, therefore, particularly well-suited to systems such as home automation, street lighting tracking and management, residential lighting, smart metering, and common internet-connected device applications (Mulligan, 2007).

In a typical 6LoWPAN network, there are two types of devices, namely the router and the end device. As the name suggests, routers primarily route data to another node in the 6LoWPAN network in the shortest way possible. On the other hand, end devices send the data they gather from sensors to the router device to which they are connected when it is required. Only when there is a request, these devices switch from sleep mode to active mode. As a result, energy usage will be minimal regardless of network size.

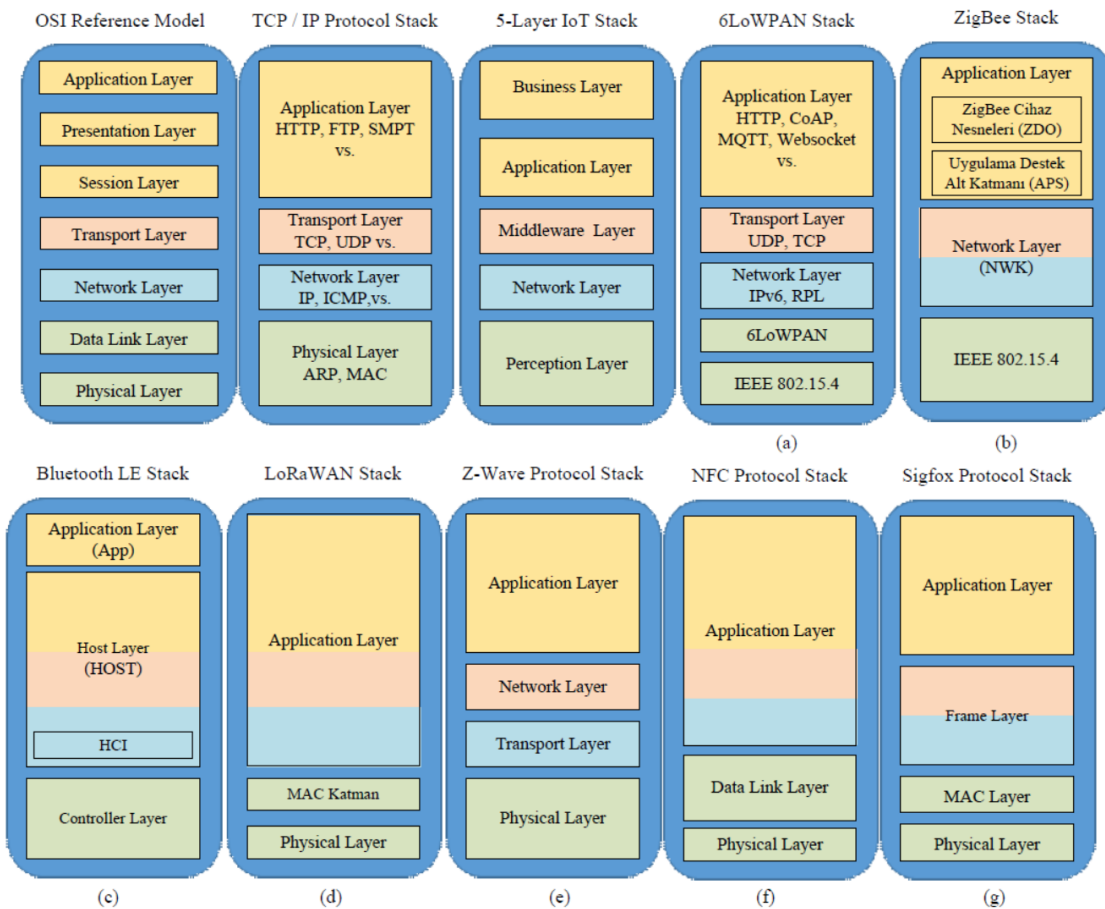


Figure 4. Comparison and mapping of OSI, TCP/IP and IoT Protocols

The layer structures of the OSI reference model, the TCP/IP protocol stack and the 6LoWPAN protocol stack are shown in Figure 4 (a). In parallel, the physical layer of the 6LoWPAN protocol stack converts data bits into wireless signals leveraging IEEE 802.15.4. By identifying and fixing problems in the physical layer during data communication, the data link layer seeks to maintain healthy communication. Protocols such as MAC, CSMA-CD (carrier-sense multiple access with collision detection) used in OSI and TCP / IP are provided by IEEE 802.15.4 for 6LoWPAN. In addition, 6LoWPAN adaptation was performed via a protocol and layer named 6LoWPAN to control devices in the network and route the data. The network and transport layers technically work with the same principle. However, the UDP protocol is generally used throughout data transmission for 6LoWPAN. Hence, the establishment of faster communication becomes possible. At the application layer, the HTTP protocol is commonly used in TCP/IP communication. Although there is an HTTP protocol for 6LoWPAN, application-level communication is commonly done using the CoAP (Constrained Application Protocol) or MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) protocols, which are best fitted to IoT devices (Yalçinkaya, 2020).

3.3. ZigBee

ZigBee is a wireless network technology that is highly interoperable and standards-based, and it is used to connect IoT applications. ZigBee, founded on the IEEE 802.15.4 standard, was developed to address the need for a low-cost wireless network solution that enables low data rates, low power consumption, security, and reliability. ZigBee has a self-optimizing network structure. It is accomplished by allowing other nodes to explore new routes across the network if a node's data transfer path fails. Due to its decentralized network structure, it is employed as a powerful wireless solution in the IoT business (Farahani, 2011).

ZigBee is specifically designed for wireless sensor networks. Any monitoring and control application that needs a wireless connection can benefit from it. It is mostly employed in smart home and building automation, home security, smart cities, logistics and asset management and tracking, and patient tracking systems.

ZigBee operates at a speed of 20 kbps at 868 MHz, 40 kbps at 915 MHz and 250 kbps at 2.4 GHz. It is best used in applications involving battery-powered devices when a low data rate, reduced cost, and long battery life are desired. Since it spends most of the time in power-saving mode, also known as sleep mode, the wireless device's total time in processes like receiving or sending data is quite limited in many ZigBee applications. That is why devices can run for several years without battery replacements.

The layer structures of The OSI reference model, the TCP/IP protocol stack and the ZigBee protocol stack are given in Figure 4 (b). Consequently, all processes at the physical layer are carried out per the IEEE 802.15.4 protocol. The ZigBee network layer (NWK) is mainly responsible for creating a new network. This layer performs the following tasks: connecting and disconnecting a network, configuring network when a new device connects to a network, assigning an address to a new device, organizing all coordinator and router operations. Therefore, we can say that this layer defines some of the network and transport layer roles in the TCP/IP cluster. The Application Layer consists of the Application Support sublayer (APS) and the ZigBee Device Objects sublayer (ZDO). It includes applications defined by the manufacturer. The APS sublayer is responsible for the discovery and binding services. Discovery is used to determine devices running on the network, while the binding is used to match two or more devices and transmit messages between these connected devices. The ZigBee Device Objects sublayer (ZDO) performs local and wireless management of the network. Up to 240 separate application objects can be defined in the application layer, each with a unique endpoint address ranging from 1 to 240.

3.4. Bluetooth

Ericsson Mobile created Bluetooth technology in 1994. Bluetooth technology was later developed by the Bluetooth Special Interest Group, which was founded in 1998. Bluetooth, which is common in many products, has been standardized with IEEE 802.15.1. Bluetooth technology was created to allow short-distance communication between mobile or fixed devices without the use of cables. Its advantages include low cost, low power consumption, and the ability to communicate in a reliably (Miller et al., 2000).

Bluetooth is a wireless technology that transmits digitized voice and data over the 2.4 GHz ISM band, which is license-free. The devices do not need to see one another directly since it operates using radio waves. Bluetooth operates between 2.400 - 2.483 GHz with a 1 MHz band.

Bluetooth devices can be dual-mode, supporting both BR/EDR (Bluetooth Basic Rate/Enhanced Data Rate) and BLE (Bluetooth Low Energy), or single-mode, supporting solely Bluetooth limited power. Due to high-energy economy of BLE, many Bluetooth devices are used in IoT applications.

The protocol stack for the single-mode BLE device is planned in three layers, as shown in Figure 4 (c). These are controller, host, and application. Each of these basic building blocks is separated into multiple sub-layers in the protocol stack, which together provide the necessary functionality.

- *Application Layer*: The application layer, like all other systems, is the top layer that includes the reasoning for everything relevant to the use purpose, the user interface, and data processing.
- *Host Layer*: It includes the layers of Generic Access Profile (GAP), Generic Attribute Profile (GATT), Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP), Attribute Protocol (ATT), Security Manager Protocol (SMP), Host Controller Interface (HCI). The host control interface (HCI) is a method for reaching the hardware functions of Bluetooth devices that are not part of the protocol stack. By obtaining information such as baseband commands, connection manager commands, hardware status logs, control logs, and incident logs, HCI firmware enables Bluetooth hardware to function effectively.
- *Controller*: It includes Host Controller Interface (HCI), Link Layer (LL), and Physical Layer (PHY). The physical layer comprises analog communication circuits that can modulate, demodulate, and transform analog signals into digital symbols. The Link Layer combines specialized hardware and software that directly creates an interface with the PHY. It is also the real-time layer of the entire protocol stack, as it is in charge of adhering to all of the rules' timing requirements. This layer specifies operations including data entry, framing access address and signaling protocol, CRC (Cyclic Redundancy Check) generation and verification, data whitening, random number creation, and AES (Advanced Encryption Standard) encryption.

3.5. LoRaWAN

LoRaWAN (Long-Range Wide Area Network) is an open-source technology that is associated with low power usage for wide area networks. The battery life of a node is critical for IoT applications in terms of the network's capacity, service quality, and security. LoRaWAN networks are structured in a star topology where gateways transmit messages between end-devices and back-end centralized network servers. It offers data signaling at speeds ranging from 0.3 to 50 kbps, depending on the environment. Communication with LoRaWAN has a range of 2 to 5 km in the city and up to 15 km outside the city. LoRaWAN can be used in a variety of applications, including smart city applications, smart agriculture, and smart factories. In order to create a full range with LoRaWAN in Amsterdam, an IoT data network has been established using 10 gateways as an example for smart cities. The city of Amsterdam is the first to implement a comprehensive LoRaWAN application (Adelantado et al., 2017).

LoRaWAN operates in an unlicensed radio spectrum. As a result, radio frequencies can be utilized in the application without paying a license fee. The system, which is similar to Wi-Fi in that it uses the 2.4 GHz and 5 GHz ISM bands worldwide, allows anyone to set up Wi-Fi routers and send or receive Wi-Fi signals without requiring a license or permission. LoRaWAN supports bands from 902 to 928 MHz in the United States, 863 to 870 MHz in the EU, and 779 to 787 MHz in China, and typically transmits on the 868 MHz band in Europe and 900 MHz in the United States.

LoRaWAN can be mapped to the second and third layers of the OSI model. LoRaWAN protocols are defined by a group named LoRa Alliance. LoRaWAN stack layers are shown in Figure 4 (d).

3.6. Z-Wave

Z-Wave is a low-power MAC protocol designed for smart home applications. It is suitable for IoT applications, small applications such as light control, energy control, and fitness trackers and provides approximately 30 meters of point-to-point communication range. The ITU developed the Z-Wave protocol, which is now endorsed by the Z-Wave Alliance, a collection of over 300 worldwide firms. Batteries power many Z-Wave devices without the need for direct electrical energy. Because Z-Wave devices are only active during data transmission, they have low energy consumption. It is known that there are more than 35 million Z-Wave products in the world (Paetz, 2018).

Z-Wave technology operates at different frequencies while below the 1 GHz band, depending on the country. In Europe, it uses the frequencies 868.4 MHz and 869.85 MHz, while in the United States; it uses the frequencies 908.4 MHz and 916 MHz. It does not interfere with technologies such as Wi-Fi broadcasting in the 2.4 GHz band because it broadcasts at these frequencies. Besides, since the broadcasts are at quite low frequencies, they lose relatively less power when passing through obstacles like walls, etc. Z-Wave protocol provides communication up to 100 kbps speed. It also can function with IPv6 and multi-channel support, which are both significant advantages.

As shown in Figure 4 (e), the Z-Wave protocol stack consists of four layers: physical layer (PHY / MAC), transport layer, network layer and application layer. The physical layer is responsible for modulation and RF channel assignment, as well as adding headers at the transmitter and then synchronizing them at the receiver using the header. At the same time, the MAC layer is responsible for HomeID and NodeID, as well as controlling the medium between nodes using the anti-collision and withdrawal algorithms. The transport layer governs frame transmission and reception, as well as retransmission, ACK packet transmission, and verification. The network layer manages packet routing, topology scanning, and routing table updates. The application layer is in charge of application-oriented tasks in received or sent packets.

3.7. NFC

NFC (Near Field Communication) allows phones, tablets, laptops, and other devices to transfer data over short distances with other NFC-enabled devices. It was developed on RFID technology. The communication range is up to 10 cm. NFC operates in the 13.56 MHz ISM band and supports different data signaling rates such as 106 KBS, 212 KBS and 424 KBS (Coskun et al., 2012). Products using the NFC protocol are utilized in many applications due to their functionality. Mobile payment, authentication and access control, data transfer between devices, and reading digital information are common uses.

NFC communication system includes a reader or a writer device and a tag. The tag is a passive device with an antenna and a small bit of memory that works through a magnetic field. Tag memory can be in several forms such as read-only, rewritable or write-once. The reader is an active device that sends radio signals to the tag for interaction. In passive communication mode, the reader passively charges the device and allows data to be read.

NFC devices support active and passive communication types. During active mode, target and initializer devices take over their power sources, and can communicate with each other via alternative signal transmission. While in the passive mode, the initiating device generates radio signals, and target device receives its power from this electromagnetic field. The target device responds to the initializer by modulating the current electromagnetic field.

Figure 4 (f) shows the mapping of P2P based NFC device stack to the OSI reference model and TCP/IP protocol stack. As seen here, the application layer, data connection layer, and physical layer make up the NFC protocol stack. The application layer determines the

data format to be exchanged between NFC devices or between the NFC device and tags. The physical layer focuses on modulation, coding, and RF-related characteristics like frequency and power, whereas the data link layer deals with different operation modes and anti-collision mechanisms.

3.8. Sigfox

Sigfox is a French company founded in 2009 that builds wireless networks to keep low power devices such as electricity meters, smartwatches and washing machines always on and emit low amounts of data. The company's trademark system is a cellular-based variant that allows remote people to communicate with the access point via UNB (Ultra Narrow Band). Sigfox has designed it to meet the IoT network requirements. It's a perfect solution for boosting the performance and efficiency of applications that will be developed as wide area networks, such as smart agriculture and smart cities, thanks to its long battery life, low device cost, low connection fee, high network capacity, and long-range (Vejlgaard et al., 2017).

The Sigfox network consists of two layers, the network equipment layer and the system support layer. Between these two layers, a standard network including GSM, Wi-Fi, or Ethernet is deployed. End devices located in the network devices layer transmit sensor data to Sigfox stations. Stations transmit data to Sigfox cloud servers using the internet. This part is called the system support layer. Users receive the processed and interpreted data after this stage.

Sigfox uses 868 MHz ISM band, and the spectrum is split into 400 channels of 100 Hz. Its frequency efficiency enables low energy consumption while offering more range. It is built on the Sigfox star topology, and a mobile operator should carry the generated traffic. Each node device has a 12-pole payload capacity and can send 140 messages per day at a data rate up to 100 bps. The Sigfox network's access points are theoretically designed to serve up to one million end devices across a range of 30-50 kilometers in rural areas and 3-10 kilometers in urban areas.

As shown in Figure 4 (g), Sigfox consists of a physical layer, MAC layer, frame layer and application layer. The physical layer determines the modulation of Sigfox transmissions. Here it adds or removes headings in this layer. It uses BPSK modulation for uplink and GFSK modulation for downlink. Based on the location where the system is deployed, the bit rate is either 100 or 600 bits per second. In Europe, power transmission reaches a maximum of 14 dBm, while in North and South America, it reaches 22 dBm. This layer also controls operating frequencies. The MAC layer adds the required fields to identify the device that will receive data and other standard parameters such as error detection codes. It prepares the packages according to the protocol's transfer and reception forms. The frame layer receives data from the application layer. It systematically transfers it to the lower layer while also adding a sequence number, as seen in the TCP/IP protocol set's transport and network layers. The application layer supports different applications in Sigfox technology. This layer defines several interfaces or protocols to facilitate transfer between WAN and servers, such as SNMP (Simple Network Management Protocol), HTTP, MQTT, and IPv6.

3.9. Comparison of the Protocols

In Table 1, the protocols are summarized according to frequency, distance and data transfer rates within the scope of the current study. The protocol should be chosen based on the type of application, the distance between objects, and the transmission power.

Table 1. Comparison of protocols

Protocol	Frequency	Distance	Data Transfer Speed
Bluetooth	2.4 GHz	50-150 m	1 Mbps
ZigBee	2.4 GHz	10-100 m	250 kbps
Z-Wave	900 MHz	30 m	9.6 / 40/100 kbps
6LoWPAN	2.4 GHz	10-100 m	250 kbps
NFC	13.56 MHz	10 cm	100-420 kbps
Sigfox	900 MHz	30-50 km in the countryside, 3-10 km city center	10-1000 bps
LoRaWAN	Unstable	2-5 km, 15 km	0,3-50 kbps

4. Conclusions

In this article, which deals with the common problems of grasping the protocols of IoT applications, the usage areas of IoT applications are principally examined per the current data. Looking at the sectoral distribution of applications developed in 2020, industrial production, transportation, energy, retail, smart cities, healthcare, supply chain, agriculture and livestock, and smart buildings were amongst the prominent applications.

In the literature, there are various architectural methods for IoT applications. A common standard similar to TCP/IP or OSI has not been adopted yet. This is because different applications are applied in different subject areas where different protocols and technologies are used. It can be said that establishment of a standard is not possible soon. In other words, as the number of M2M applications increases, a standard is needed to make data transfer between devices used in different applications more seamless. Current architectures in the literature are explored in this article. The most utilized architecture has been identified to be four-layer architecture. Nevertheless, adoption of a five-layer architecture is expected to increase, especially as core phases of IoT applications such as smart business operations, data analytics, and big data analytics become more common.

The article discusses technology and processes involved in architectural layers. There are many technologies and protocols to choose from, depending on the number of devices connected to the network, the data transfer rate, the energy, and the range. This selection should be made according to application type. Wide area networks like Sigfox and LoRaWAN should be chosen because smart farming operations require, for example, dissemination over large areas. Smart home systems can use Z-Wave or ZigBee protocols created specifically for this purpose. The Bluetooth LE technology, on the other hand, is widely employed in consumer electronics.

The IoT protocols and technologies examined through the article have been mapped to the layers of OSI and TCP/IP protocol and standards, which are globally acknowledged and presented in Figure 4. Based on this information, protocol structures that inherit relatively similar usage areas and tasks are also designed similarly. Generally, the perception layer of IoT protocols is based on IEEE 802.15.4 protocol. At the same time, network and business layers are similar to the network and transport layers observed in TCP/IP protocol. Besides, almost every application layer seen in these protocols is customized in line with the usage areas of protocols.

References

- Adelantado, F., et al. (2017), Understanding the limits of LoRaWAN. IEEE Communications magazine. 55(9): p. 34-40 DOI: <http://doi.org/doi:10.1109/MCOM.2017.1600613>
- Bris, A.C., Chan Heng, Lanvin, Bruno (2019), Smart City Index 2019, The IMD World Competitiveness Center. Available: <https://www.imd.org/research-knowledge/reports/imd-smart-city-index-2019/>
- Chen, F., et al. (2010), Simulation study of IEEE 802.15. 4 LR-WPAN for industrial applications. Wireless Communications and Mobile Computing,. 10(5): p. 609-621 DOI: <http://doi.org/doi:10.1002/wcm.736>
- Coskun, V., K. Ok, and B. Ozdenizci, (2011) Near field communication (NFC): From theory to practice. 2012: John Wiley & Sons. 256.
- Ercan, T. & Kutay, M. (2016). Endüstride Nesnelerin İnterneti (IoT) Uygulamaları . Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi , 16 (3) , 599-607 . Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid/issue/43551/532437>
- Erdal, E. & Ergüzen, A. (2020). Nesnelerin İnterneti (IoT) . International Journal of Engineering Research and Development , Elektrik Mühendisliği ve Bilgisayar Bilimleri Özel Sayısı , 24-34 . DOI: 10.29137/umagd.827676
- Farahani, S., ZigBee Wireless Networks and Transceivers. Newnes. 360 DOI: <http://doi.org/doi:10.1016/B978-0-7506-8393-7.X0001-5>
- Forbes, Microsoft Soars: How Azure, AI And IoT Are Driving Cloud Hypergrowth At \$20-Billion Scale, in Forbes. 2018. Available: <https://www.forbes.com/sites/bobevans/2018/05/03/microsoft-soars-10-factors-driving-satya-nadellas-20-billion-cloud-juggernaut/#234d406a2037>
- I-CIO, John Deere: How information-enabled farming will feed the world in I-CIO. 2018. Available: <https://www.i-cio.com/innovation/internet-of-things/item/john-deere-how-information-enabled-farming-will-feed-the-world>
- Kim, D. and M.G. Solomon (2016), Fundamentals of information systems security 3rd Edition 2016: Jones & Bartlett Learning. 548.
- Mulligan, G. (2007) The 6LoWPAN architecture. in Proceedings of the 4th workshop on Embedded networked sensors. Cork, Ireland: Association for Computing Machinery DOI: <http://doi.org/doi:10.1145/1278972.1278992>.
- Miller, B.A., C. Bisdikian, and T. Foreword (2000) By-Siepe, Bluetooth revealed : Prentice Hall.
- Paetz, C., Z-Wave Essentials. 2018: CreateSpace Independent Publishing Platform. 310.

Scully, P. (2020), Top 10 IoT applications in 2020, in IoT Analytics: Market Insights for the Internet of Things. Available : <https://iot-analytics.com/top-10-iot-applications-in-2020/>

Shelby, Z. and C. Bormann (2011), 6LoWPAN: The wireless embedded Internet. Vol. 43.: John Wiley & Sons. 244.

Sethi P., Smruti R. Sarangi, (2017) "Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications", Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 2017,. <https://doi.org/10.1155/2017/9324035>

TU Automotive, Volvo Claims 1M Connected Car Milestone, in TU Automotive. (2019). Available <https://www.tu-auto.com/volvo-claims-1m-connected-car-milestone/>

Vejlgaard, B., et al. (2017) Coverage and capacity analysis of sigfox, lora, gprs, and nb-iot. in 2017 IEEE 85th vehicular technology conference (VTC Spring). IEEE. DOI: <http://doi.org/doi:10.1109/VTCSpring.2017.8108666>

Yalçınkaya, F, et al. (2020). IoT based Smart Home Testbed using MQTT Communication Protocol . International Journal of Engineering Research and Development , 12 (1) , 317-324 . DOI: 10.29137/umagd.654056

World Medical Innovation Forum, Calibrating Innovation Opportunity and Urgency. (2020). Available: <https://www.youtube.com/watch?v=VXyvxIMQi0c>

Wu, M., et al.(2010) Research on the architecture of Internet of Things. in 2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE). IEEE. DOI: <http://doi.org/doi:10.1109/ICACTE.2010.5579493>



e-issn: 1308-5514